



Moderne Antriebstechnik im Bahnbereich

Anhand des Beispiels Cityjet eco

ENERGIESYSTEME IM UMBRUCH VII, Innsbruck
P.Eckert, MO RS EN PT SD, 09.10.2018



Agenda

- Begriffs-Definitionen
- Aufbau und Arbeitsweise Traktionssystem
- Systemlayout und Dimensionierung
- Hybridsysteme
- Motivation und Zusammenhänge

Energiebedarf

„Energiebedarf“ im Kontext dieses Vortrags meint

nicht nur die verrichtete mechanische Nutzarbeit, sondern

- den Stromverbrauch bei elektrischer Traktion und
- den Kraftstoffverbrauch bei Dieseltraktion am Stromabnehmer bzw. Tank des Triebfahrzeugs

Antrieb: Verlustbehaftete Umwandlung von elektrischer bzw. chemischer Energie in mechanische Arbeit ($\eta < 100\%$)

Zusätzlich wird Leistung für Traktions-Hilfsbetriebe und weitere Nebenverbraucher benötigt

Gesamtverbrauch = Traktionsarbeit
+ **Antriebsverluste**
+ **Bedarf Nebenverbraucher**

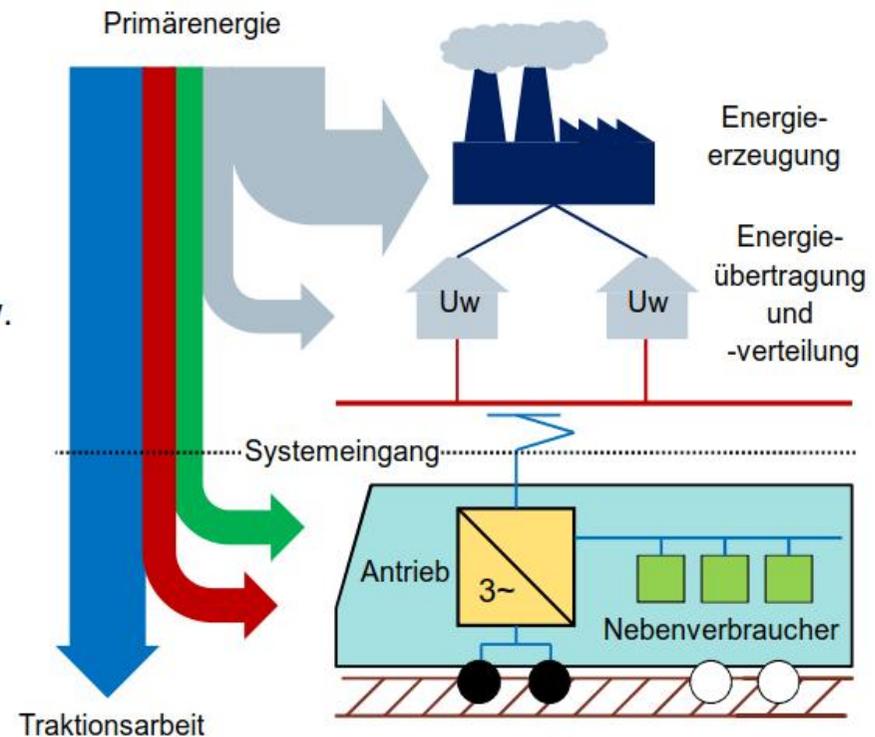
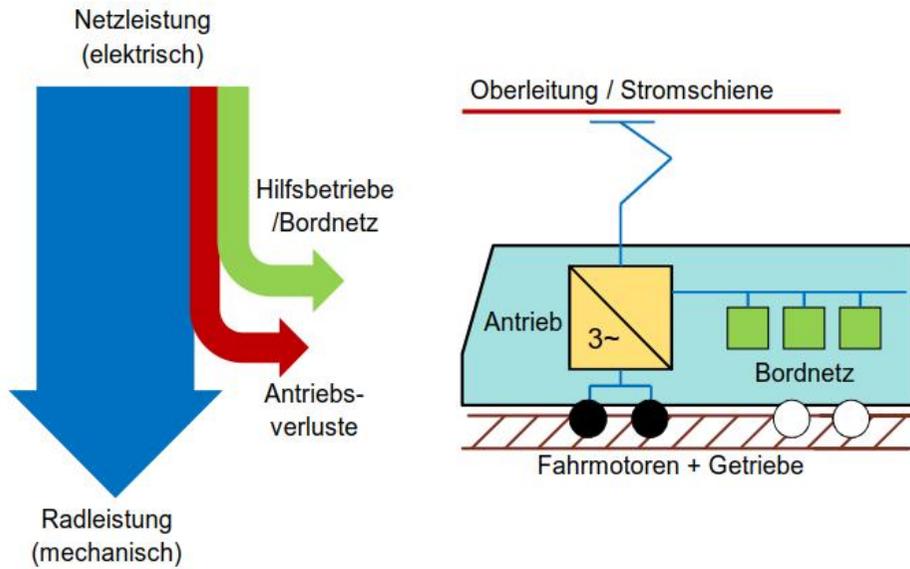
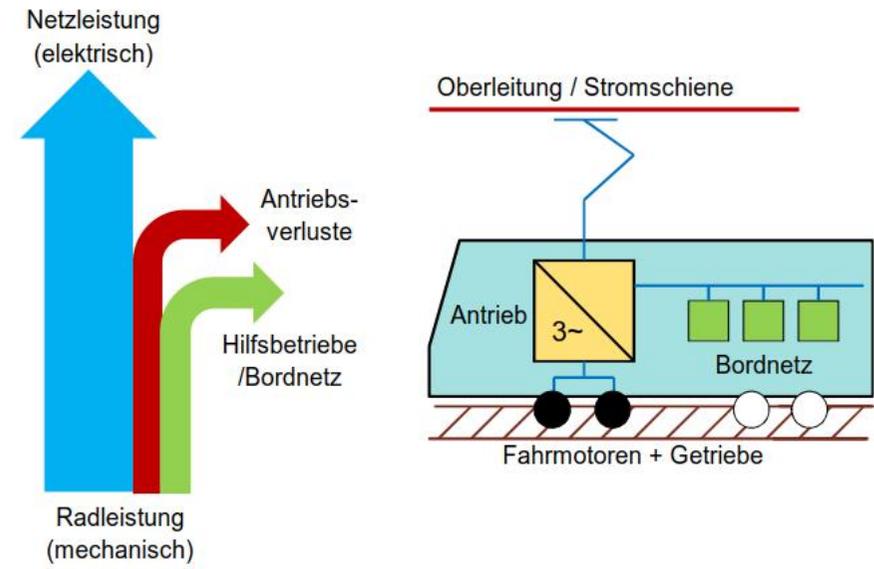


Abb. 1: Energiefluss bei elektrischer Bahntraktion

Leistungsfluss im Antriebssystem bei elektrischer Traktion



Fahren



Bremsen

Leistungsfluss im Antriebssystem bei elektrischer Traktion

Für die dem Fahrdraht entnommene bzw. zurückgespeiste elektrische Netzleistung gilt immer

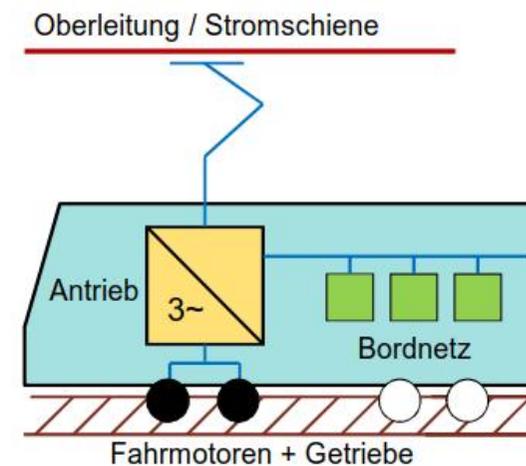
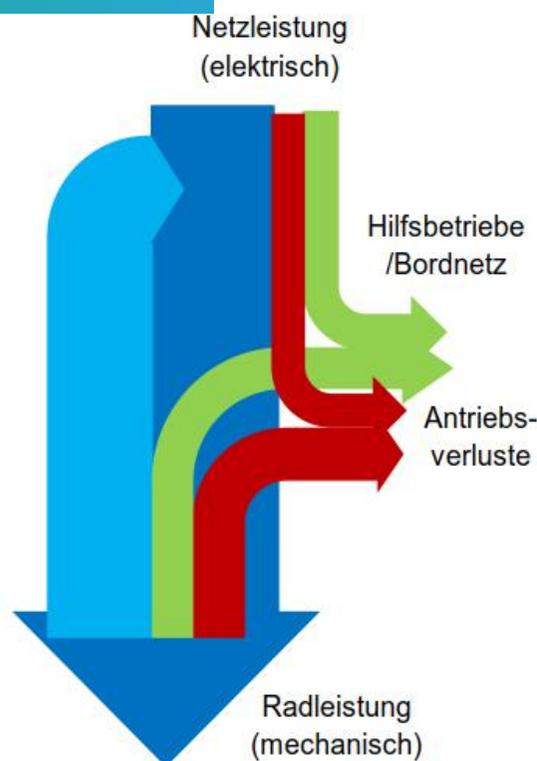
$$P_{Netz} = P_{Rad} + P_{HB} + P_V + P_{Komfort}$$

Verbrauchte, aufgenommene bzw. zurückgespeiste **Netzenergie**

$$E_{Netz} = \int_0^t P_{Netz} dt = E_{auf} - E_{rück}$$

$$E_{auf} = \int_0^t \text{Max}\{P_{Netz}, 0\} dt$$

$$E_{rück} = \int_0^t \text{Max}\{-P_{Netz}, 0\} dt$$





Radleistung und Zugkraftarbeit

Auf die Schiene wirkende Kraft „am Rad“

$$F_{Rad} = F_T - F_B$$

Mechanische Radleistung

Zur Vereinfachung wird eine eventuelle Differenz zwischen Umfangsgeschwindigkeit am Rad und der Fahrzeuggeschwindigkeit, der "Schlupf" zwischen Rad und Schiene, vernachlässigt.

$$P_{Rad} = F_{Rad} \cdot v$$

$$W_{Rad} = F_{Rad} \cdot s$$

Traktionsarbeit oder „Zugkraftarbeit“

bei Fahrt auf einer Strecke der Weglänge s

$$W_{Rad} = \int_0^s F_{Rad} ds = \int_{t=t(0)}^{t=t(s)} P_{Rad} dt$$

Antreiben:

$$F_T > 0 \Rightarrow P_{Rad}, W_{Rad} > 0$$

⇒ Energieaufnahme

Elektrisches Bremsen:

$$F_T < 0 \Rightarrow P_{Rad}, W_{Rad} < 0$$

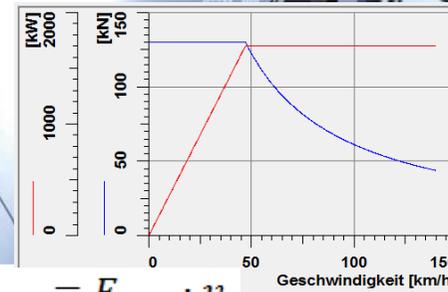
⇒ Energieabgabe
(regenatorische Bremsung)

Mechanisches Bremsen:

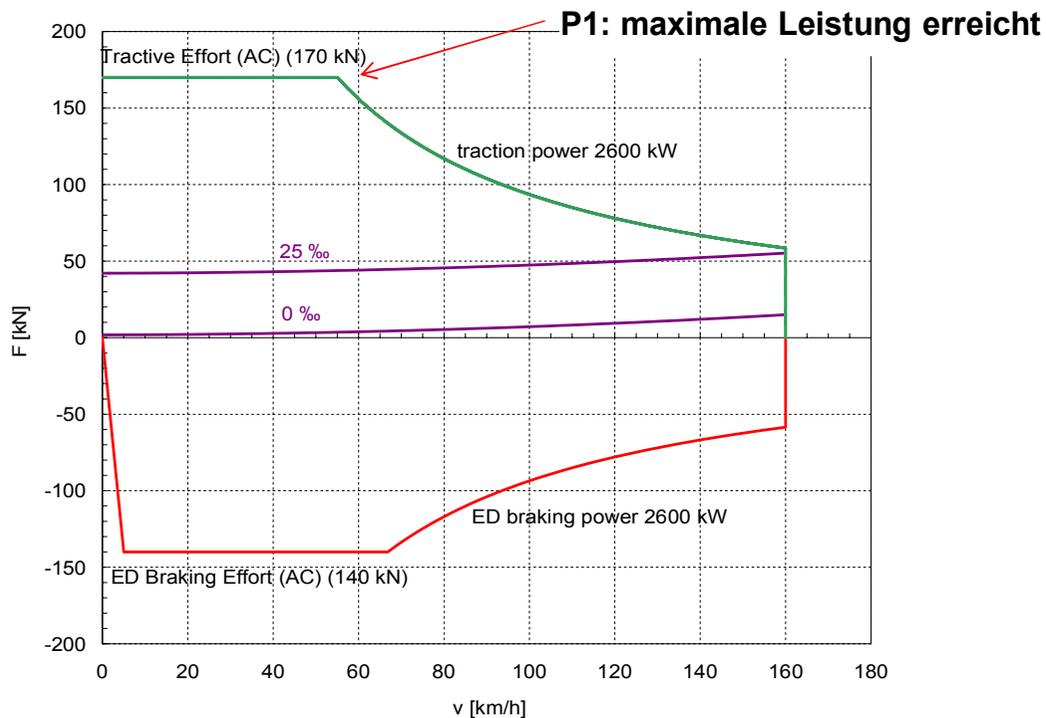
$$F_B > 0 \Rightarrow P_{Rad}, W_{Rad} < 0$$

⇒ Umwandlung in Reibungswärme
(dissipative Bremsung)

Arbeitsweise Antriebssystem Kennlinien

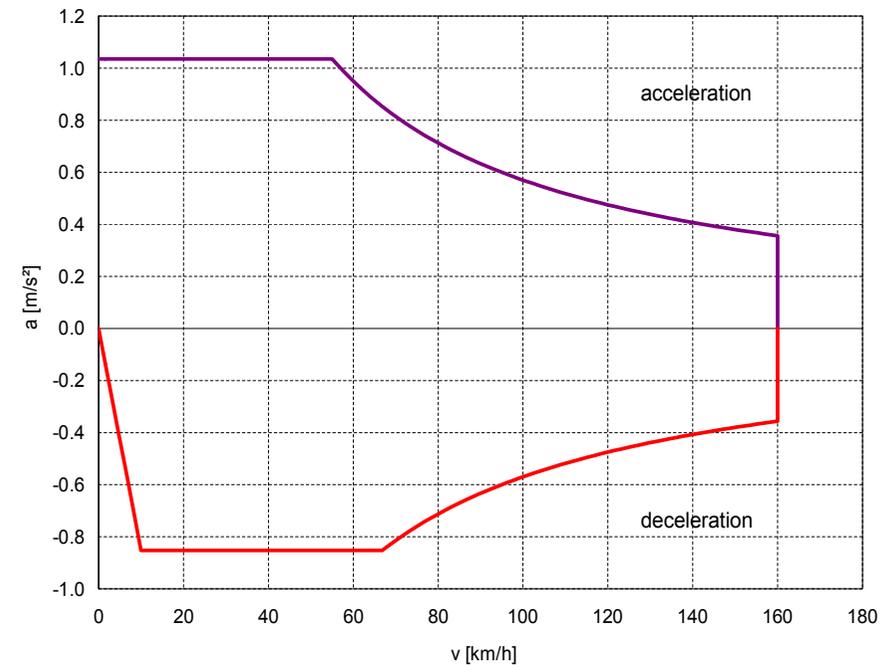


$$P_{Rad} = F_{Rad} \cdot v$$



Beispielhaftes Zug- und Bremskraftdiagramm eines Regionaltriebzugs mit Fahrwiderstandskraft bei Steigung 0 bzw. 25 ‰.

Restricted © Siemens AG 2018



Beschleunigungs- und Verzögerungsdiagramm



Verluste im Antriebssystem

Die Antriebskomponenten der Drehstromantriebs-technik haben typischerweise hohe Wirkungsgrade.

Hauptverlustursachen sind

bei den „Wickelgütern“ (Fahrmotor, Trafo, Drosseln)

- Kupferverluste (Stromwärmeverluste)
- Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste)

bei den Stromrichtern (Pulswechselrichter, 4QS, HBU)

- Durchlass- und Schaltverluste der Leistungshalbleiter-Bauelemente

Bei der Wirkungsgradoptimierung sind die Aspekte Gewicht, Volumen und Kosten mit zu berücksichtigen!

	Nahverkehr DC	Fernverkehr AC
Netzdrossel	98 %	-
Transformator	-	90 - 95 %
Stromrichter 4QS	-	98 %
Stromrichter PWR	98 %	99 %
Fahrmotor (ASM)	ca. 90 %	ca. 95 %
Getriebe	98 %	98 - 99 %
Hilfsbetriebeumrichter	-	90 - 95 %

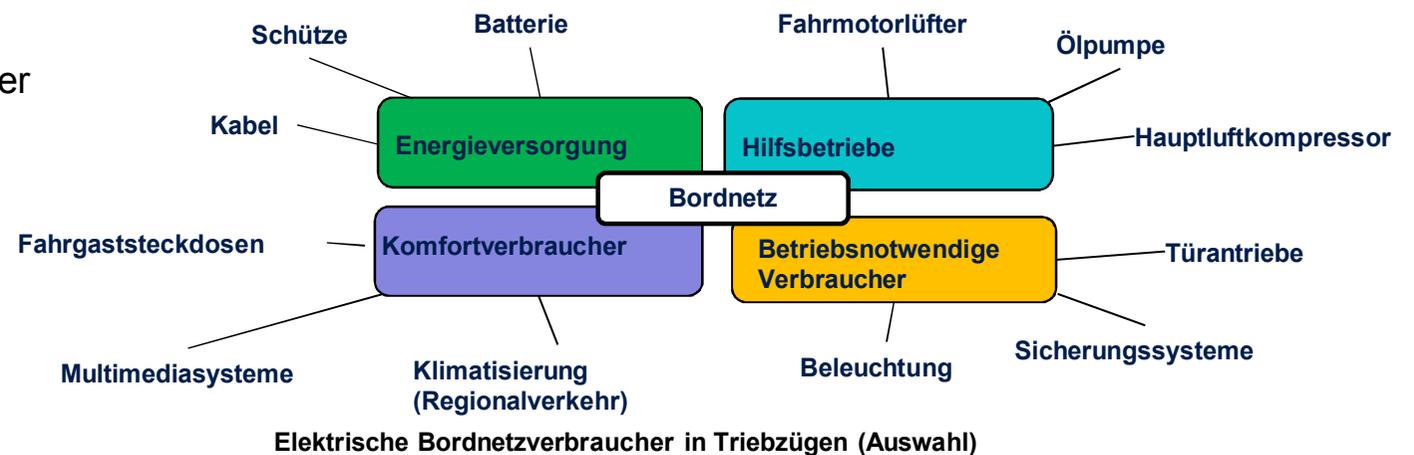
Typische Wirkungsgrade von Antriebskomponenten

Nebenverbraucher / Bordnetz

Als Nebenverbraucher oder Bordnetzverbraucher werden in Schienenfahrzeugen Verbraucher definiert, die nicht unmittelbar der Antriebsaufgabe dienen.

- Der Bordnetzverbrauch wird oft unterschätzt, da die maximale Bordnetzleistung deutlich kleiner als die Traktionsleistung ist. Die Bordnetzbedarf verteilt sich aber relativ gleichmäßig über einen langen Zeitraum.
- Für Fahrzeuge im Nahverkehr kann der Bordnetz-Energiebedarf höher als der Traktions-Energieverbrauch sein, insbesondere bei einer hohen Klimatisierungsleistung.
- Durch die Zunahme von Komfortfunktionen steigt der Bordnetzverbrauch in Triebzügen an.

- Der leistungsmäßig größte Verbraucher im Bordnetz von Triebzügen ist das **HVAC-System (Klimaanlage)**
- Der Energiebedarf hängt von der Klimazone ab und unterliegt jahreszeitlich starken Schwankungen



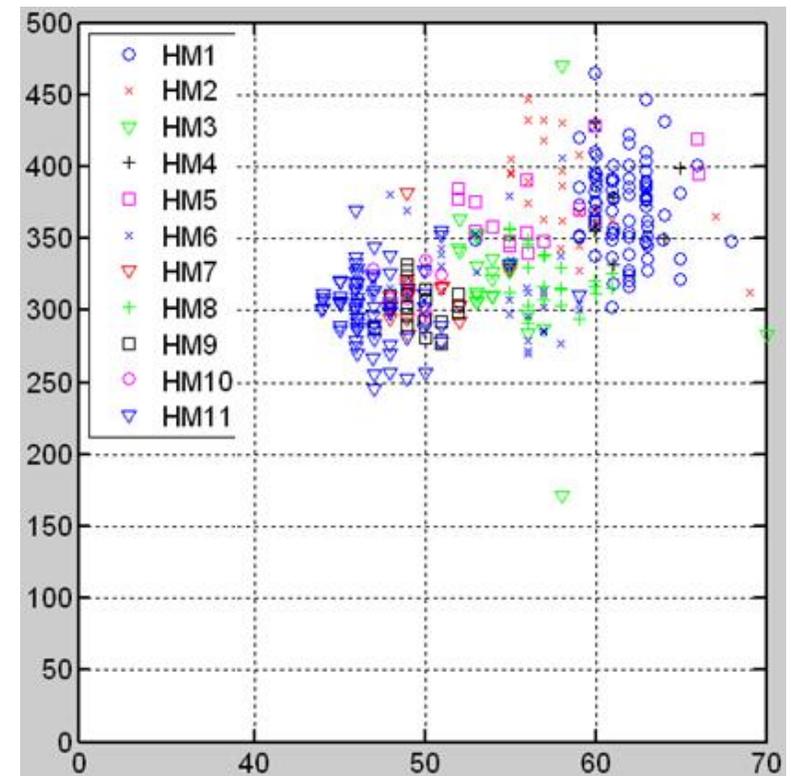
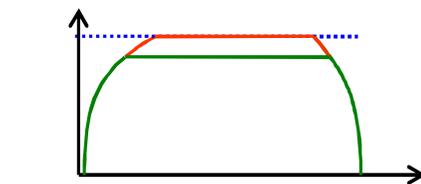
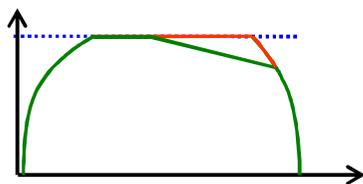
Energiebedarf durch Fahrweise Fahrerassistenzsysteme (DAS)

Der Traktionsenergieverbrauch für eine konkrete Zugfahrt hängt, neben äußeren Störeinflüssen, in starkem Maße von der individuellen Fahrweise des Triebfahrzeugführers ab.

Tendenziell nimmt der Verbrauch bis hin zur technisch kürzest möglichen Fahrzeit immer weiter zu.

Energiesparende Fahrweise

- Bei der Fahrplanerstellung werden Fahrzeitreserven eingeplant.
- Unter günstigen Umständen können diese Fahrzeitreserven genutzt werden, um, unter Einhaltung des Fahrplans, besonders energiesparend zu fahren.
- Die klassischen Strategien dazu sind



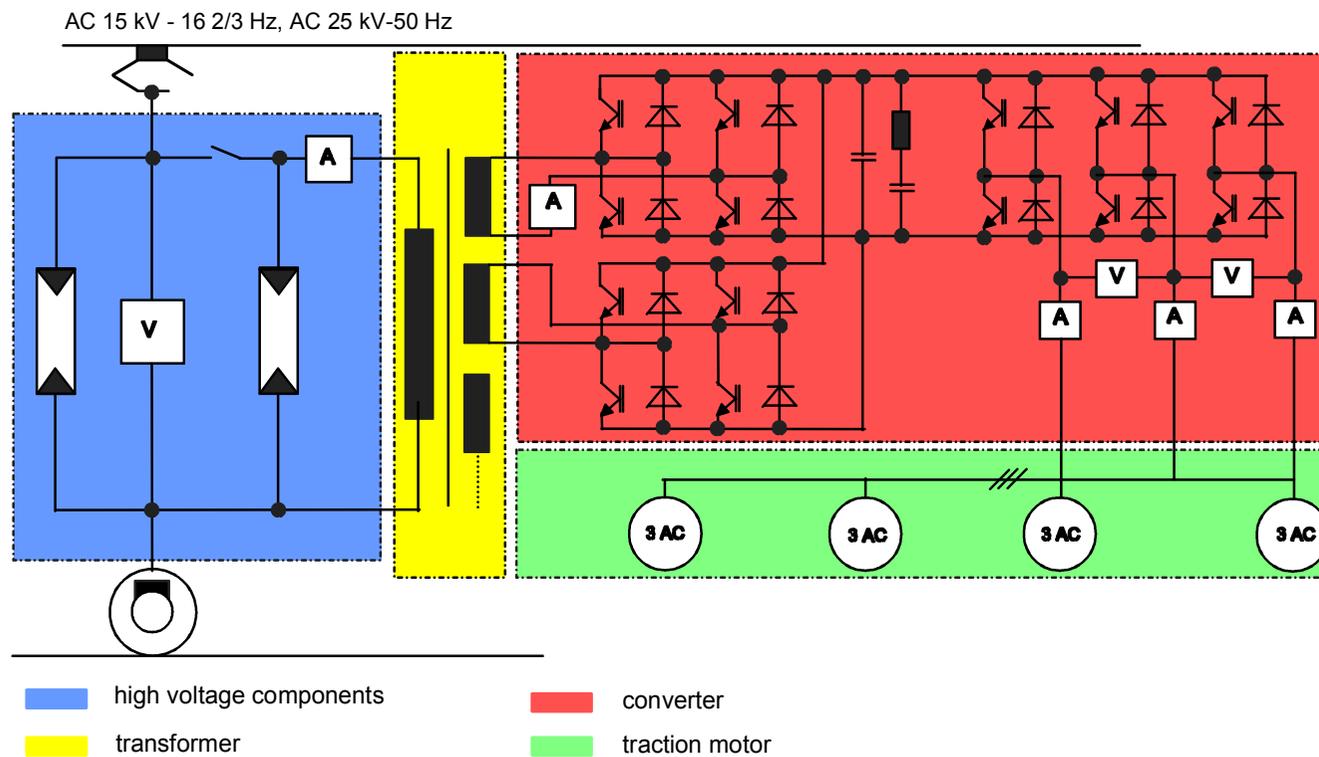
Energieverbrauch in kWh über Fahrzeit in Min für verschiedene Fahrzeiten und Haltstellenmuster (HM)



Aufbau Traktionssystem

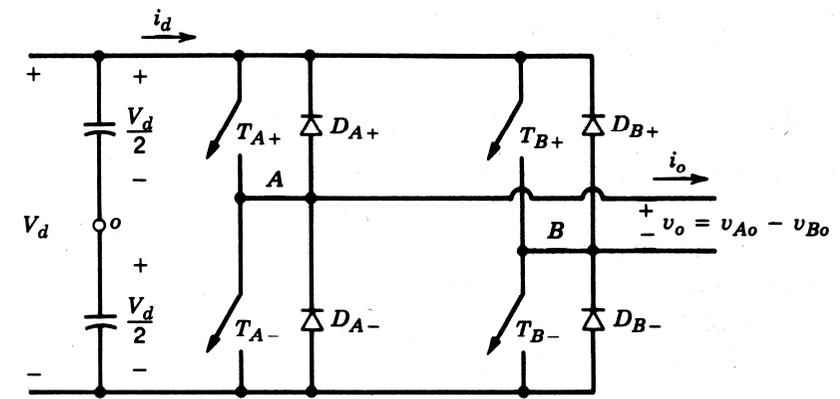
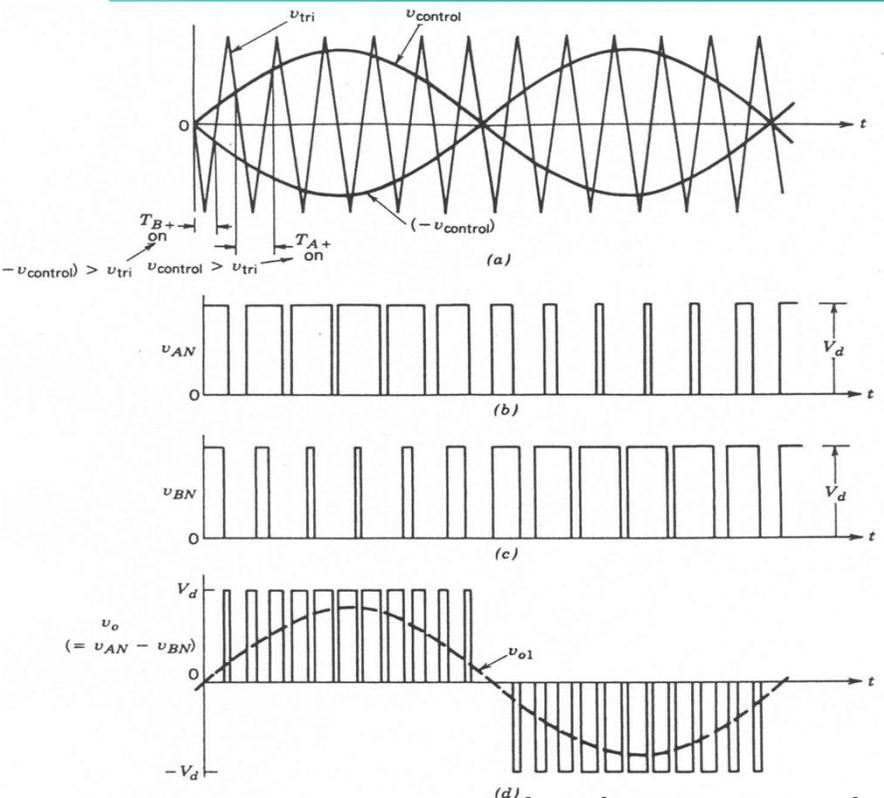
- Begriffs-Definitionen
- Aufbau und Arbeitsweise Traktionssystem
- Systemlayout und Dimensionierung
- Hybridsysteme
- Motivation und Zusammenhänge

Typisches Antriebssystem für Wechsellspannungseinspeisung

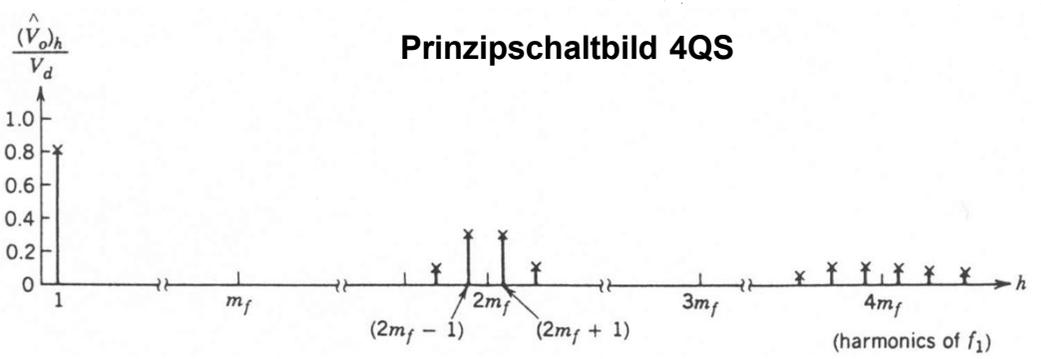




Arbeitsweise Vierquadrantensteller (4QS)



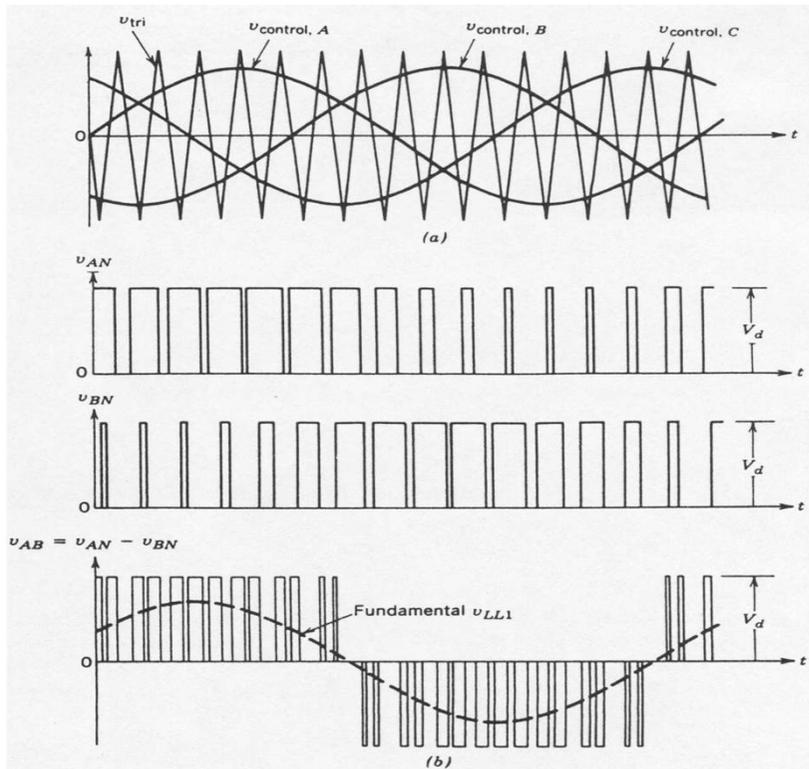
Principalschaltbild 4QS



Oberwellenspektrum (Harmonische) des Stroms

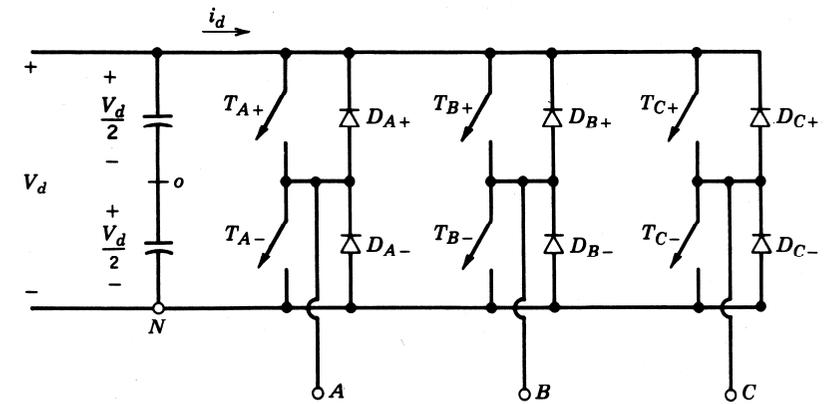


Arbeitsweise Pulswechselrichter (PWR)

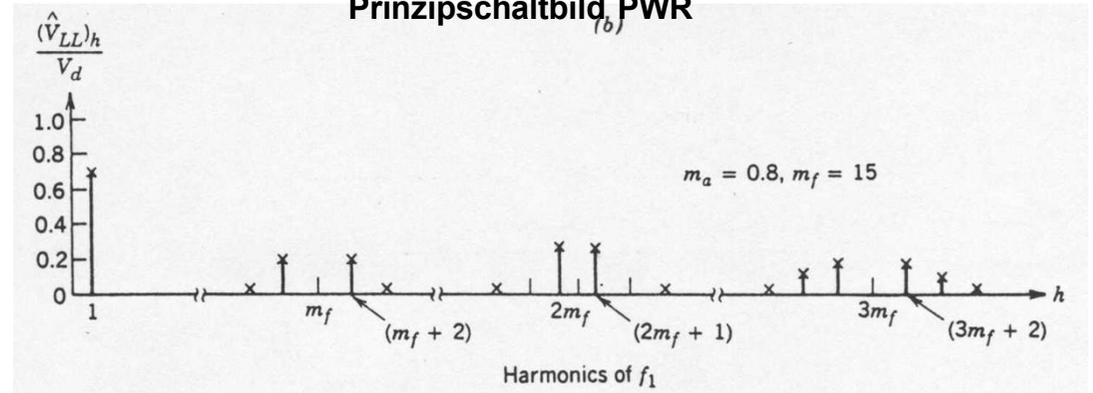


Restricted © Siemens AG 2018

**Impulserzeugung und
Ausgangsspannung**



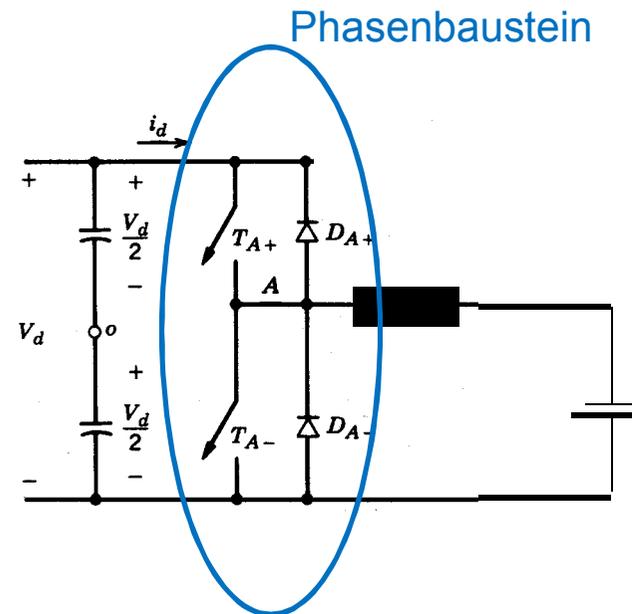
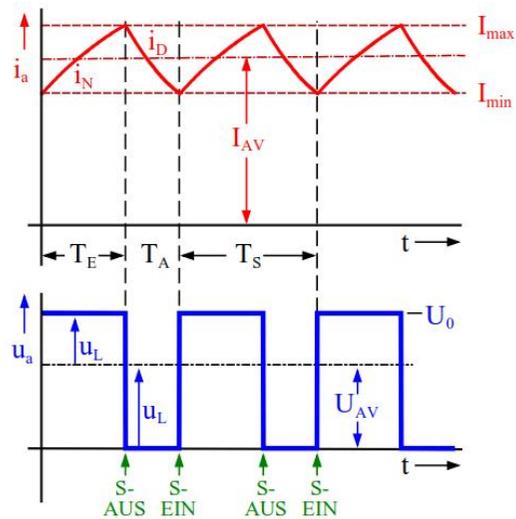
Prinzipschaltbild PWR
(b)



Oberwellenspektrum (Harmonische) des Stroms

Arbeitsweise DC/DC Steller

- Puls-/Pausenverhältnis (Aussteuergrad) bestimmt die Stromstärke
- oberer IGBT: positiver Ausgangsstrom (Laden)
- unterer IGBT: negativer Ausgangsstrom (Entladen)





Systemlayout

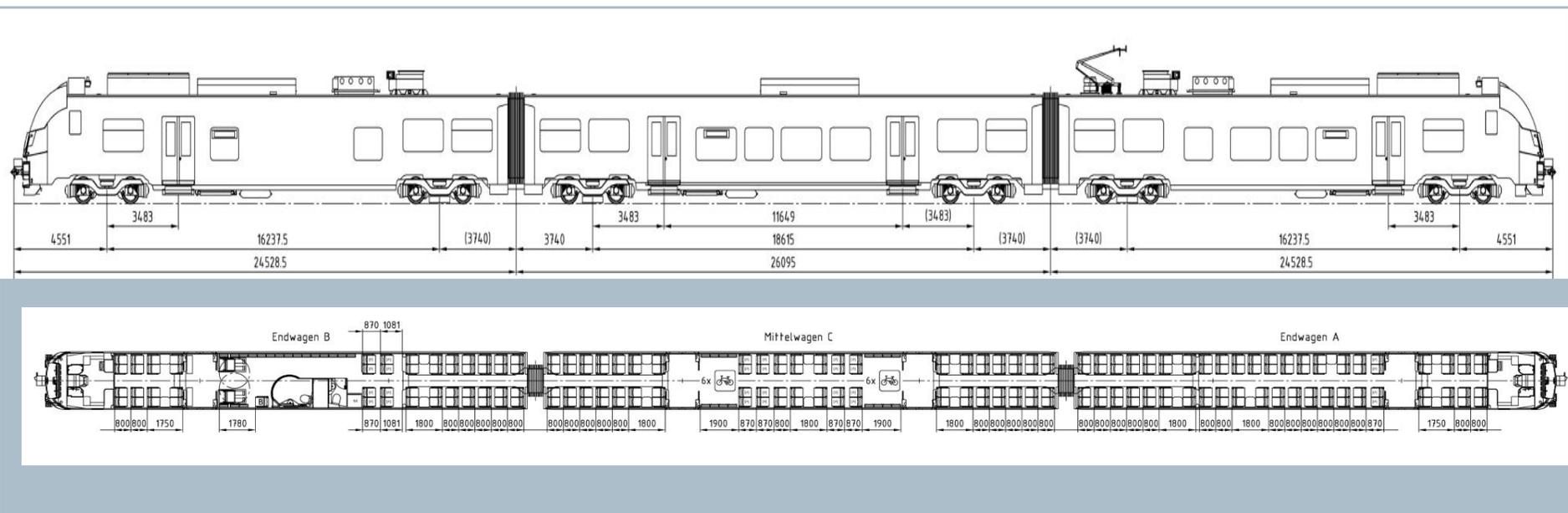
- Begriffs-Definitionen
- Aufbau und Arbeitsweise Traktionssystem
- **Systemlayout und Dimensionierung**
- Hybridsysteme
- Motivation und Zusammenhänge

Beispiel Wagen Layout

Regionalbahn

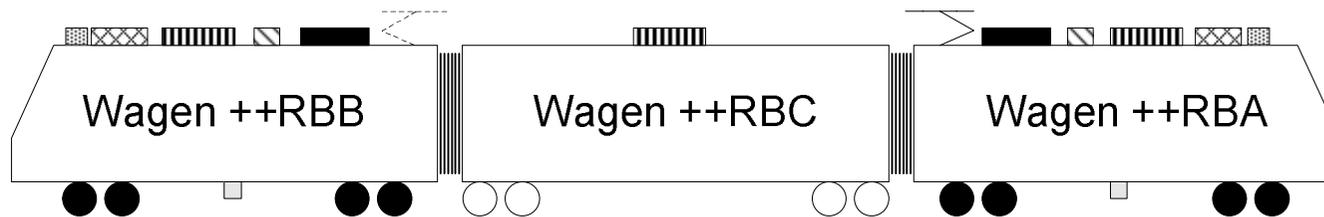
3-teiliger Triebzug (75.152 mm)

259 Sitzplätze



Anordnung der Traktionskomponenten

Traktionskomponenten Standard - Antriebskonzept



■ Haupttransformator

▨ Traktionsumrichter (einschl- HBU)

● Angetriebene Achse

|||| Heizung / Lüftung / Klimatisierung

■ BLG-Container mit 3AC400V-Verteilung

▨ Kombi-Kühlanlage

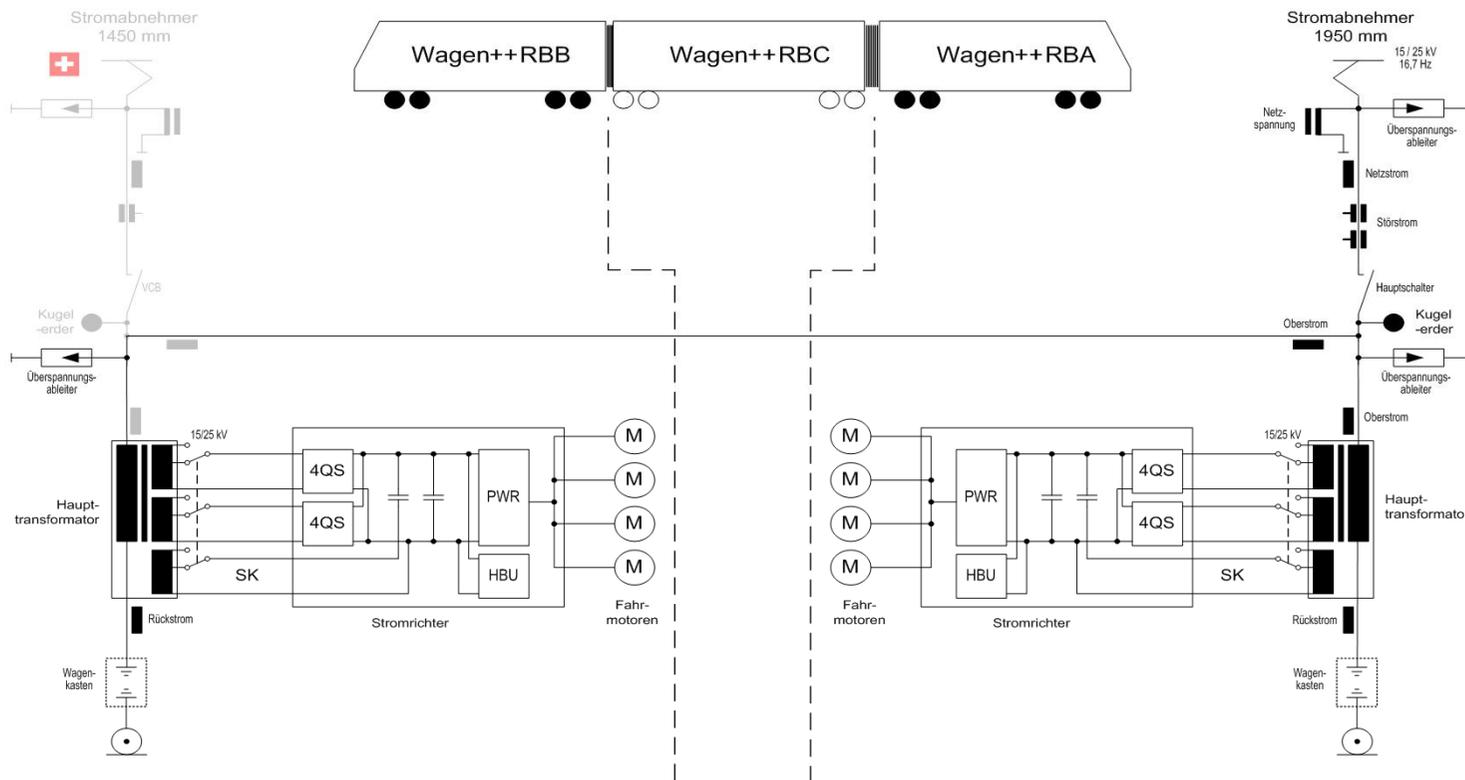
■ Batteriecontainer

○ Laufachse

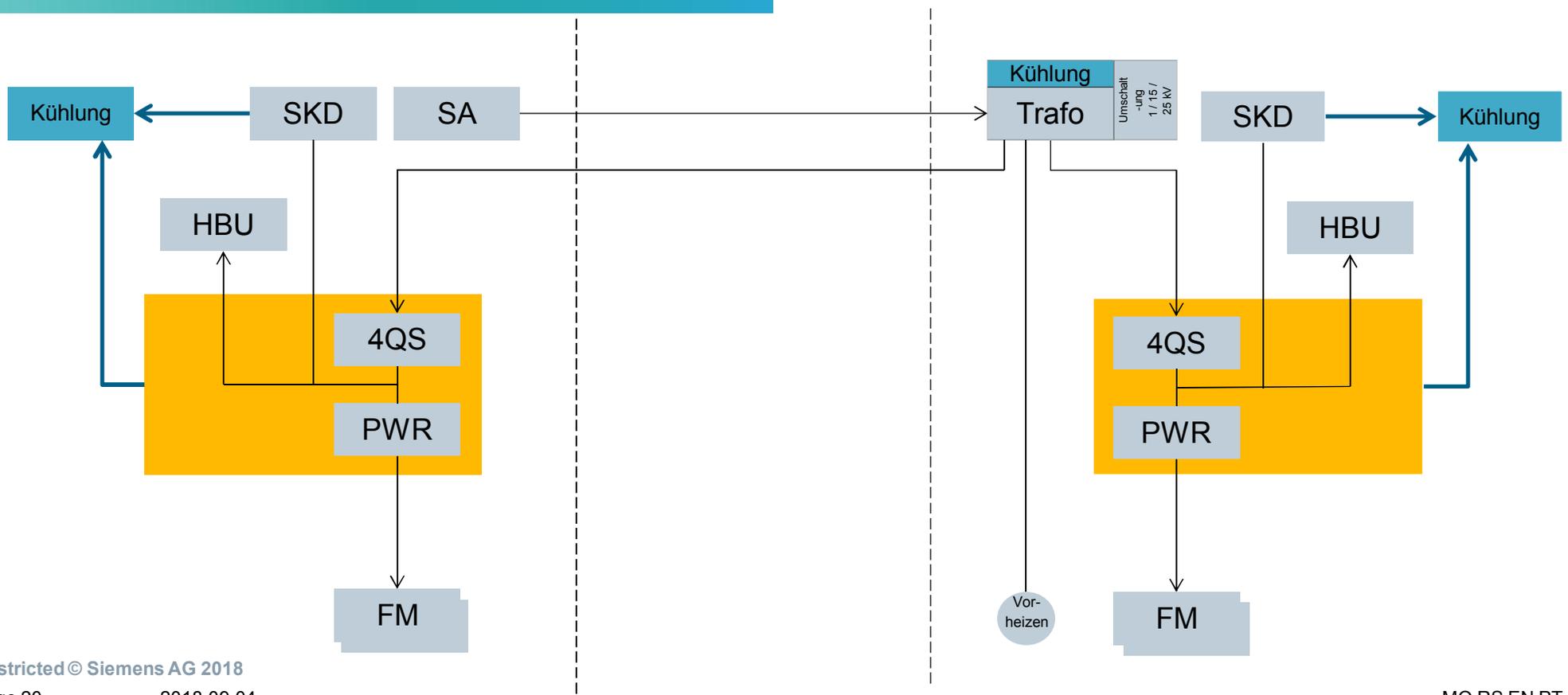
⌒ Pantograph

⌒ 2. Panto optional (Länderpaket Schweiz)

Hauptstrom- und Antriebsstromkreis



Hauptstrom- und Antriebsstromkreis



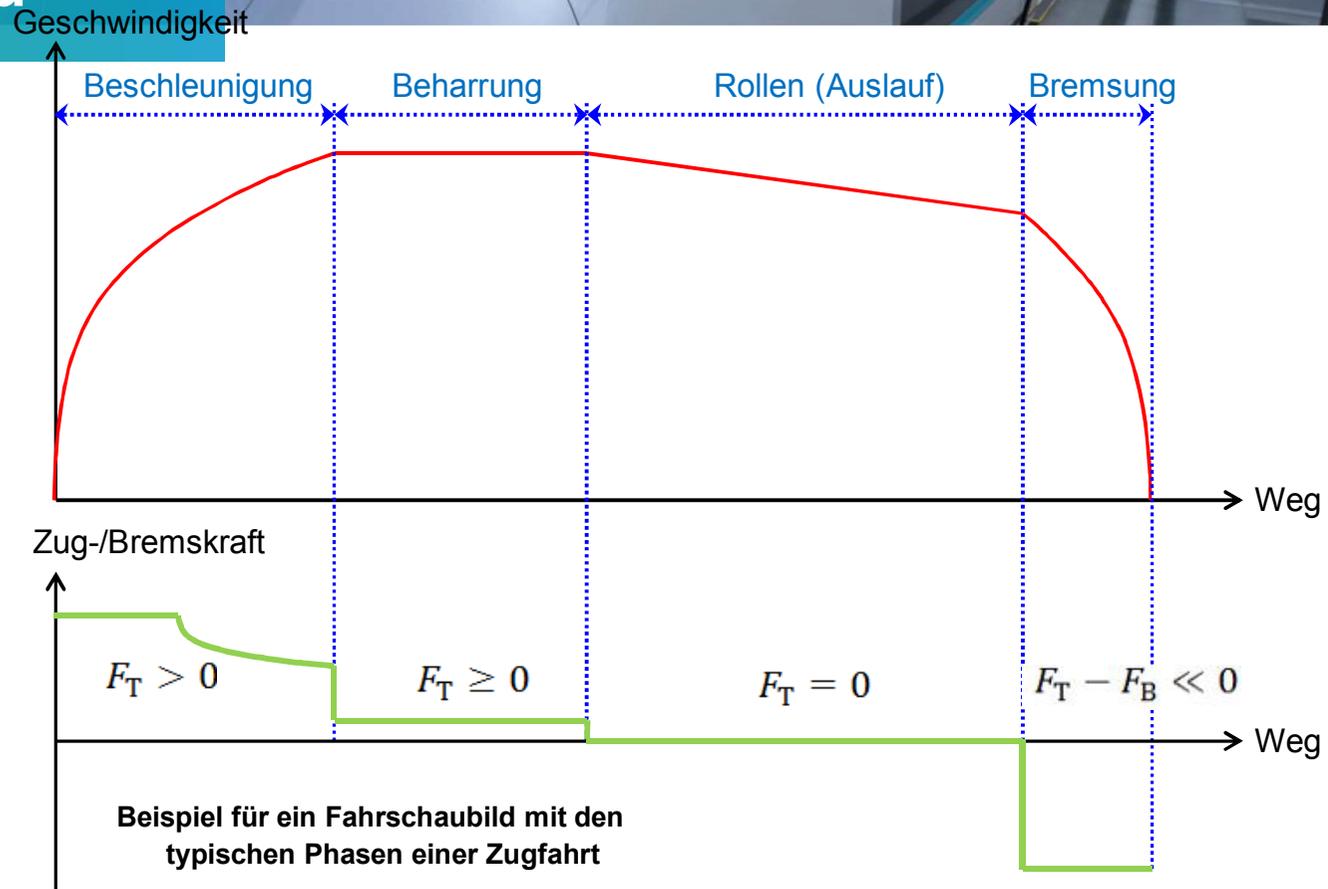
Einfaches Fahrtaubild

Der Geschwindigkeitsverlauf ergibt sich aus der Beschleunigungsgleichung

$$F_a = (m_Z + m_{rot}) \cdot a = F_T - F_B - F_W$$

Typische Phasen einer Zugfahrt sind

- Beschleunigungsphase
- Beharrungsphase
- Rollphase
- Bremsphase



Beispiel für ein Fahrtaubild mit den typischen Phasen einer Zugfahrt

Fahrspiel

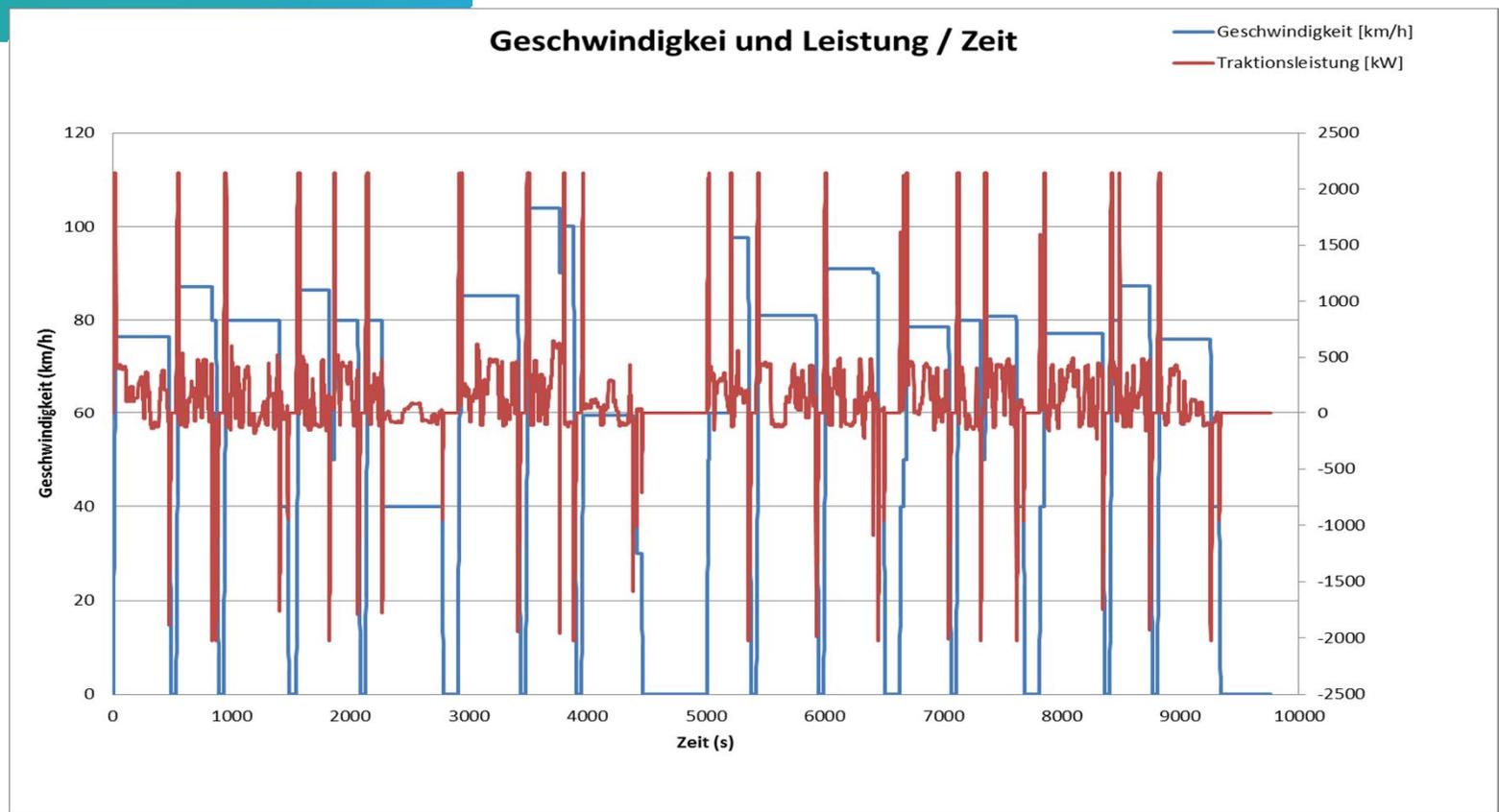
Anhand eines realen Streckenverlaufs

- mit den Angaben für
- Streckenabschnitte
- Kurven, Steigungen
- Tunneln
- Höchstgeschwindigkeiten
- etc.

wird mit den gewählten Zugparametern ein 'Fahrspiel' mit den Angaben zu

- Geschwindigkeit
- Zugkräften,
- Traktions-, Bremsleistungen
- Beschleunigung
- etc.

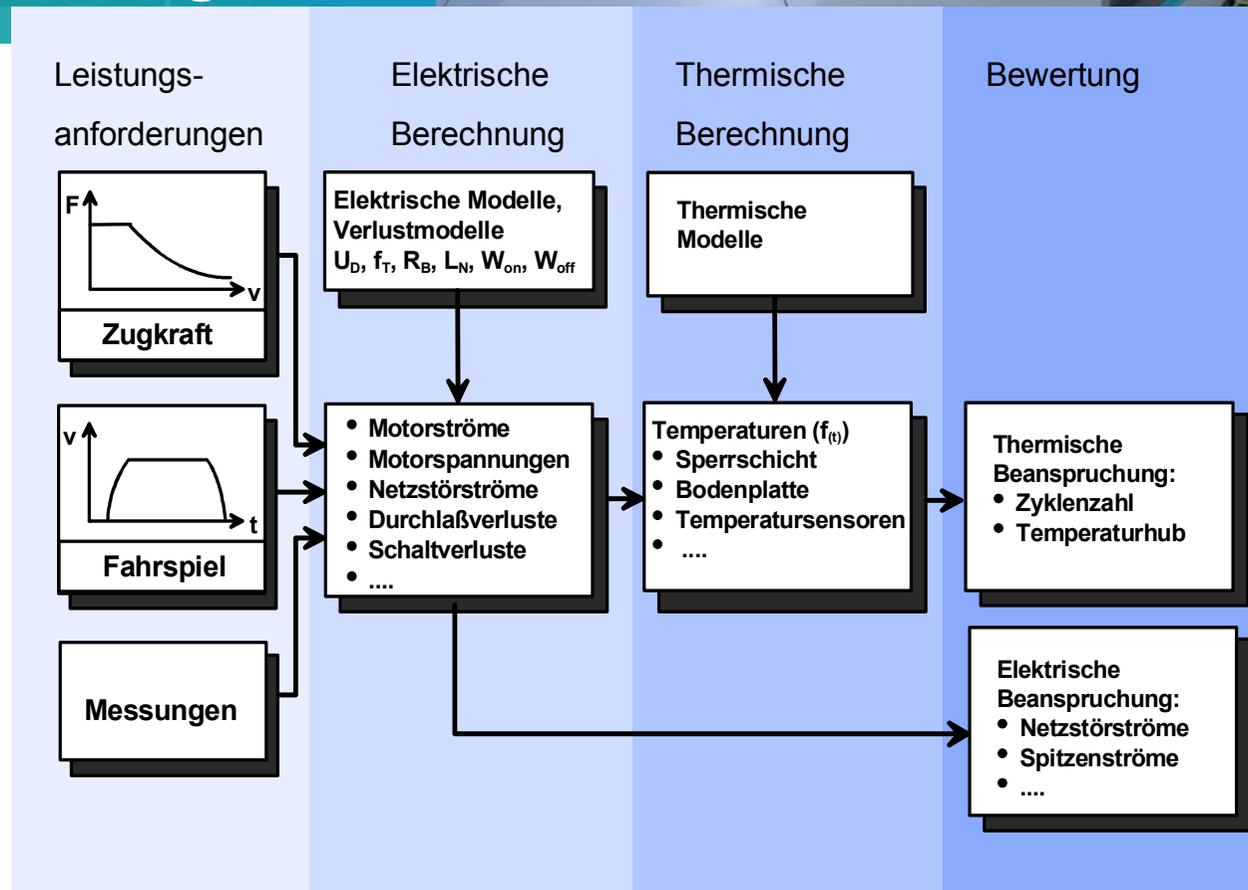
gerechnet.



Berechnungsablauf Systemdimensionierung

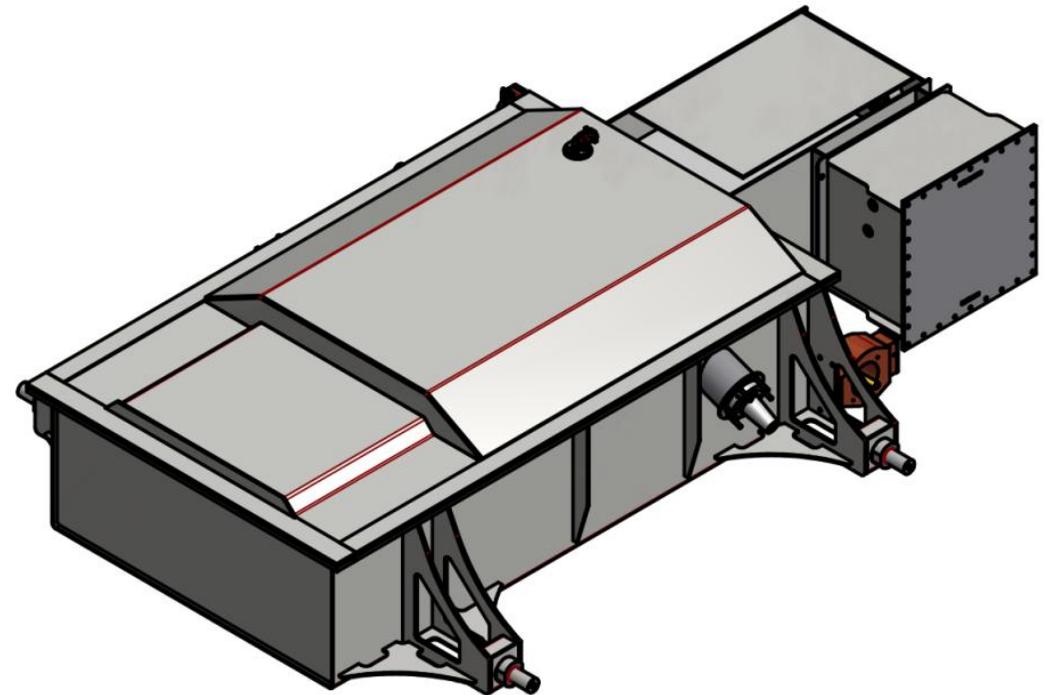
Die eigentliche Dimensionierung bzw. Auslegung der elektrischen Komponenten des Antriebssystems erfolgt anhand der genannten Eingangsparemeter mit Hilfe von spezifischen, numerischen Berechnungsprogrammen.

Das Ergebnis ist ein für die spezifischen Anforderungen des Kunden optimiertes Traktionssystem.



Komponente Transformator

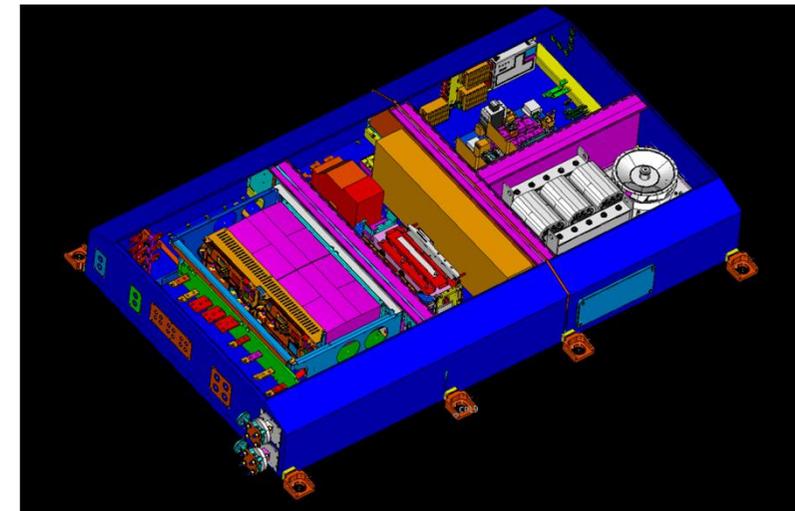
- Hersteller: Siemens Nürnberg
- Typ: Zwei-Frequenz-Trafo
(15kV/16,7Hz / 25 kV/50Hz)
- Umschaltgehäuse am Trafo
- Kühlart: KDAF
- Kühlmedium: Ester (Midel 7131)
- Saugkreisdrossel (umschaltbar) im Gehäuse integriert



Komponente Stromrichter/HBU und 4QS

- Hersteller: Siemens
- Container beinhaltet Traktionsstromrichter und HBU
- Wasserkühlung der IGBT's (Gemisch Wasser- / Antifrogen-N)
- Typ Stromrichter: AC-Kompaktumrichter
 - UZk = 1.800 V
- Typ HBU: TBK 4, ca. 130 kVA
 - Forciert belüfteter HBU-Trafo

Stromrichtercontainer mit integriertem HBU



AC-Kompaktumrichter



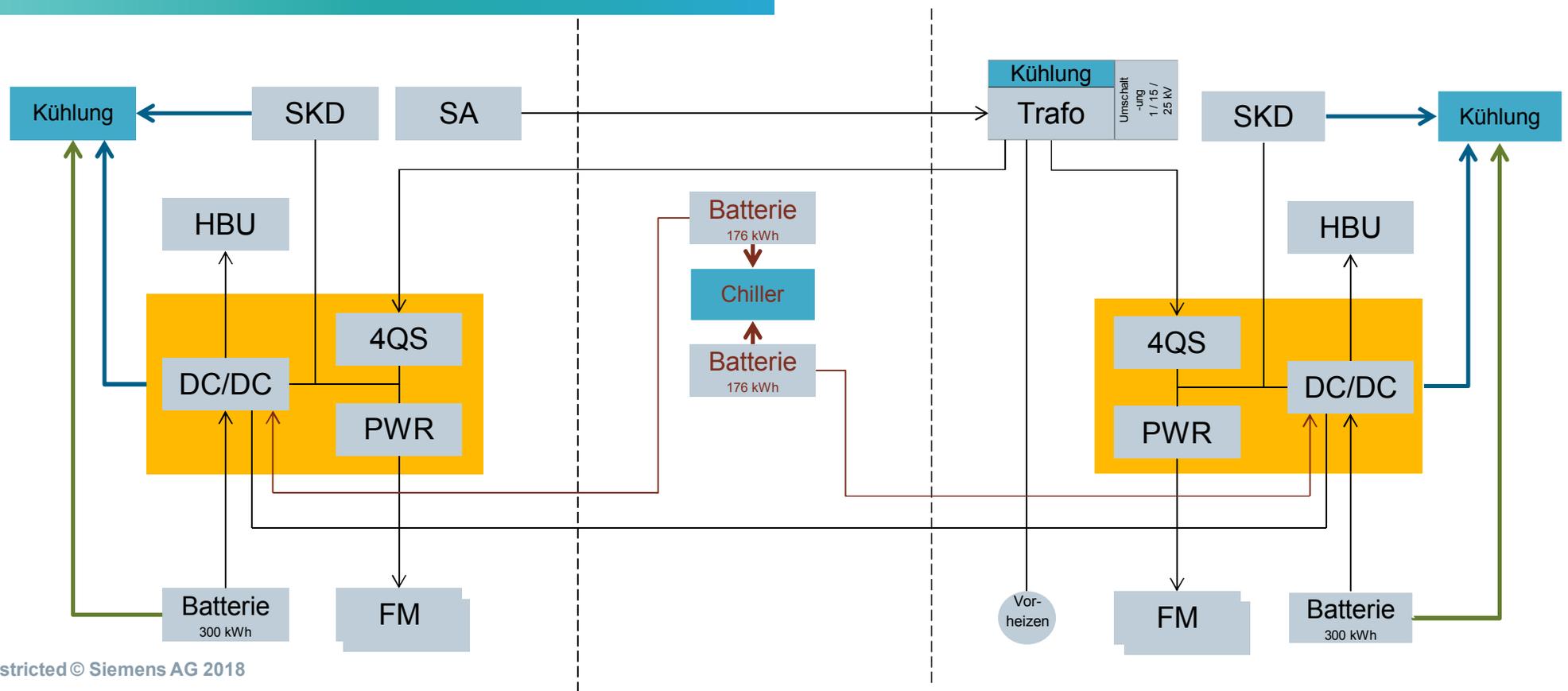
MO RS EN PT SD



Hybridsysteme

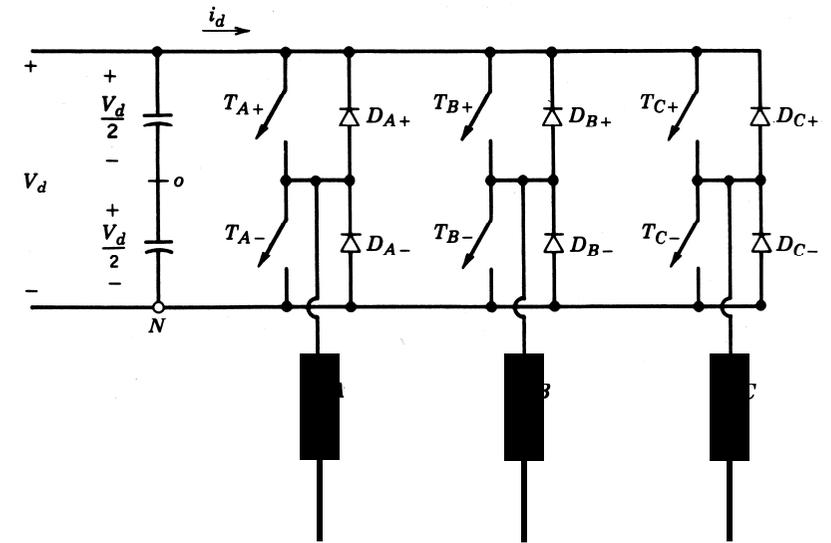
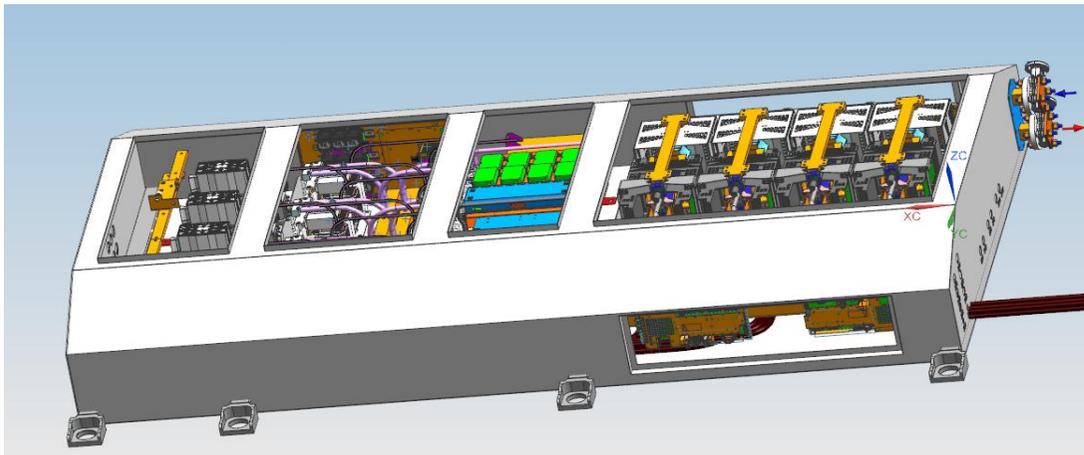
- Begriffs-Definitionen
- Aufbau und Arbeitsweise Traktionssystem
- Systemlayout und Dimensionierung
- **Hybridsysteme**
- Motivation und Zusammenhänge

Batterie Hybridsystem



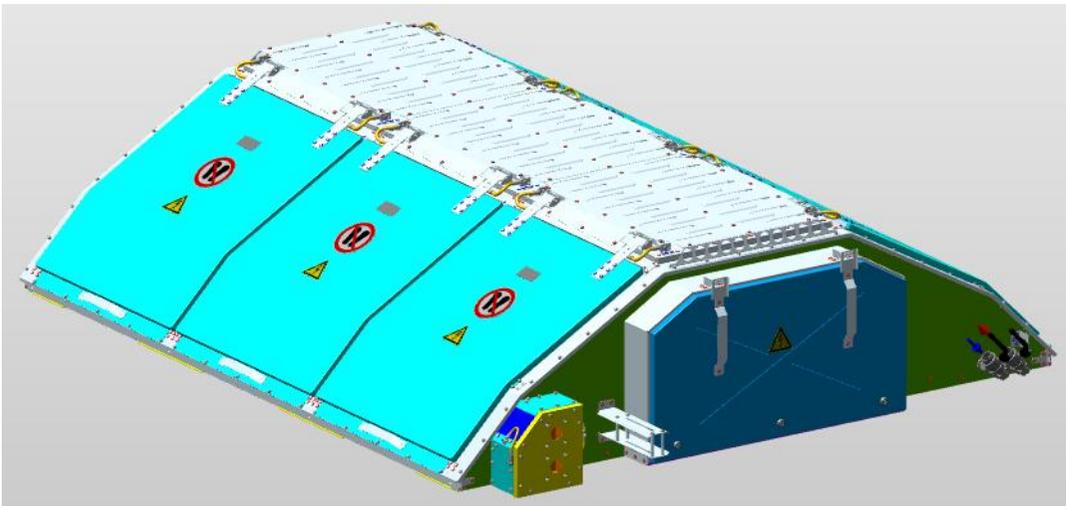
DC/DC-Steller

Der Hoch-/Tiefsetzsteller ist vergleichbar zum PWR aufgebaut, die Stellerdrosseln sind an den Phasenausgängen angeschlossen.



Batteriecontainer

Der Batteriecontainer enthält die aus Zellen zusammengesetzten Batteriemodule und die dazugehörige Wasserkühlung. Das Batteriesystem wird spezifisch für die jeweiligen Anforderungen dimensioniert.



Spezifikation Batterie

Beispiel ÖBB ECO JET

Nom. Energie: 176 kWh

Nom. Kapazität: 207 Ah

Nom. Voltage: 851 V

Max. Voltage: 980 V

Min. Voltage: 666 V

Gewicht: ~ 3,2 t

Max. C-Rate: 4,7 C

Beispiel einer LTO Li-Ion

Zelle:

- hochstromfest
- Zyklenfest
- Sicheres thermisches Verhalten



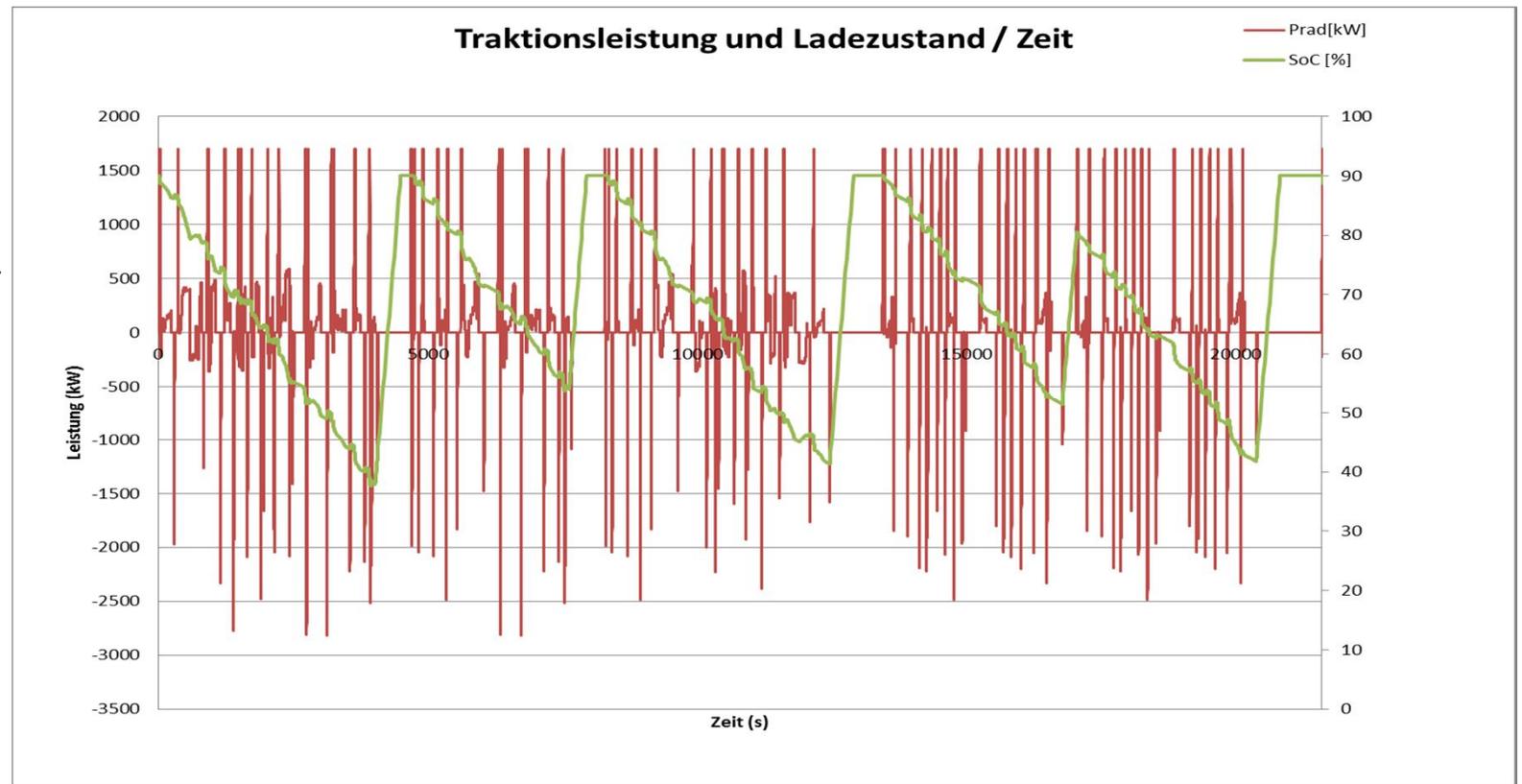
Fahrspiel Batterie-Hybrid

Beispiel eines Auslegungsfahrspiels
eines Batterie – Hybridantriebes:

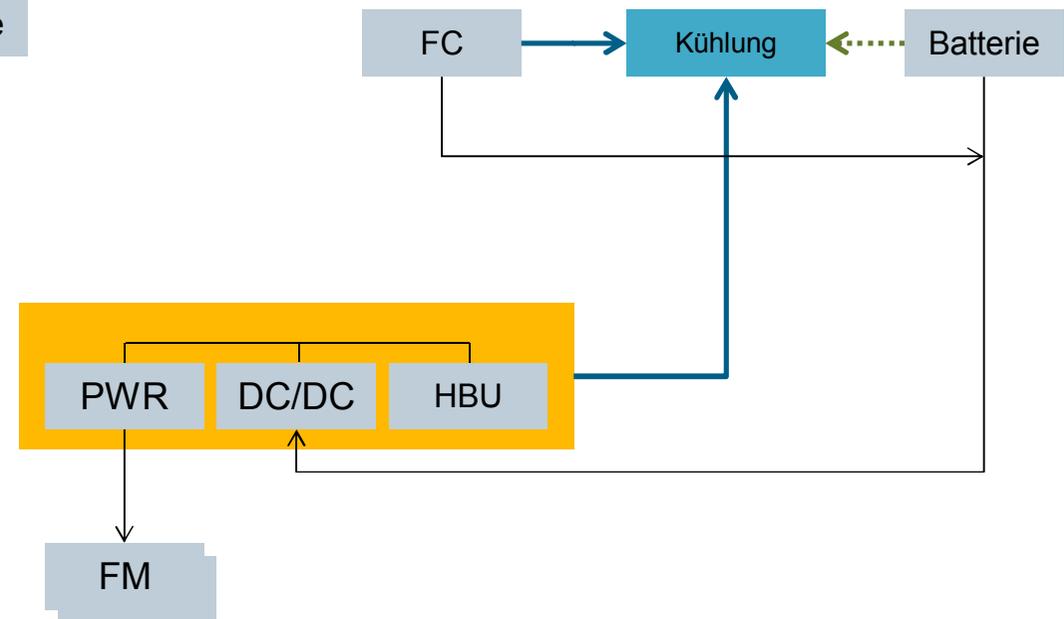
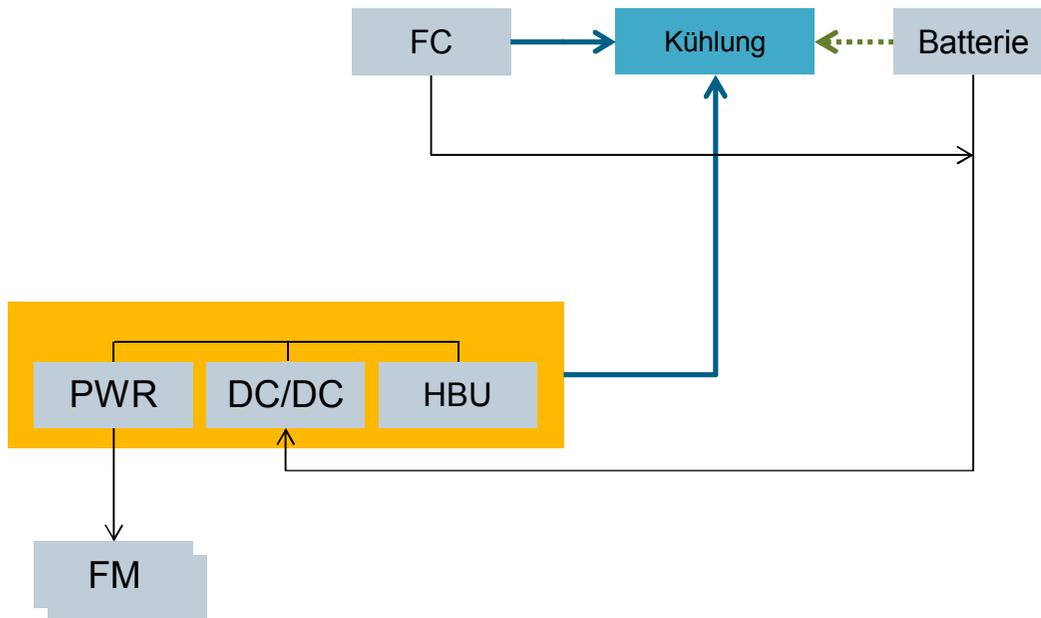
- Traktions- und Bremsleistung
- Ladezustande der Batterie

Erkennbar ist:

- Die kurzen Bremsphasen haben nur wenig Einfluss auf den Ladezustand (SOC) der Batterie
- Signifikante Abnahme des SOC während der Rollphasen im wesentlichen durch den Bedarf der Hilfsbetriebe
- Nachladung an speziellen Haltestellen z.B. über den Panthograph

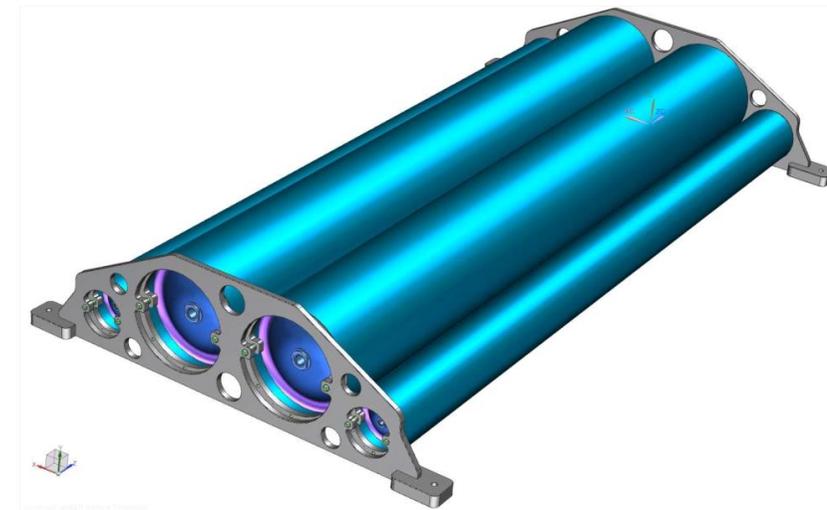
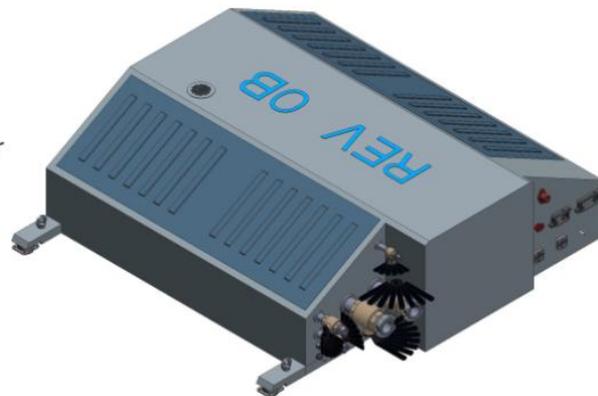
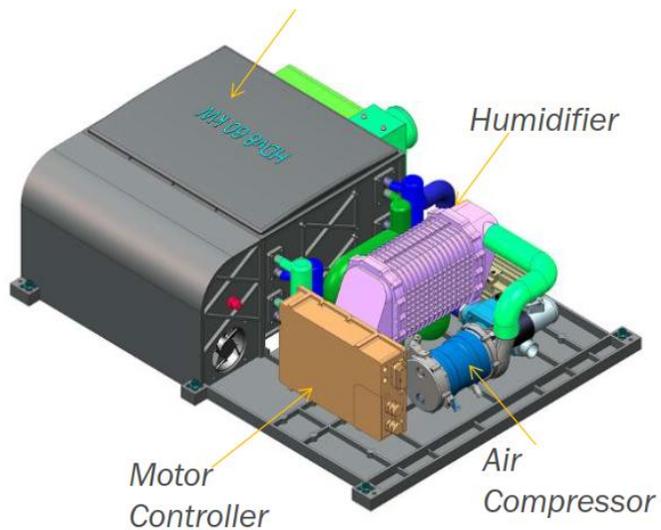


Wasserstoff-Batterie Hybridsystem



Brennstoffzelle + Tanksystem

Beispiel eines Brennstoffzellensystems und des zugehörigen Tanksystems zum Einbau auf dem Dach



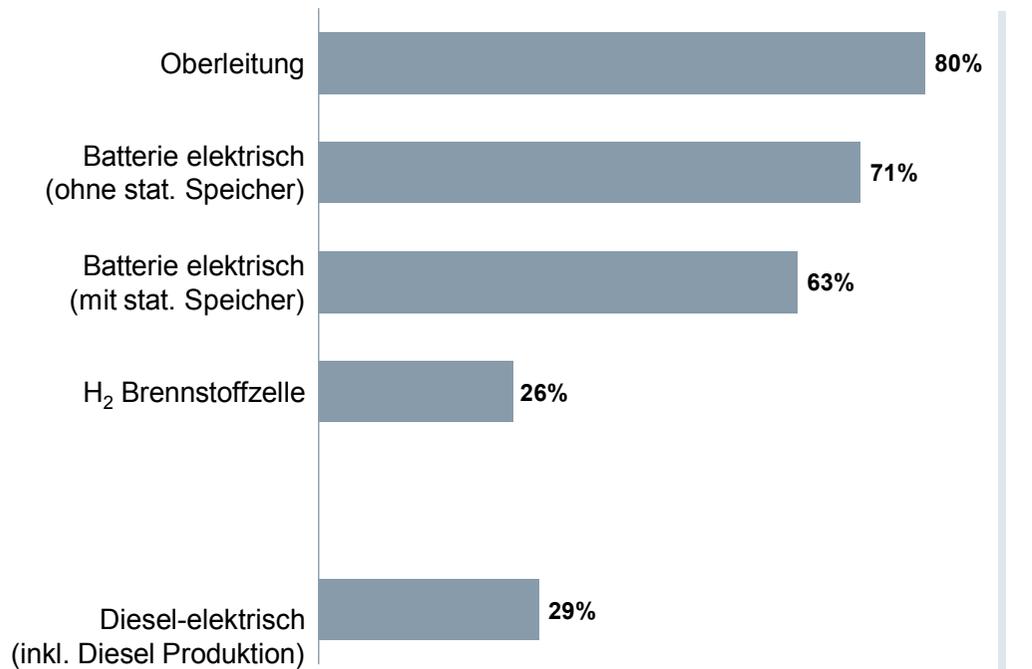


Hybridsysteme Motivation und Zusammenhänge

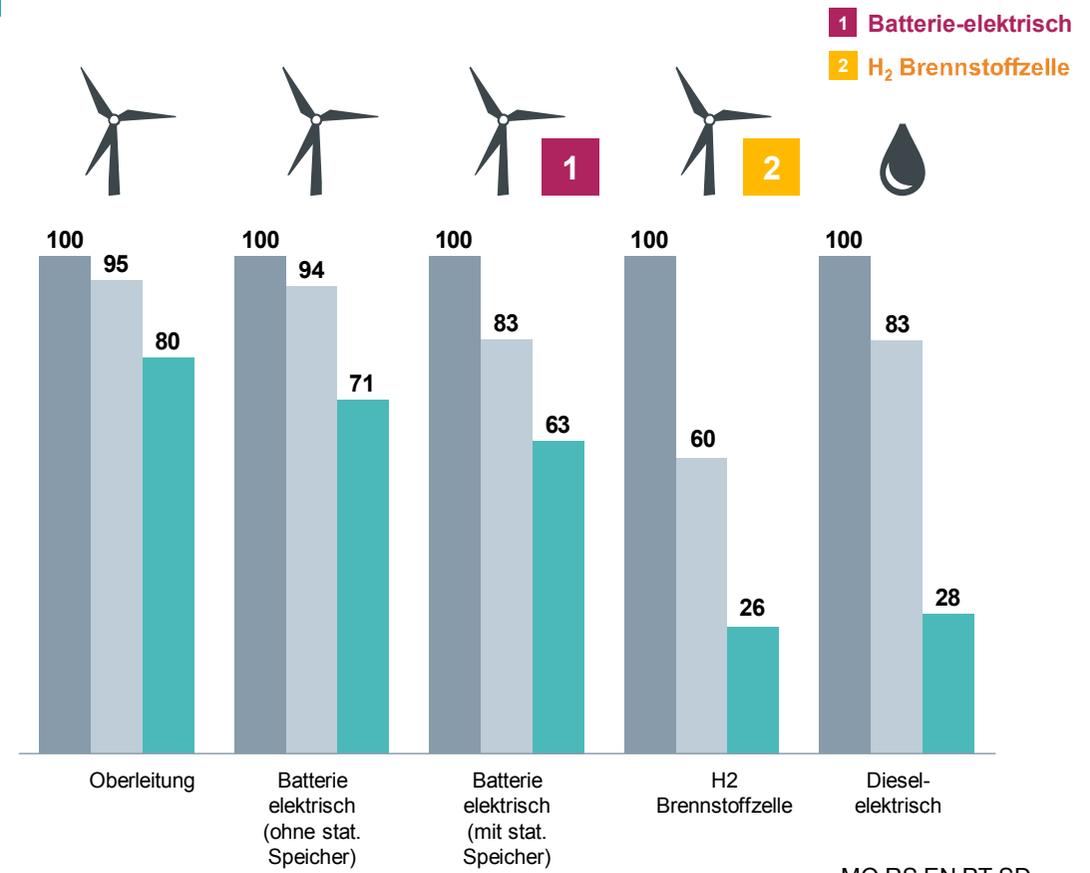
- Begriffs-Definitionen
- Aufbau und Arbeitsweise Traktionssystem
- Systemlayout und Dimensionierung
- Hybridsysteme
- Motivation und Zusammenhänge

Motivation – Der Wirkungsgrad ist (nicht) entscheidend

Wirkungsgrade im Vergleich:



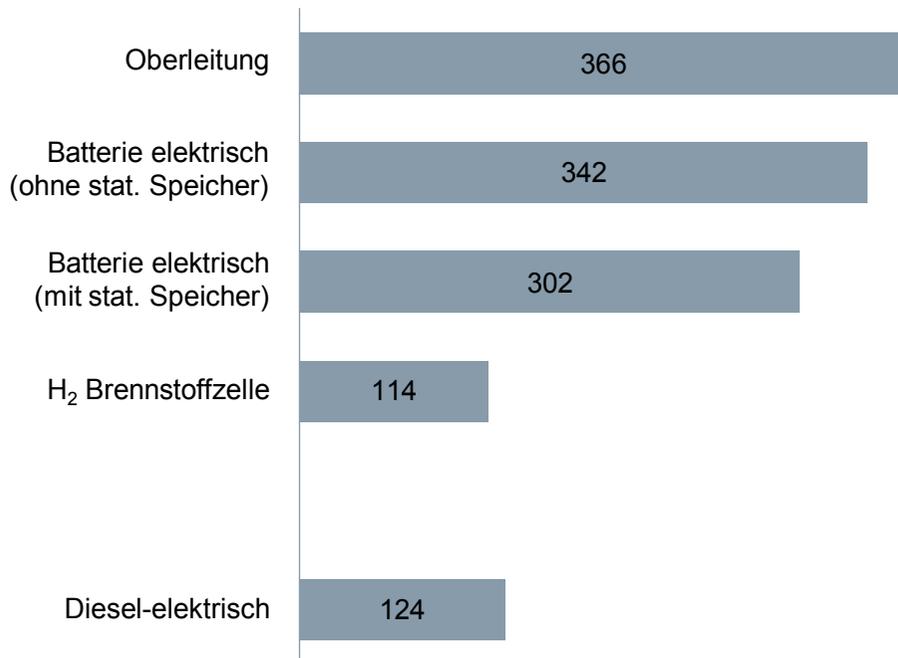
Enthält alle „vorgelagerten“ Verluste ab Primärenergie (Windpark) bzw. ab Rohöl (Dieselherstellung)



MO RS EN PT SD

Motivation – Der Wirkungsgrad ist (nicht) entscheidend

Zug – Kilometer pro MWh Energie

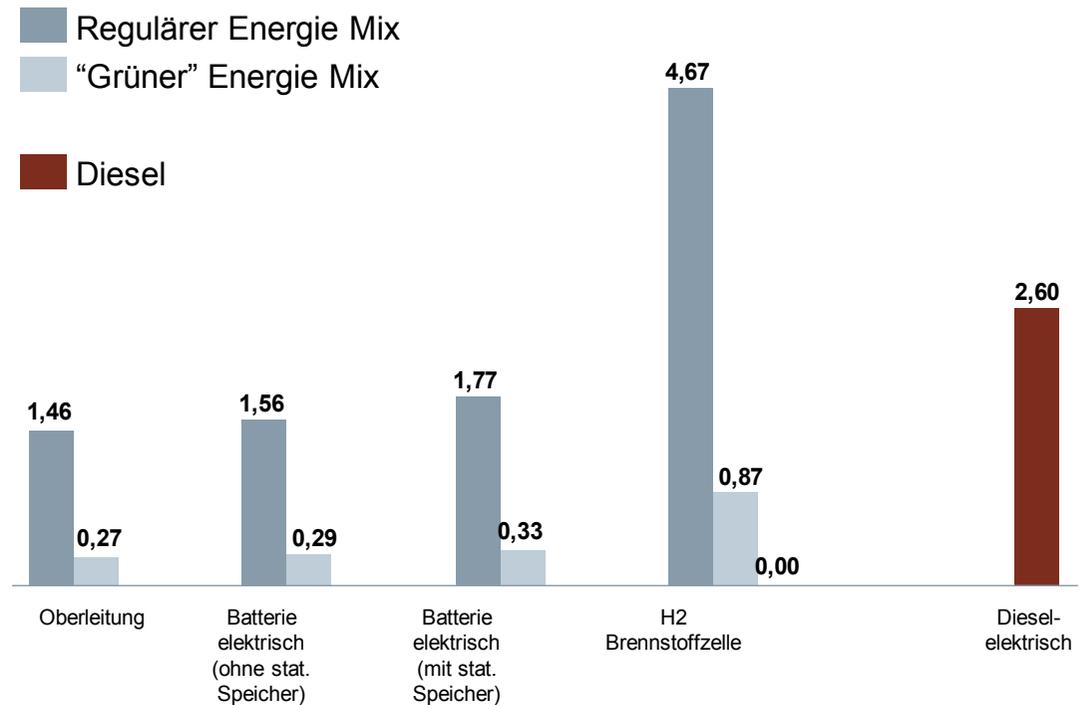


Annahme: modernes zweiteiliges Fahrzeug ohne HKL-Zusatzverbräuche
Enthält alle „vorgelagerten“ Verluste ab Primärenergie (Windpark) bzw. ab Rohöl

Restricted © Siemens AG 2018

CO₂ – Emissionen (kg CO₂ / km)

Green Energy kann zu beinahe 0g/km CO₂ mit H₂ führen



Dieseleratz –

Die Antwort auf zukünftige Herausforderungen im Regionalverkehr

Markt

- Große Teile der Bahnstrecken sind nicht elektrifiziert (40 % in DE)
- Große Kundennachfrage nach Hybridlösungen
- Vermehrte Anfragen zur Ersetzung von Dieseltriebzügen (DMU), die im nächsten Jahrzehnt noch erheblich zunehmen könnten

Politik

- Strengere Emissionsvorschriften (Luftverschmutzung, Lärm und CO₂) machen Alternativen zu Dieseltriebzügen erforderlich
- Die Entwicklung von Hybridantrieben wird mit öffentlichen Geldern gefördert

Mireo Plus – die nächste Generation an Hybridzügen

Produkte/Systeme

- *Die aktuell auf dem Markt verfügbaren Brennstoffzellen werden den Anforderungen der Betreiber hinsichtlich Betriebspläne und Lebenszykluskosten nicht gerecht*
- Benötigt wird ein flexibles Systemdesign für eine Vielzahl von Anwendungen

Ressourcen

- Steigende Preise für Dieselkraftstoff
- Schwankende Netzkapazitäten durch regenerative Stromerzeugung erfordern speicherbasierte Lösungen

Der Mireo Plus B – Batteriegestützter Elektroantrieb

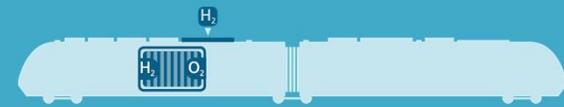


- Skalierbare, schnellladefähige Li-Ion-Batterien für gute Anpassung an die Kundeninfrastruktur
- Laden über Fahrdrabt oder (Zwischen-) Ladestation, volle EMU-Performance unter Fahrdrabt möglich
- Optimal für nichtelektrifizierte Streckenabschnitte bis 80 bzw. 100 km
- 2 Wagenlängen (2-Teiler / 3-Teiler) für unterschiedliche Reichweiten/Anforderungen
 - bis zu 80 km Reichweite: zweiteiliger Zug
 - bis zu 100 km Reichweite: dreiteiliger Zug



Der Mireo Plus H – Brennstoffzellengestützter Elektroantrieb

- Wasserstoffgetriebene Brennstoffzellen mit Vorratstank am Fahrzeugdach
- Tankstationen typischerweise am Anfang und/oder Ende der Strecke
- Optimal für größere Strecken über ~120 km
- 2 Wagenlängen (2-Teiler / 3-Teiler) für unterschiedliche Reichweiten/Anforderungen
 - bis zu 600 km Reichweite: zweiteiliger Zug
 - 800 bis 1.000 km Reichweite: dreiteiliger Zug



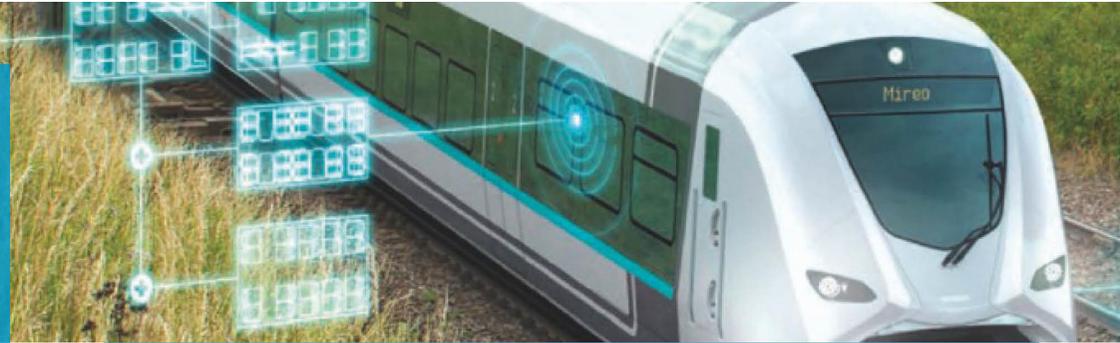
Die Mireo Plus B / H – Familie

Höchste Flexibilität in modularer Bauweise



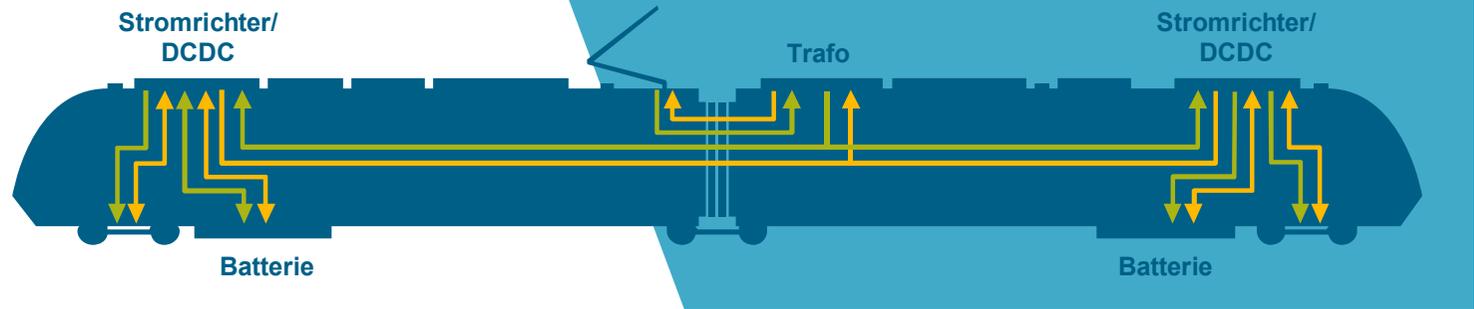
Plattform	Konfiguration	Performance	Streckenklasse	Max. V	Batt. Kapazität						H2 Kapazität								
					1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Mireo Plus B	2-car 120 Sitze	Standard	C (<20 t)	160	80 km														
		Range	C (<20 t)	140	90 km														
		Lightweight	B (<18 t)	140	40 km														
	3 car 165 Sitze	Standard	C (<20 t)	160	100 km														
		Range	C (<20 t)	140	110 km														
		Lightweight	B (<18 t)	140	60 km														
Mireo Plus H	2-car 120 Sitze	Standard	C (<20 t)	160							500 km								
	3 car 165 Sitze	Standard	C (<20 t)	160							800 km								

Der Mireo Plus – Prinzip-Energie-Flussdiagramm



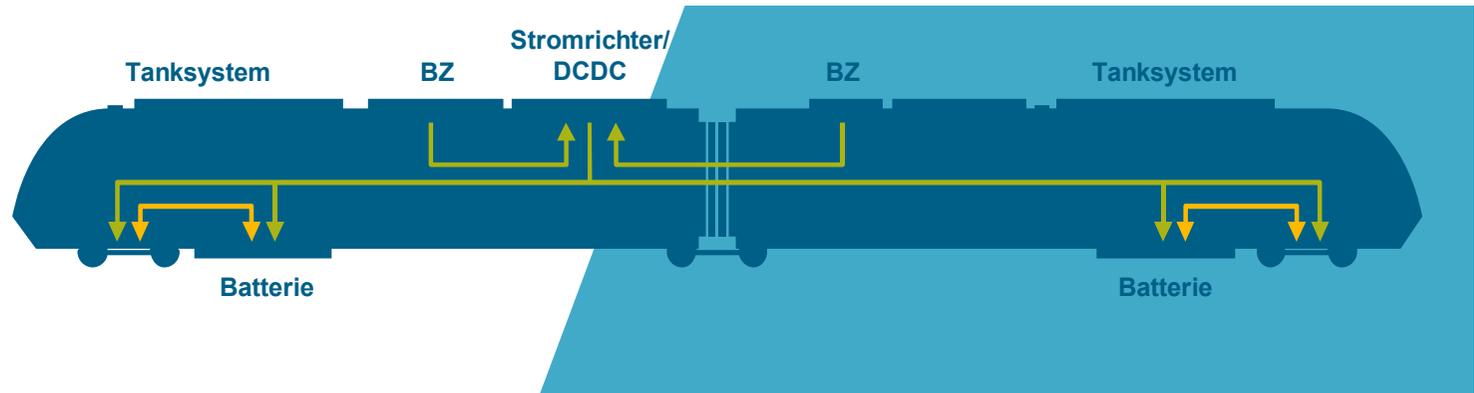
Mireo Plus B

- Entladebetrieb und Rekuperation über Hybridsystem
- Ladebetrieb Hybridsystem



Mireo Plus H

- Entlade/Rekuperation (Bremsen) in Dynamikbatterie
- Ladebetrieb Dynamikbatterie über Brennstoffzelle (BZ) und Betrieb des Zugs



Entwicklungsprojekt – X-EMU

Die Entscheidungsfaktoren für Dieseleratz aus Kundensicht

Heutige Herausforderungen

- Reduktion Energieverbrauch
- Reduktion Wartungskosten
- Reichweite & Leistung
- Flexibilität & Modularität
- Reduktion Umweltbelastung

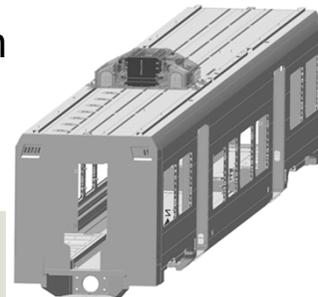


Innovative Konzepte gefordert

- Erhöhung Wirkungsgrade
- Erhöhung Austausch/ Wartungsintervalle
- Erhöhung Traktionsleistung; max. Speicherdichte
- Smarte Integration der Komponenten



→ Das Gesamtsystem muss optimiert werden

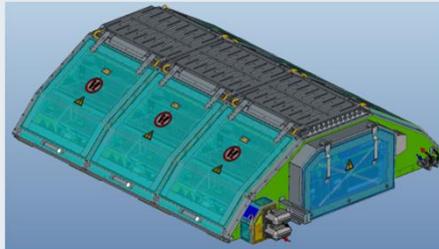


X-EMU = der systemische Ansatz zur Entwicklung und Integration von Brennstoffzellen und Batterien

Mireo Plus H / B – Innovationen

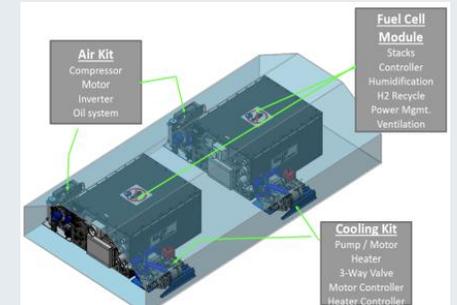
Leistungsstarke Batterien

- Li-Ion Batterie in sicherster Li-Ion-Zellchemie
- Sehr hohe Lebenserwartung
- high-power Laden/Entladen
- Hohe Energiedichte im System



HD8 next Gen Fuel Cell

- 50% höhere Leistungsdichte
- Lebensdauer: ca. 35000h
- 5% Verbesserung im Wirkungsgrad

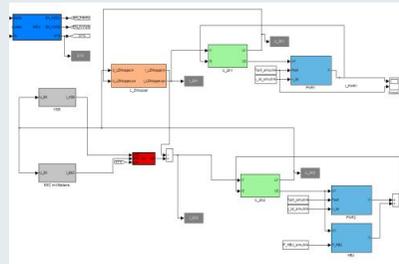


DC – DC Konverter & HBU

- SiC Technologie (kompakter, leichter, bei weniger Verlusten)

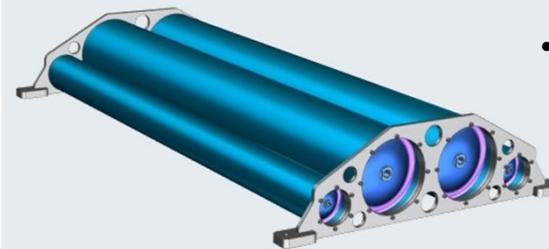
Hybrid Control SW

- Optimierter Betrieb durch prädiktives E- Management
- Energieeinsparung von ~ 5-15%

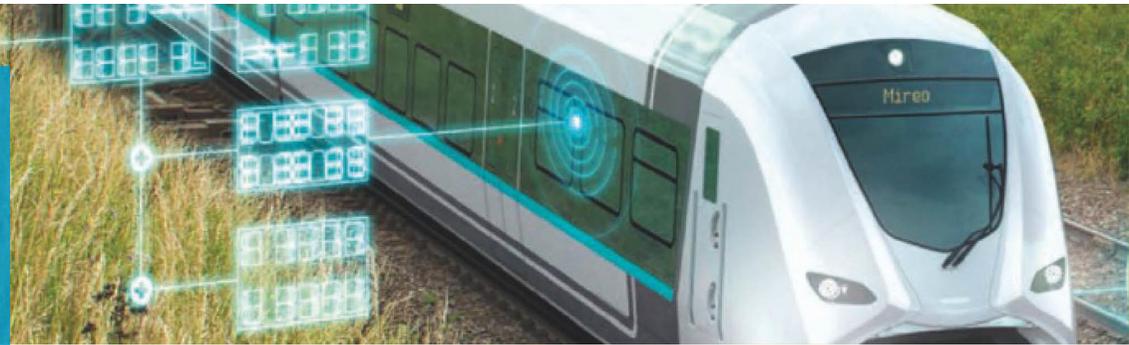


H₂ Speicher

- Modulares Konzept
- +10% Erhöhung der H₂ Menge



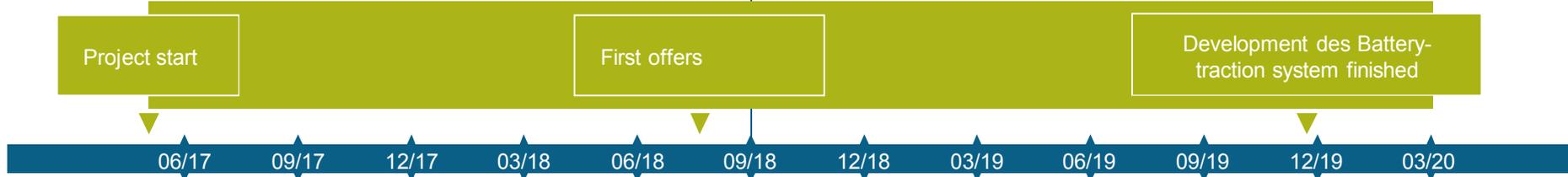
Der Mireo Plus – Entwicklungsphasen und Markteinführung



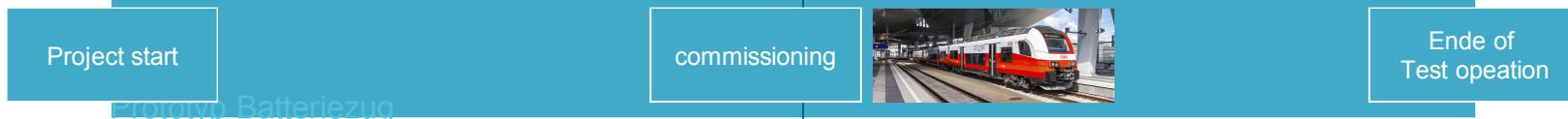
Plattform Entwicklung H²



Plattform Entwicklung Batterie



Erprobung Batteriezug



Innotrans

Prototyping mit ÖBB

Cityjet eco – Innotrans Sept. 2018



Prototyping mit ÖBB

Cityjet eco – Innotrans Sept. 2018



Prototyping mit ÖBB

Cityjet eco – Innotrans Sept. 2018



Restricted © Siemens Mobility GmbH 2018



Peter Eckert
Teamleitung Wasserstoff-Hybridsysteme

MO RS EN PT SD

Werner-von-Siemens-Str. 67
91052 Erlangen, Germany

Tel.: +49 (172) 1088680

E-Mail:

michael.goerner@siemens.com

[siemens.com/mobility](https://www.siemens.com/mobility)