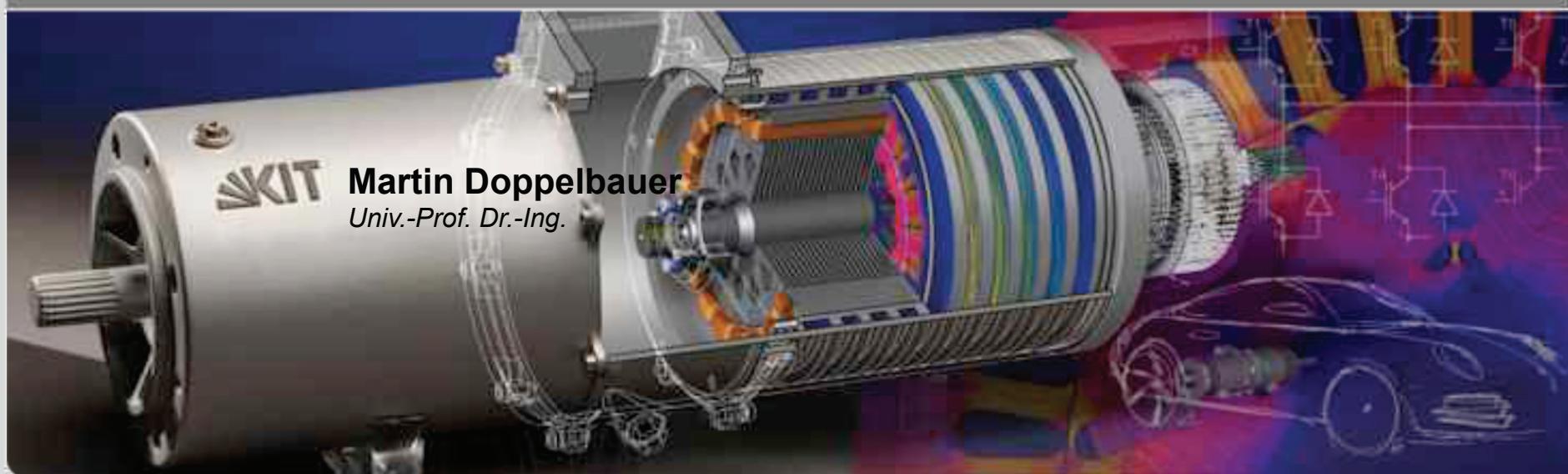


Grüner wird's nicht!

Unsere Umwelt und die Zukunft des elektrischen Automobils

Elektrotechnisches Institut (ETI) – Professur für Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV)



KIT = Technische Universität Karlsruhe + Forschungszentrum Karlsruhe

Starke Lehre: 364 Professoren

Wissenschaftlicher Nachwuchs: 3200 Doktoranden

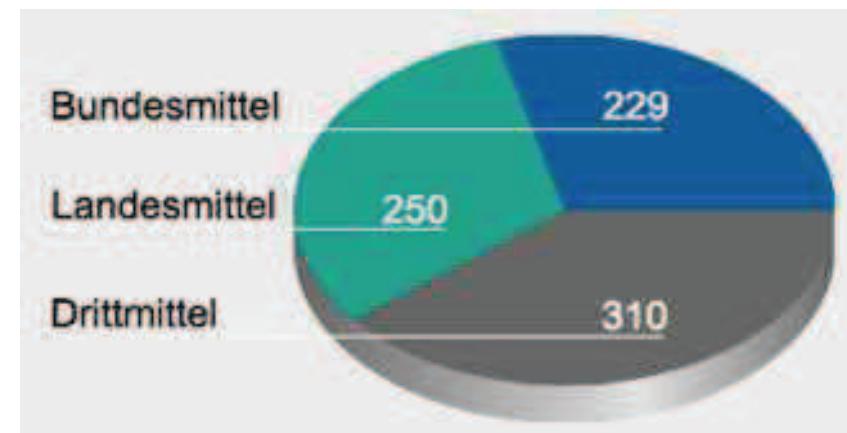
International attraktiv: 844 Ausländische Wissenschaftler

Exzellente Ausbildung: 445 Auszubildende

23.836 Studierende

Stand 2012

Einnahmen in Mio. € (2011)	
Bundesmittel	229
Landesmittel	250
Drittmittel	310



Das Elektrotechnische Institut (ETI) am KIT



Engelbert Arnold
(Institutsgründung 1895)



Maschinensaal um 1899

- Kooperation mit OEMs, Industrie und Forschungseinrichtungen
- Entwicklung, Bau und Erprobung von Leistungselektronik bis 250 KW
- Entwicklung, Bau und Erprobung von Elektromotoren bis 200 kW / 30.000 /min

Das Elektrotechnische Institut (ETI) am KIT



Prof. Dr.-Ing.
Michael Braun

*Elektrische Antriebe und
Leistungselektronik*

Tel.: +49 (721) 608-42472
Michael.Braun@kit.edu
Campus Süd, Geb. 11.10
Raum 111



Prof. Dr.-Ing.
Martin Doppelbauer

*Professur für
Hybridelektrische Fahrzeuge*
Tel.: +49 (721) 608-46250
Martin.Doppelbauer@kit.edu
Campus Süd, Geb. 11.10
Raum 114

- Stromrichter-Systemtechnik
- Modulare Multilevel-Umrichter
- Neuartige Umrichtertopologien
- Maschinenregelung
- Elektromagnetische Motorauslegung
- Mechanische Auslegung / Konstruktion
- Industrielle und automobile Antriebssysteme
- Hybride und vollelektrische Fahrzeuge

Historie Elektrofahrzeuge

1896 bis 1912: Die große Zeit der Elektroautos

- 1834 Bau des ersten **Elektromotors** (Moritz Hermann Jacobi in Königsberg)
- 1842 Erste Versuche mit **elektrischen Bahnen** (Robert Davidson in Glasgow)
- 1859 Erfindung des aufladbaren **Blei-Akkus** (Gaston Planté in Paris)
- 1881 Erstes **batteriebetriebene Elektroauto** (Gustave Trouvé in Paris)
- 1900 Erstes **Elektroauto** in Deutschland (Lohner-Porsche)
- 1901 Erstes **Hyridauto** mit Range-Extender (ebenfalls von Porsche)



Trouve Tricycle

Quelle: Wikipedia



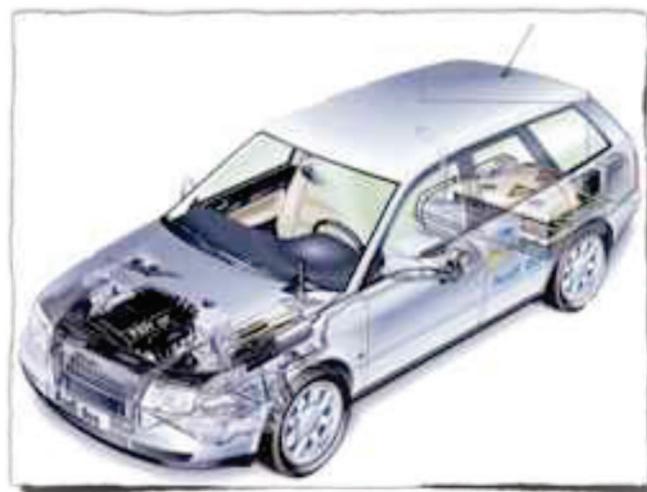
Allrad Lohner-Porsche

Quelle: Porsche

Moderne Elektrofahrzeuge

1990 bis heute: Renaissance einer cleveren Idee

- 1990 Erlassen des **Clean Air Act** in Kalifornien
- 1991 Sony bringt die **Lithium-Ionen Batterie** auf den Markt (für Videokameras)
- 1995 City-STROMer von VW auf Basis Golf III mit Bleibatterie
- 1997 **Toyota Prius** geht in Serie
- 2006 **Tesla** stellt den **Roadster** vor (lieferbar ab 2008)
- 2008 **Honda** bringt mit dem **FCX Clarity** das erste Brennstoffzellenauto in Serie
- 2009 **Mitsubishi** stellt mit dem **i-MIEV** das erste moderne Serien-Elektroauto vor
- 2010 **General Motors** stellt den **Chevrolet Volt** vor (Opel Ampera folgt 2011)
- 2012/13 **Renault** bringt eine Flotte von vier kostengünstigen Serien-Elektroautos
- 2014 Viele weitere Serienfahrzeuge von Europäischen Herstellern folgen



Quelle: Audi AG



Quelle: Renault

Fünf Fragen

1 Technik – Wie funktioniert ein Elektroauto ?

2 Praxis – Wie gehen wir damit um ?

3 Energie – Woher kommt der ganze Strom ?

4 Ökonomie – Was kostet uns das ?

5 Ökologie – Was bringt das für die Umwelt ?

Fünf Fragen

1 Technik – Wie funktioniert ein Elektroauto ?

2 Praxis – Wie gehen wir damit um ?

3 Energie – Woher kommt der ganze Strom ?

4 Ökonomie – Was kostet uns das ?

5 Ökologie – Was bringt das für die Umwelt ?

Energie [kW·h]

Wie weit kann man fahren?

Leistung [kW]

Wie schnell kann man fahren?

Mit **elektrischer Energie** kommt man rund **2 ... 3 -fach weiter** als mit **thermischer Energie** (Verbrennungskraftmaschinen), weil der Wirkungsgrad des E-Motors viel höher ist !

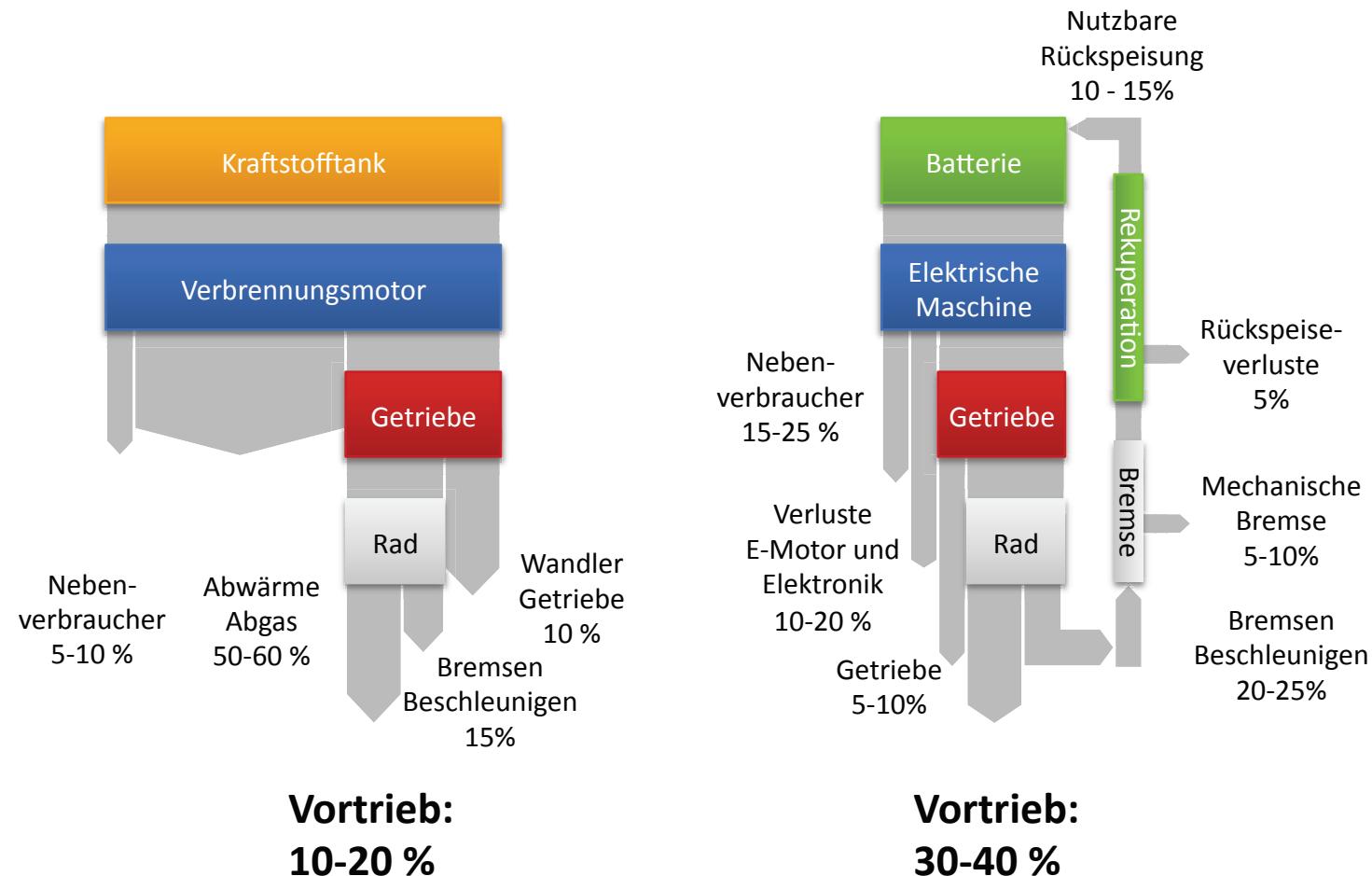
Richtwerte für **100 km Reichweite**:

- Benzin/Diesel: **5 l** (entspricht ca. 50 kWh)
(Brennwert 1 l Kraftstoff ca. 10 kWh)
- Elektrisch: **20 kWh Strom** (netto)
(oft wird die Kapazität einer Batterie nicht voll genutzt, um die Lebensdauer zu erhöhen)

Gelegentlich liest man von „kW/h“. Diese Einheit existiert physikalisch nicht. Gemeint sind „kW·h“.

Energieverbrauch und Verluste

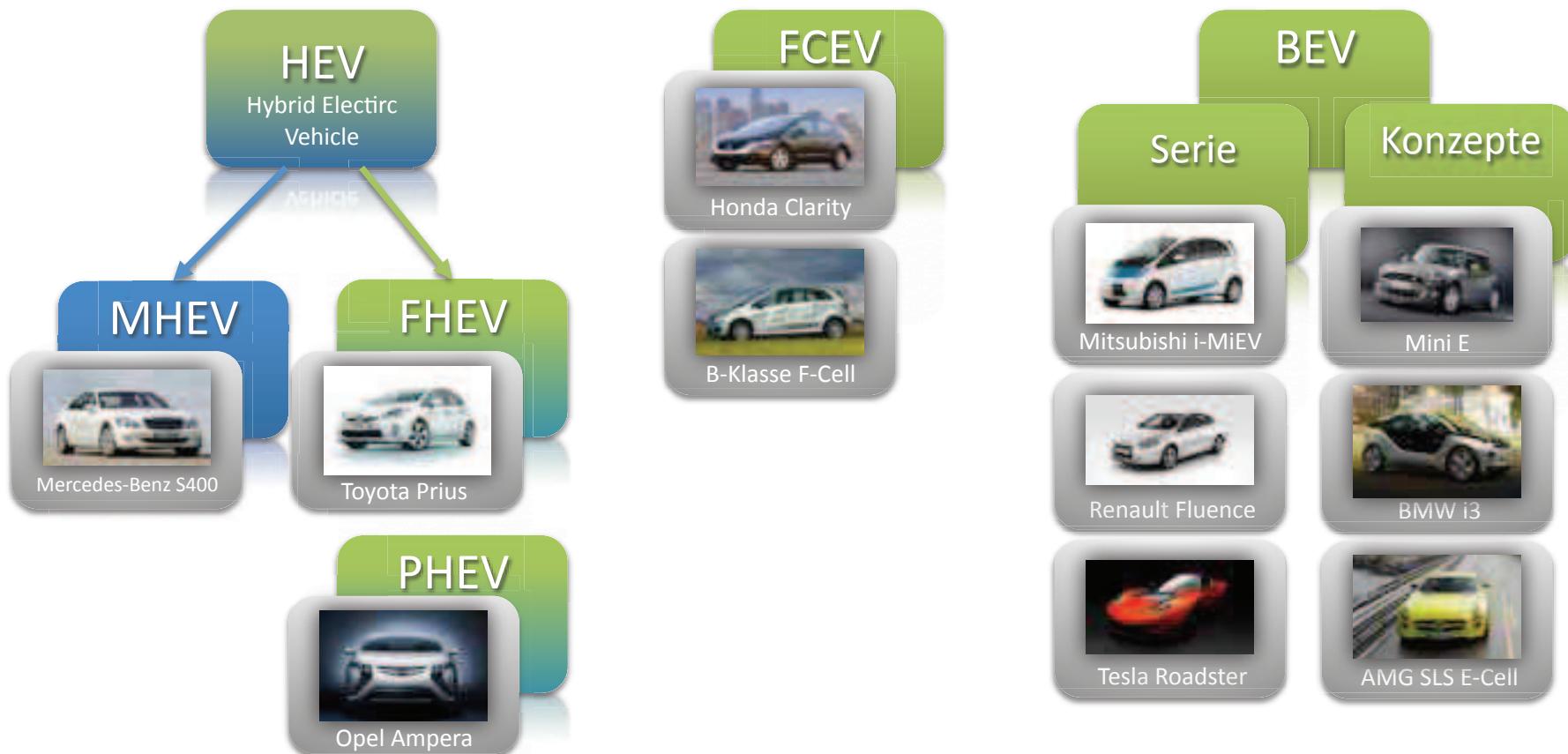
Wirkungsgradbilanz



Normierung der Abbildungen auf gleichen Vortrieb (absolut).
Alle %-Werte sind Prozentpunkte von 100% Kraftstoff/Batterie.

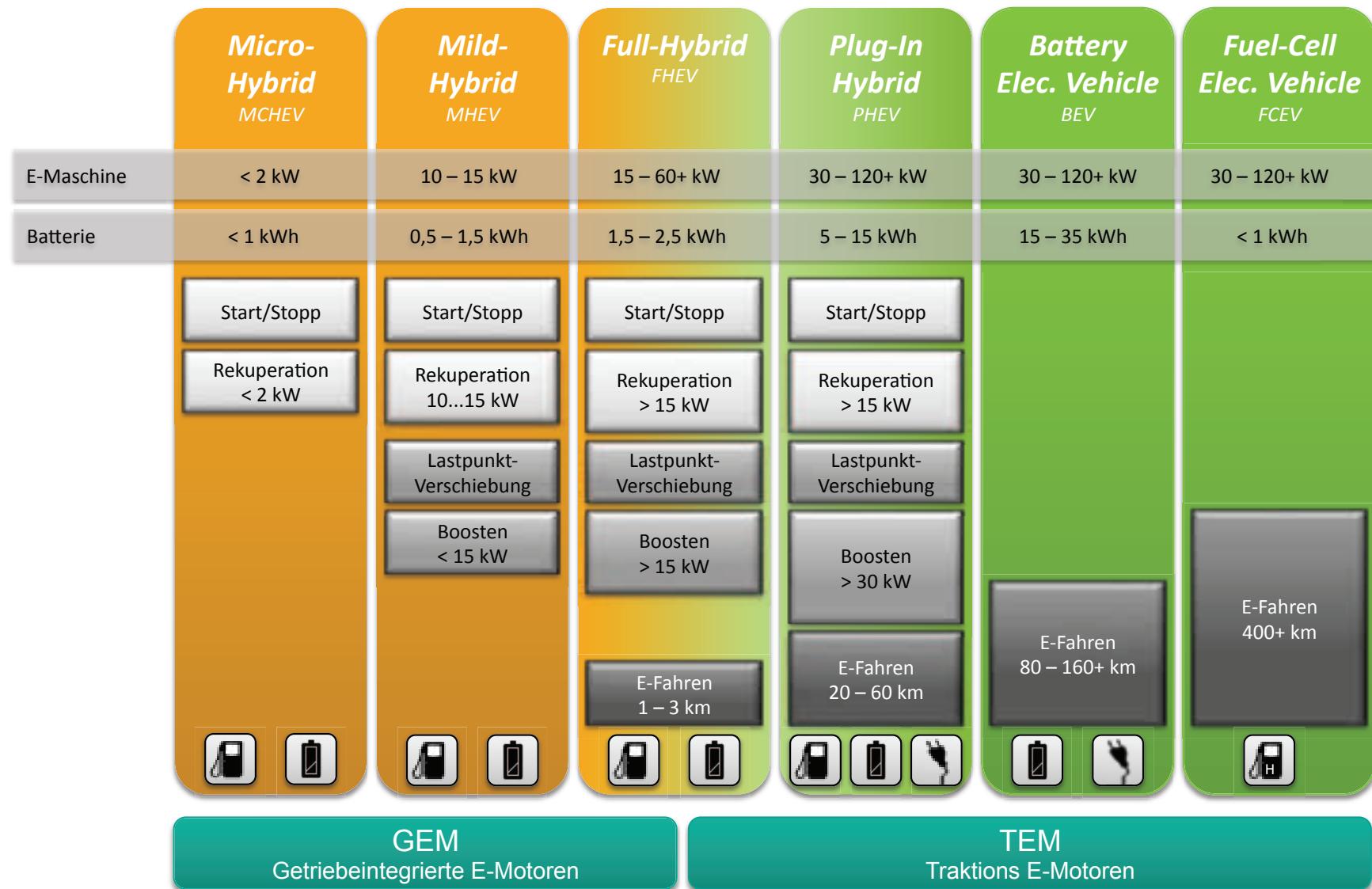
Hybride und Elektrofahrzeuge

Kategorien



Hybride und Elektrofahrzeuge

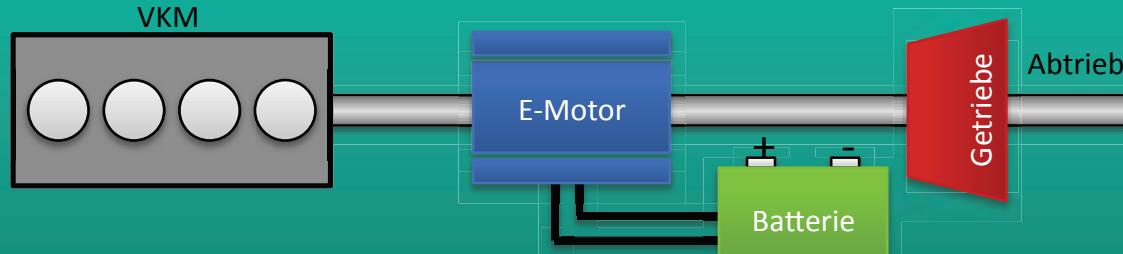
Kategorien und Funktionen



Hybridantriebe (HEV) Varianten

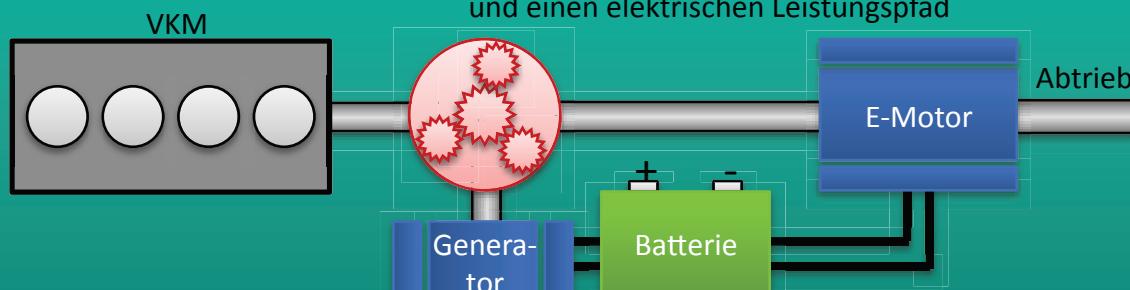
Paralleler Hybridantrieb

Direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor zum Rad



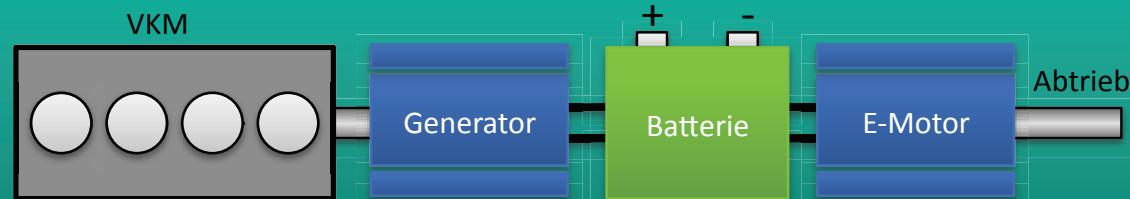
Leistungsverzweigter Hybridantrieb

Die mechanische Leistung wird aufgeteilt in einen mechanischen und einen elektrischen Leistungspfad



Serieller Hybridantrieb

kein mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor zum Rad



Antriebsanordnung und Hybridfunktionen

		Hybridisierungsgrad			
		MCHEV	MHEV	FHEV	PHEV
Antriebsanordnung	Parallel	✓	✓	✓	
	Zugkraft-addition	✗	✗	✓	
Seriell		✗	✗	✗	✓
Leistungsverzweigt	One Mode	✗	✗	✓	✓
	Two Mode	✗	✗	✓	

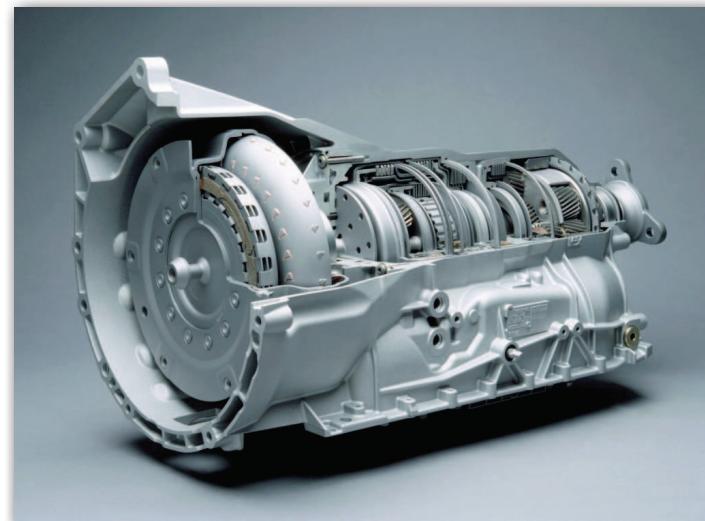
Elektroauto (BEV) und Traktionsmotoren (TEM)

Getriebe

Elektromotor = Drehmoment ab Drehzahl Null

- Keine Kupplung, keine Gangschaltung
- nur ein einfaches, kompaktes Getriebe mit hohem Wirkungsgrad (> 95%)

Anstelle eines komplexen, schaltbaren Getriebes ...



... reicht ein einfaches Stirnrad (oder Planetengetriebe) mit Differential



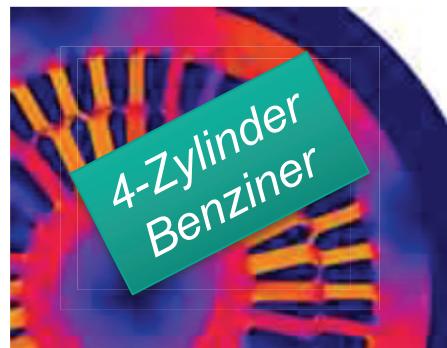
Quelle: BMW AG, Robert McNeil & Associates

E-Motoren für Elektrofahrzeuge

Heute und in Zukunft

ASM

Asynchronmotor



PMSM

Permanentmagnet
Synchronmaschine



FESM

Fremderregte
Synchronmaschine



TFM

Transversalflussmotor



AFM

Axialflussmotor

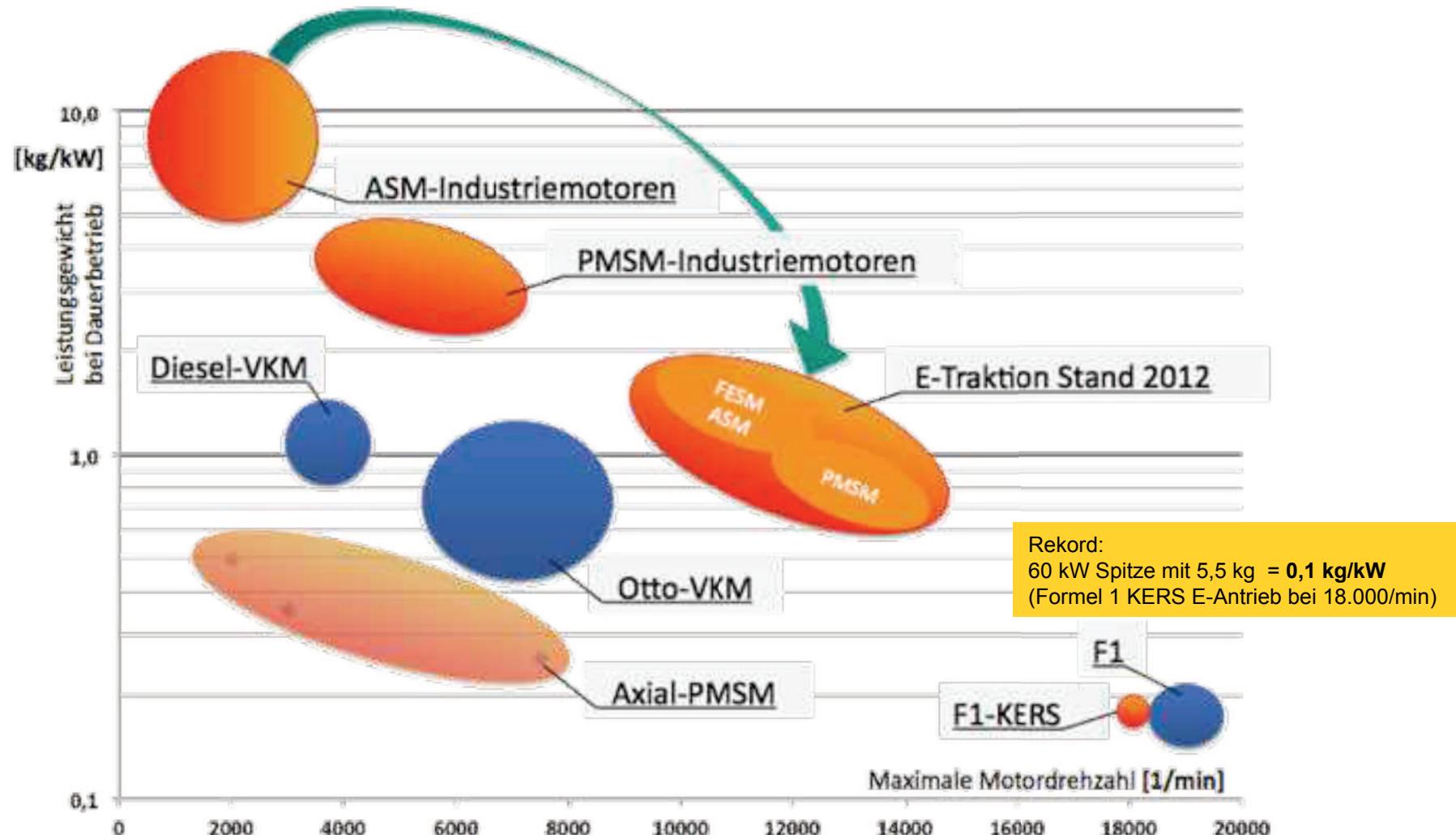


SRM

Geschaltete
Reluktanzmaschine



Leistungsgewicht VKM und E-Motoren

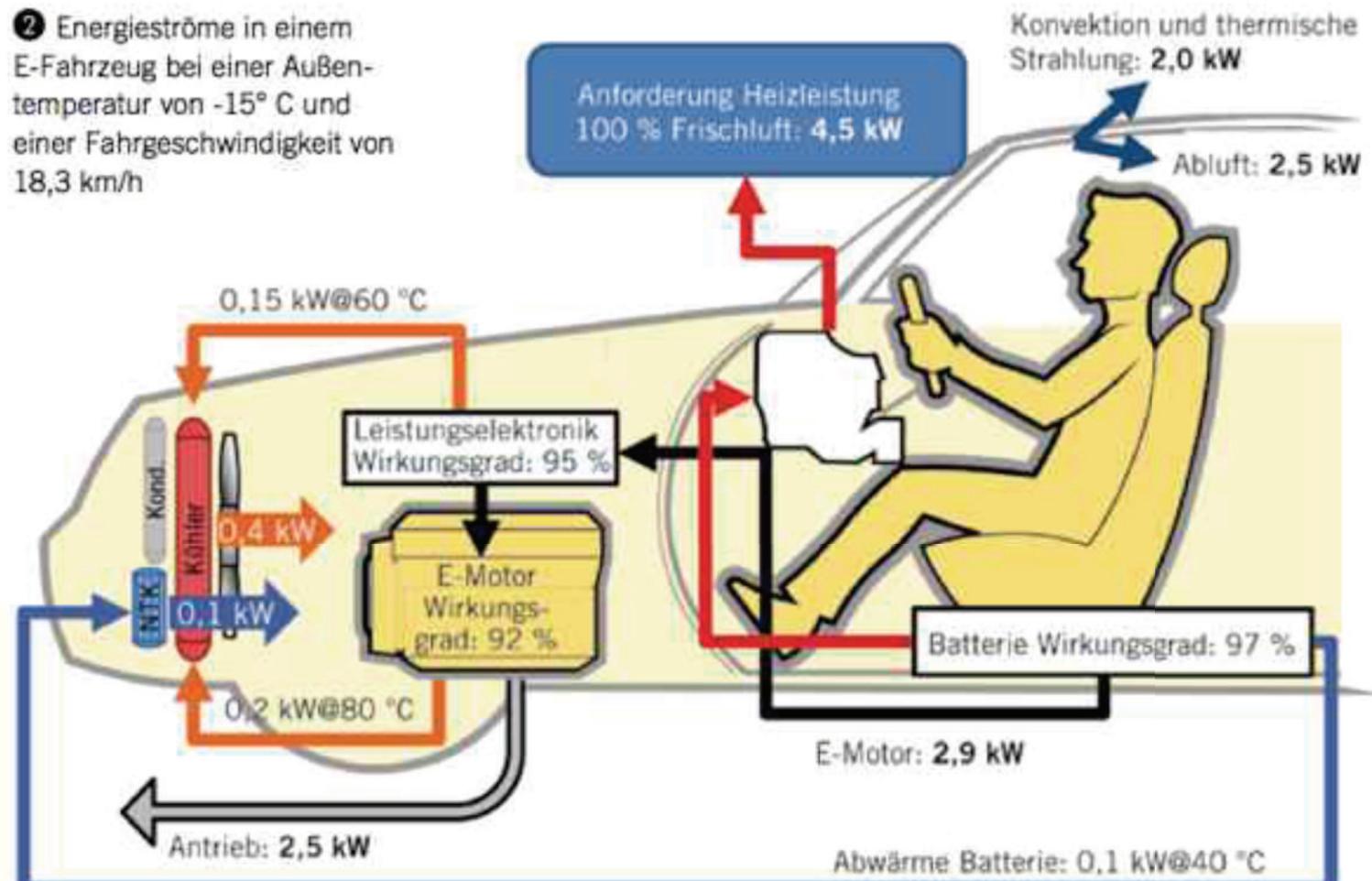


Alle Angaben für Dauerbetrieb / Dauerleistung; Spitzenleistung je nach Leistungselektronik ca. 1,5 ... 3-fach höher

Klimatisierung

Winter / Stadtfahrt

② Energieströme in einem E-Fahrzeug bei einer Außen-temperatur von -15°C und einer Fahrgeschwindigkeit von 18,3 km/h



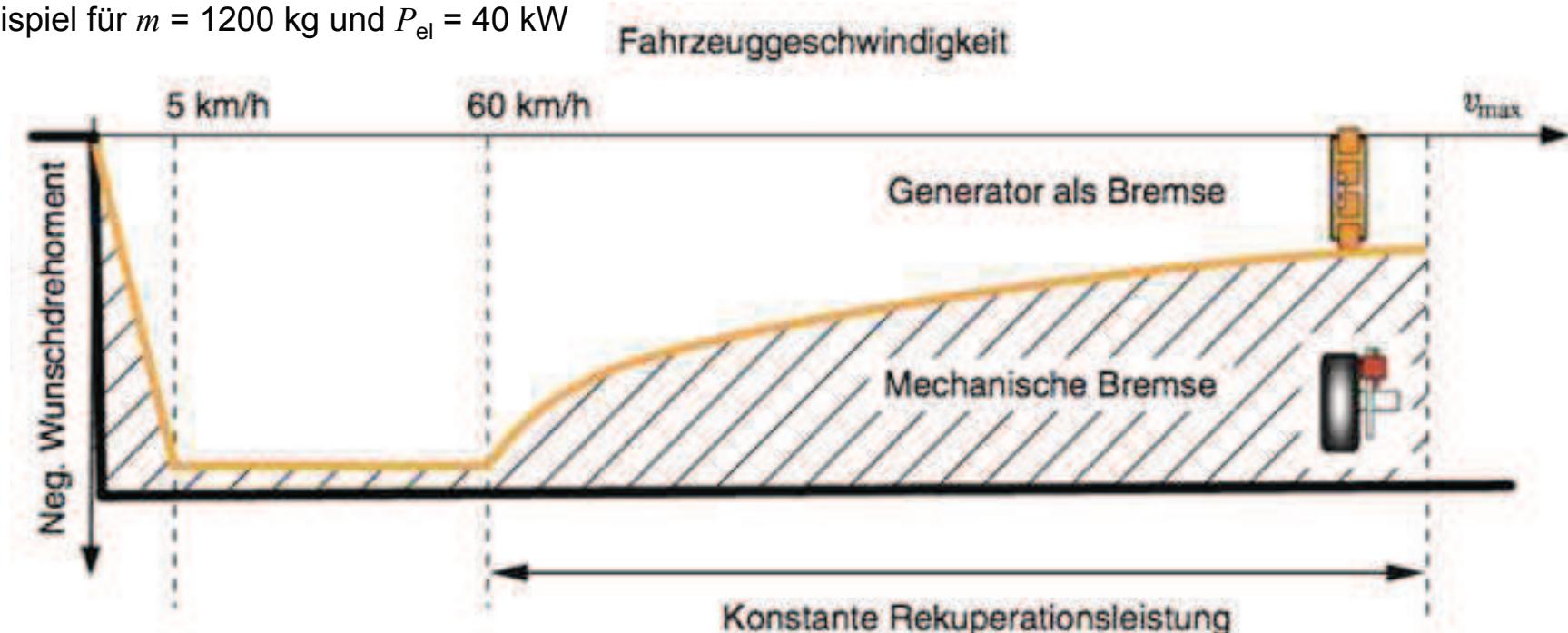
NTK: Niedertemperaturkühler; Kond.: Kondensator

Quelle: Jung, Kemle, Strauss, Wawzyniak, *Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, ATZ 05/2011, S. 397-401

Energierückgewinnung / Rekuperation

Beim Bremsen / Bergabfahrt

Beispiel für $m = 1200 \text{ kg}$ und $P_{\text{el}} = 40 \text{ kW}$

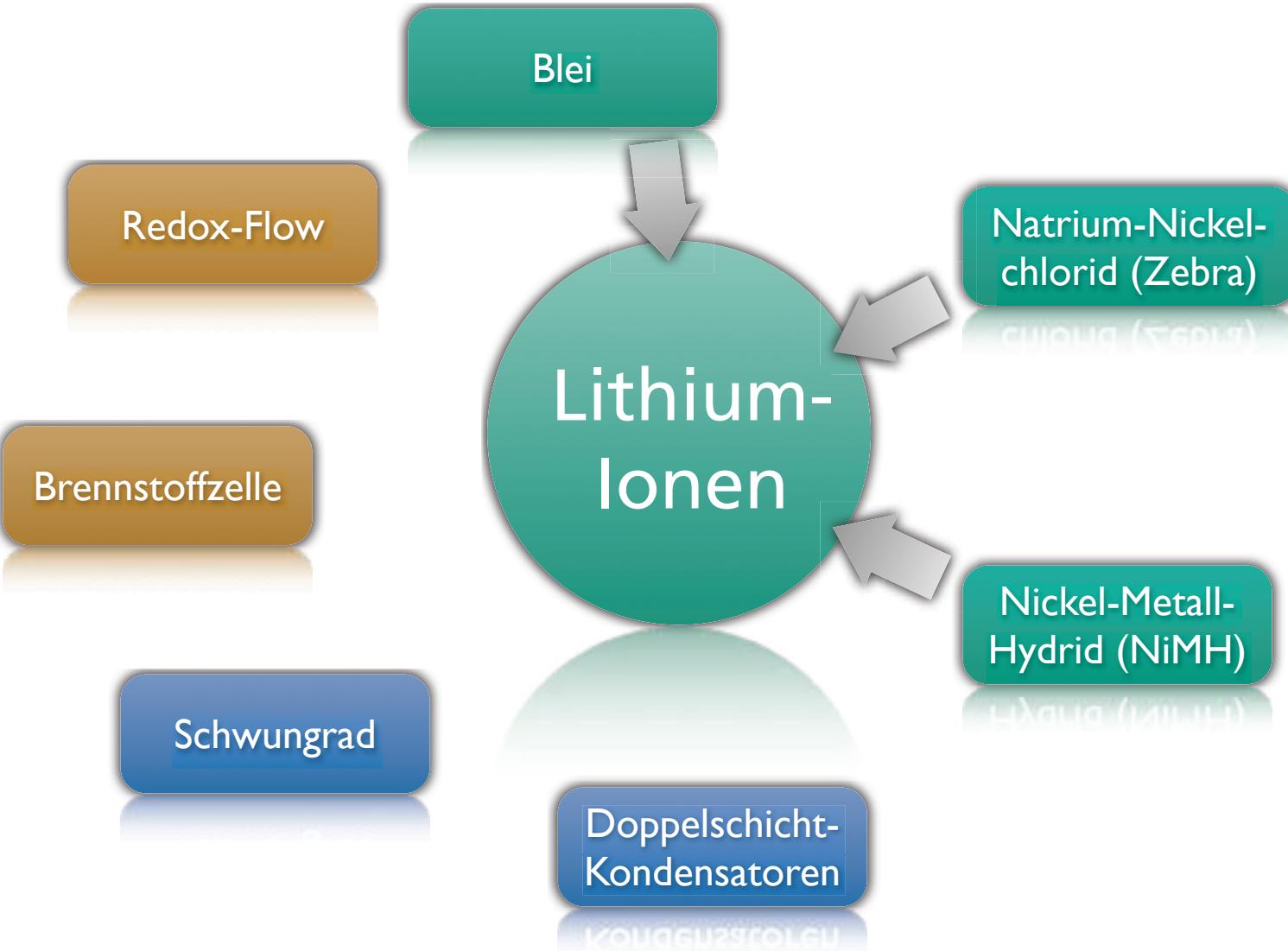


- **> 60 km/h:**
Mechanische Bremse zusätzlich zum Generator, da Generator durch maximale Leistung begrenzt
- **5 ... 60 km/h:**
Bremsmoment vollständig vom Generator aufgebracht und rekuperiert.
- **< 5 km/h:**
Mechanische Leistung zu gering, um Verluste des Generators zu decken.

Im Realbetrieb kann man ca. **5 ... 10% der Energie durch Rekuperation zurückgewinnen.**

Quelle: K. Reif, Kraftfahrzeug-Hybridantriebe, Springer Vieweg, 2012

Speichertechnologie



Vergleich Speichersysteme

500 km Reichweite



Quelle: Opel AG

Zusammenfassung

Technik



Große Vielfalt unterschiedlicher Hybrid- und Elektrokonzepte.

Große Vielfalt unterschiedlicher Elektromotoren.

Getriebe ist auch bei reinen E-Antrieben sinnvoll
(aber einfach, nicht-schaltbar).

Die Kosten von Batterien werden durch
Massenproduktion weiterhin deutlich sinken.

Energiedicht, Lebensdauer und Sicherheit von
Batterien verbessert sich auf absehbare Zeit

Fünf Fragen

1 Technik – Wie funktioniert ein Elektroauto ?

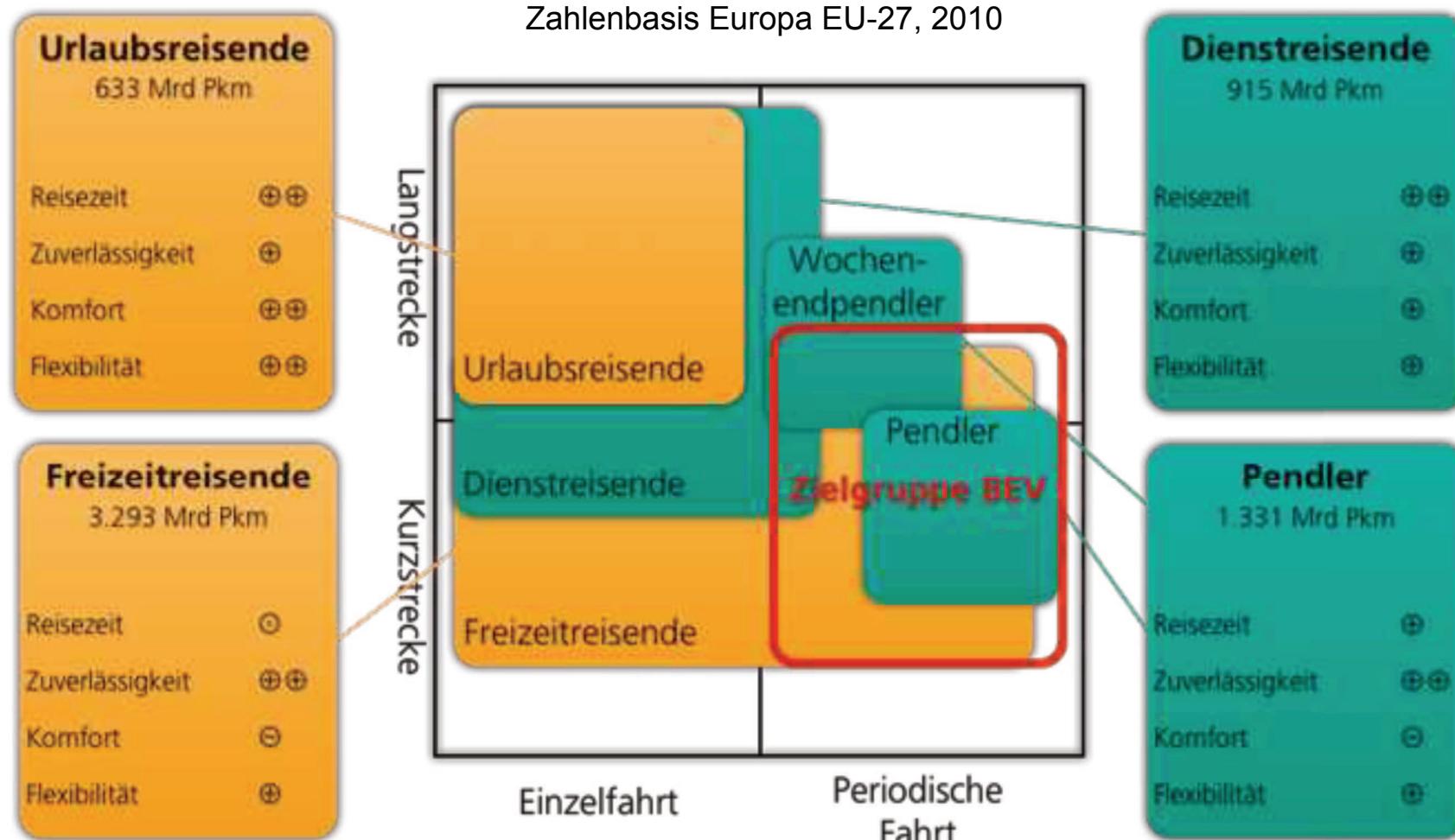
2 Praxis – Wie gehen wir damit um ?

3 Energie – Woher kommt der ganze Strom ?

4 Ökonomie – Was kostet uns das ?

5 Ökologie – Was bringt das für die Umwelt ?

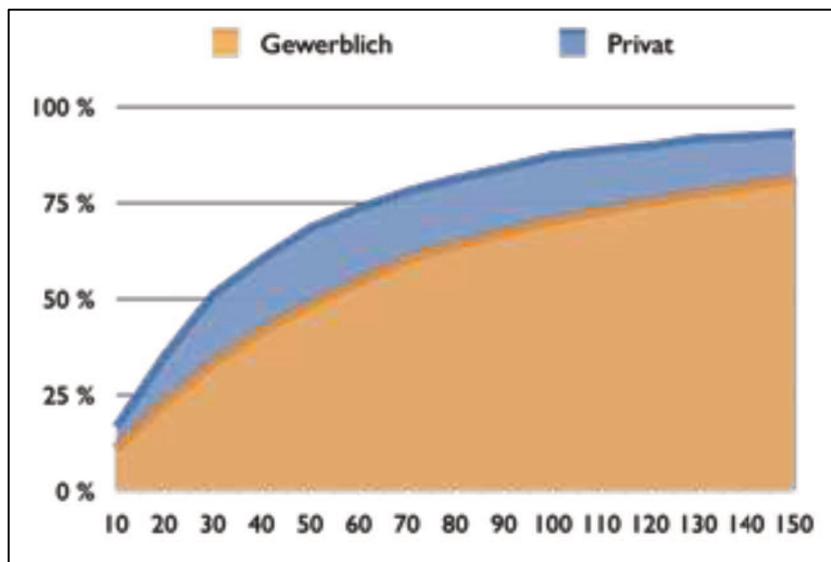
Segmentierung der Mobilität



Quelle: PriceWaterhouseCooper 2010

Anforderungen an die Mobilität Heute und in Zukunft

Kumulierte tägliche Fahrzeugleistung in km in DL



Weltbevölkerung in Mrd. Einwohner



100 km Reichweite

- ... reichen für **87%** aller privaten und
- ... **70%** aller gewerblichen Fahrleistungen

150 km Reichweite

- ... reichen für **93%** aller privaten und
- ... **81%** aller gewerblichen Fahrleistungen

Wenn über den Tag zusätzlich geladen werden kann (Firmenparkplatz, Taxi-Stand, ...), sind mit **150 km Reichweite** sogar über **98% aller Fahrten** abgedeckt.

Megacities (Ballungsräume)

Heute schon **30 Ballungsräume** mit über **10 Mio. Einwohnern**. An der Spitze Tokio mit fast 40 Mio. Einwohnern. In DL „Rhein-Ruhr“ mit 10 Mio. Einwohnern.

Immer mehr Menschen werden in Megacities leben. Seit 2007 leben weltweit mehr Menschen in Städten als auf dem Land.

Elektroauto ist ideales Stadtfahrzeug (soweit nicht öffentliche Verkehrsmittel genutzt werden).

Quelle: VDE Studie Elektrofahrzeuge 2010, Wikipedia, UN 2009

Range Extender ?



Quelle: AC Propulsion / Genset Trailer

Range Extender !



GAS ENGINE



NO GAS ENGINE

Quelle: BMW AG

Induktives Laden auf der Autobahn



Vision:

Nachladen während der Fahrt auf einer separaten Fahrspur.
Speisung durch Wind- und Sonnenkraftwerke entlang der Autobahn.

Quellen: Institution of Mechanical Engineers; Conductix Wampfler; Schraven, *Techno-ökonomische Bewertung induktiver Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge*, Fraunhofer ISI, 2010

Induktives Laden schon heute

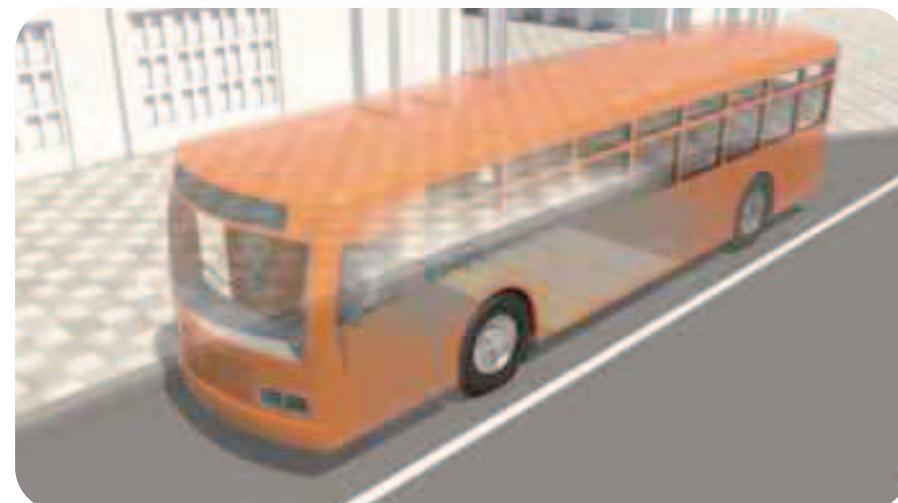
Vorteile

- Hoher Komfort (Anstecken des Kabels entfällt, kein Eingriff des Fahrzeugnutzers; Laden erfolgt bedarfsgesteuert automatisch).
- Kein Ladekabel, kein Ladegerät.
- Ermöglicht häufiges „flaches“ Laden (Ampeln, Taxistopps).
- Hohe Sicherheit (Schutz vor Vandalismus und Witterungseinflüssen) und Ästhetik (keine Säulen und Kabel).



Nachteile

- Übertragungsverluste zwischen 10 bis 20%.
- Keine Rückspeisung von Energie in das Netz (zur Stabilisierung).
- Systemkosten höher als mit konventionellen Lösungen.



Quelle: Conductix-Wampfler GmbH

Konduktives Laden an der Steckdose

Zu Hause	Tankstelle				
Privat	Öffentlich Deutschlandweit 1741 Ladestationen mit 4649 Anschlüssen (Oktober 2013, de.chargemap.com)				
Separates Ladegerät im Auto oder Dual-Use der vorhandenen Leistungselektronik			Ladegerät in der Zapfsäule		
AC 230 V / 13 A	AC 400 V / 16 A	AC 400 V / 32 A	AC 400 V / 63 A	DC Laden (Mid)	DC Laden (High)
3 kW	11 kW	22 kW	43 kW	50 kW	72 kW
2,6 kW netto (0,22 km/min)	9,5 kW netto (0,8 km/min)	19 kW netto (1,6 km/min)	37,5 kW netto (3,1 km/min)	45 kW netto (3,8 km/min)	65 kW netto (5,4 km/min)



Ladezeit für 20 kWh (rund 100 km Reichweite, Annahme cos phi = 1.0, Ladewirkungsgrad = 0.86):

8 h

2 h

1 h

> 30 min

< 30 min

< 20 min

Konduktives Laden an der Steckdose

	Langsam-Laden (unter 8 kW; über Nacht)			Normal-Laden (11 oder 22 kW; 1 - 2 h)		Schnell-Laden (ab 40 kW; ½ h)		
	zu Hause (Schuko)	zu Hause (Wallbox)	EU-Norm AC-Säule	zu Hause (Wallbox)	EU-Norm AC-Säule	EU-Norm AC-Säule	EU-Norm DC-Säule*	CHAdeMO DC-Säule**
Ladepunkte EU	-	-	> 18.000	-	> 18.000	22	36	> 1.000
Ladepunkte DL	-	-	> 2.200	-	> 2.200	6	20	47
Nissan Leaf	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Opel Ampera	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Tesla Model S	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Renault Zoe	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Smart ED	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
VW e-up!	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
VW e-Golf	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
BMW i3	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Quellen: <http://www.goingelectric.de/stromtankstellen/Deutschland/> <http://plugfinder.de> <http://de.chargemap.com>

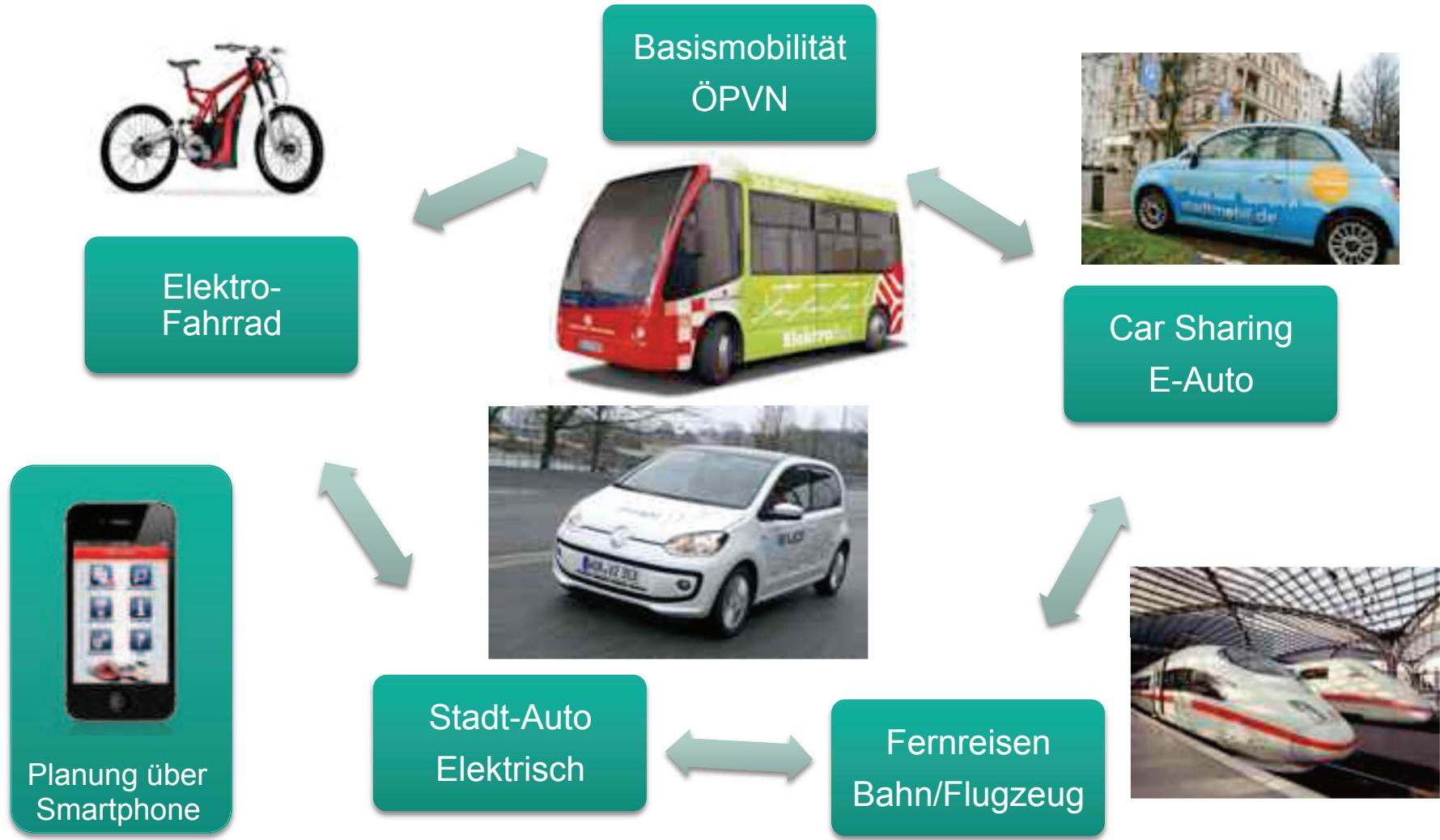
Stand: 03/2014

✓ Serie

✗ Zubehör / Extra

Multimodale Mobilität

Langfristig müssen wir uns vom Konzept „Ein Auto für alle Fälle“ verabschieden!



Zusammenfassung

Praxis

Reine E-Fahrzeuge geeignet für Kurz- und Mittelstrecken (Reichweiten um 150 km).

Serielle Hybride (Range Extender) sind universell einsetzbar, aber recht teuer.

Laden von E-Fahrzeugen erfolgt typisch zu Hause (über Nacht) oder am Arbeitsplatz – beides langsam (3 kW Klasse).

Schnell-Ladesäulen setzen sich nicht durch (wenig praktischer Nutzen, außerdem Batterieschädigung).

Induktives Laden ist technologisch ausgereift und für kommerzielle Anwendungen (Bus, Taxi) sinnvoll.

Fünf Fragen

1 Technik – Wie funktioniert ein Elektroauto ?

2 Praxis – Wie gehen wir damit um ?

3 Energie – Woher kommt der ganze Strom ?

4 Ökonomie – Was kostet uns das ?

5 Ökologie – Was bringt das für die Umwelt ?

Stromverbrauch Elektroautos

Zahlenspiel

Ziel der Bundesregierung: Eine Million E-Autos bis 2020

	Realistisch-optimistisches Szenario (Basis Shell Studie)		Grenzbetrachtung (alle PKW elektrisch)
	2020	2030	2011
Anzahl BEVs	615 Tsd	2,1 Mio	42 Mio
Fahrstrecke pro BEV pro Jahr	5.000 km	7.000 km	13.500 km
Anzahl HEVs	2,7 Mio	11 Mio	-
Fahrstrecke pro PHEV pro Jahr	9.000 km	11.000 km	-
Energiebedarf	3 TWh	15 TWh	113 TWh

Angenommener mittlerer Energieverbrauch: 20 kWh/100 km (Grid to Wheel).
HEVs fahren angenommen die Hälfte der Fahrstrecke rein elektrisch.