PKW 2.0
Das Auto wird neu erfunden

Ja, wir könnten jetzt was gegen den Klimawandel tun.
Aber wenn wir dann in 50 Jahren feststellen, dass sich alle Wissenschaftler vertan haben und es gar keine Klimaerwärmung gibt, dann hätten wir völlig ohne Grund dafür gesorgt, dass man in den Städten die Luft wieder atmen kann, dass die Flüsse nicht mehr giftig sind, dass Autos weder Krach machen, noch stinken, und dass wir nicht mehr abhängig sind von Diktatoren und deren Ölvorkommen.

DA WÜRDEN WIR UNS ABER SCHÖN ÄRGERN!

(Mark-Uwe Kling, Kabarettist)

Karlsruher Institut für Technologie

Elektrotechnisches Institut

Hybrid Electric Vehicles

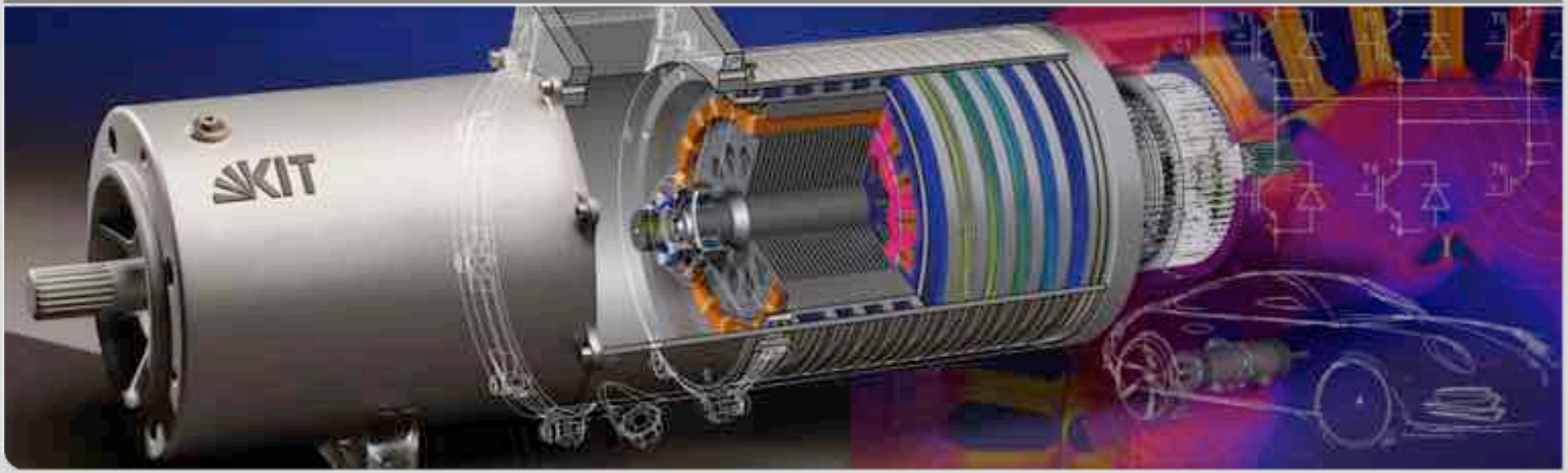
„Das Auto ist fertig entwickelt. Was kann noch kommen?“
Carl Friedrich Benz, 1920

PKW 2.0
Das Auto wird neu erfunden

Martin Doppelbauer
Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Stand 03/2020

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



Das Elektrotechnische Institut (ETI)

Das Elektrotechnische Institut (ETI)

Prof. Dr.-Ing.
Michael Braun

Elektrische Antriebe und Leistungselektronik (EAL)

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

- Stromrichter-Systemtechnik
- Modulare Multilevel-Umrichter
- Neuartige Umrichtertopologien
- Maschinenregelung

Prof. Dr.-Ing.
Martin Doppelbauer

Professur für Hybride Elektrische Fahrzeuge (HEV)

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

- Elektromagnetische Motorauslegung
- Mechanische Auslegung / Konstruktion
- Antriebssysteme
- Antriebe für elektrische Fahrzeuge

Prof. Dr.-Ing.
Marc Hiller

Professur Leistungs-elektronische Systeme (PES)

Tel.: +49 (721) 608-42474
Marc.Hiller@kit.edu
Campus Süd, Geb. 11.10
Raum 116

- Umrichterauslegung
- Elektrische und Thermische Simulation
- LV/MV-Leistungshalbleiter
- Neuartige Applikationen

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Elektrofahrzeuge – wofür eigentlich?

Saubere Diesel ?

Neue Abgasnorm

Der Diesel ist sauber - und kaum einer merkt es

Spiegel, 2018

VCD-UMWELTLISTE

Welche Diesel sauber sind

18. Oktober 2018 | Quelle: Spotpress

Auto Bild **Emissionsarm: Diese SUVs sind sauber**

stern

Panorama Politik Kultur Lifestyle Digital Wirtschaft Sport Gesundheit Genuss Reise Familie Auto

Abgasnormen

Frischer Atem aus dem Auspuff

Mit den verschiedenen Abgasnormen ist die Verwirrung beim Autokäufer perfekt: Welchen Standard soll er wählen? Der ADAC rät immer zur höchsten Euronorm. Die ist leider auch oft die teuerste, weil der Staat verpennt hat, die Rahmenbedingungen zu schaffen.

Von Christoph M. Schwarzer

"Es gibt Ottomotoren, bei denen 30 Sekunden nach dem Start praktisch keine Abgase mehr zu messen sind", sagt Axel Friedrich und ergänzt, dass die Luft aus dem Auspuff manchmal sauberer ist als die, welche vorne angesaugt wird. Er ist kein Lobbyist, sondern

Elektrofahrzeuge – wofür eigentlich?
Saubere Diesel ?

Verbrennung von Kohlenwasserstoffen:

$C_8H_{18} + 12½\ O_2 \rightarrow 8\ CO_2 + 9\ H_2O$

1 Liter Kraftstoff verbraucht ungefähr den Sauerstoff von 10 m^3 Luft
und erzeugt bei Verbrennung 2,6 kg CO_2

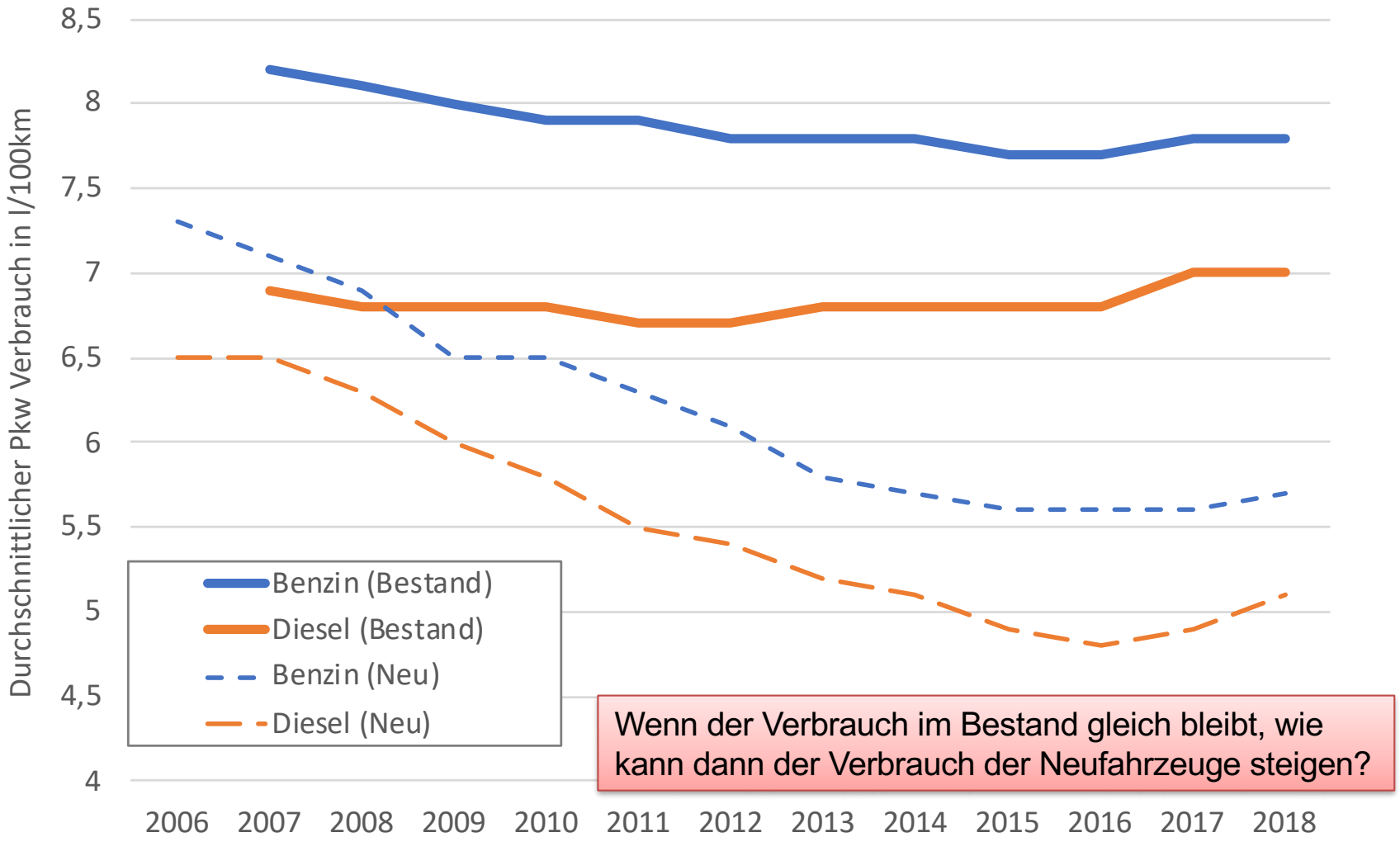
Immer und unvermeidlich!

Das kann man auch nicht herausfiltern !

→ Es gibt keine sauberen Verbrennungskraftmaschinen !
Saubere Verbrenner sind ein Oxymoron
(Widerspruch in sich selbst - schwarzer Schimmel)

Diese Feststellung ist völlig losgelöst von der Debatte um Feinstaub und Stickoxide (NOx). Dafür gibt es tatsächlich effektive Filter – wenn der Motor gut warm gefahren ist. Allerdings kosten diese Filter Geld (Invest) und Kraftstoff (Wirkungsgrad).

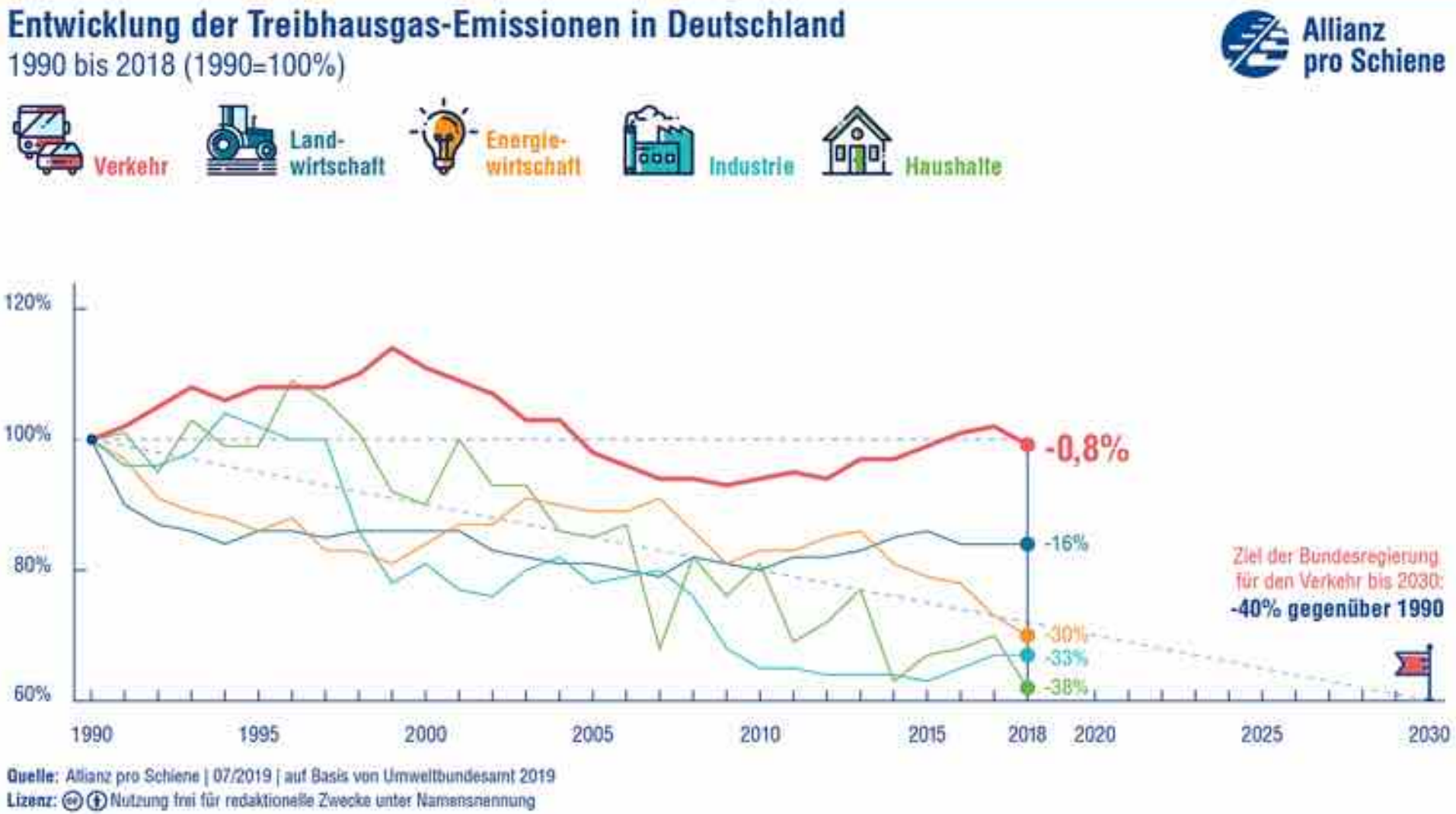
Aber immerhin werden die Verbrennungsmotoren besser!
Stimmt das wirklich?



Zahlenquellen: KBA, Statista

Aber immerhin werden die Verbrennungsmotoren besser!

Stimmt das wirklich?



Quelle: https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/umwelt/daten-fakten/

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Energieverbrauch und Verluste
(K)ein Buch mit sieben Siegeln

Leistung in kW
Wie *schnell* kann man fahren?

Richtwerte für den **Leistungsbedarf**:

- Bei 50 km/h ca. 5 kW
- Bei 100 km/h ca. 15 kW
- Bei 130 km/h ca. 30 kW
- Bei 160 km/h ca. 50 kW
- Bei 200 km/h ca. 100 kW

Energie in kW·h
Wie *weit* kann man fahren?

Richtwerte für **100 km Fahrstrecke PKW**:

- Benzin/Diesel: **7,3 l** (= 18 kg CO_2)
  (entspricht ca. 73 kWh)
- Brennstoffzelle: **1,2 kg H_2** (= 17 kg CO_2)
  (entspricht ca. 40 kWh)
- Elektrisch: **20 kWh Strom** (= 10 kg CO_2)

Bildquelle: Leifi Physik, fotocommunity.de (Peter Müller)

CO_2 Emission mit Tankverlusten (12% H_2, 10% Batterie)

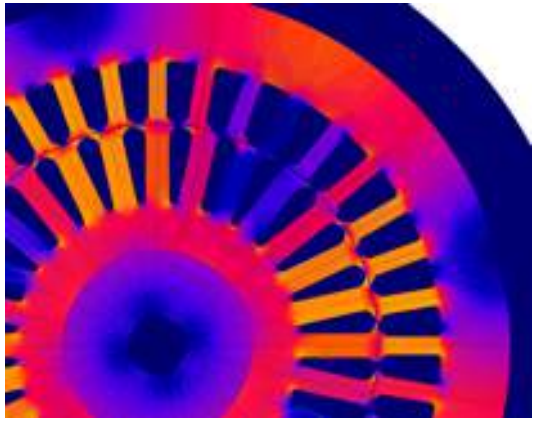
Hybride und Elektrofahrzeuge
Kategorien

Martin Doppelbauer
Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Elektrotechnisches Institut ETI
Professur Hybridelektrische Fahrzeuge HEV
www.eti.kit.edu

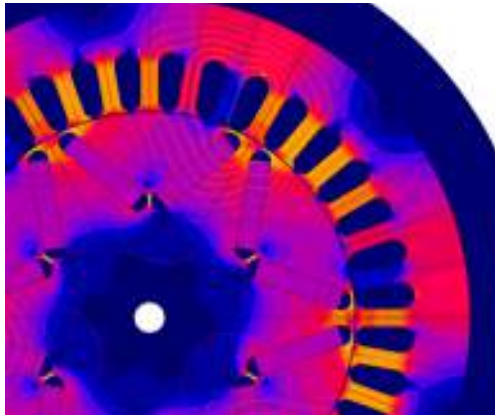
E-Motoren für Elektrofahrzeuge
Heute und in Zukunft

ASM
Asynchronmotor



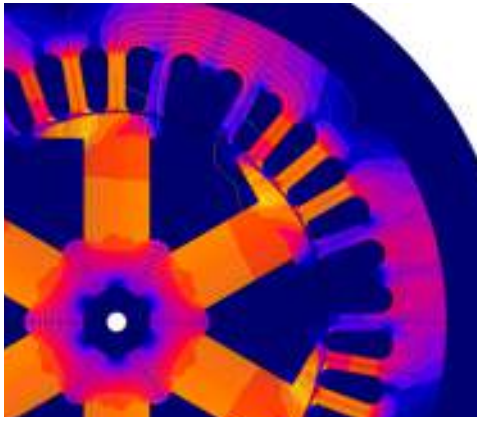
Tesla Model S, X, 3 (vorne)
Renault Twizy
Audi e-tron 55
Daimler EQC 400

PMSM
Permanentmagnet
Synchronmaschine



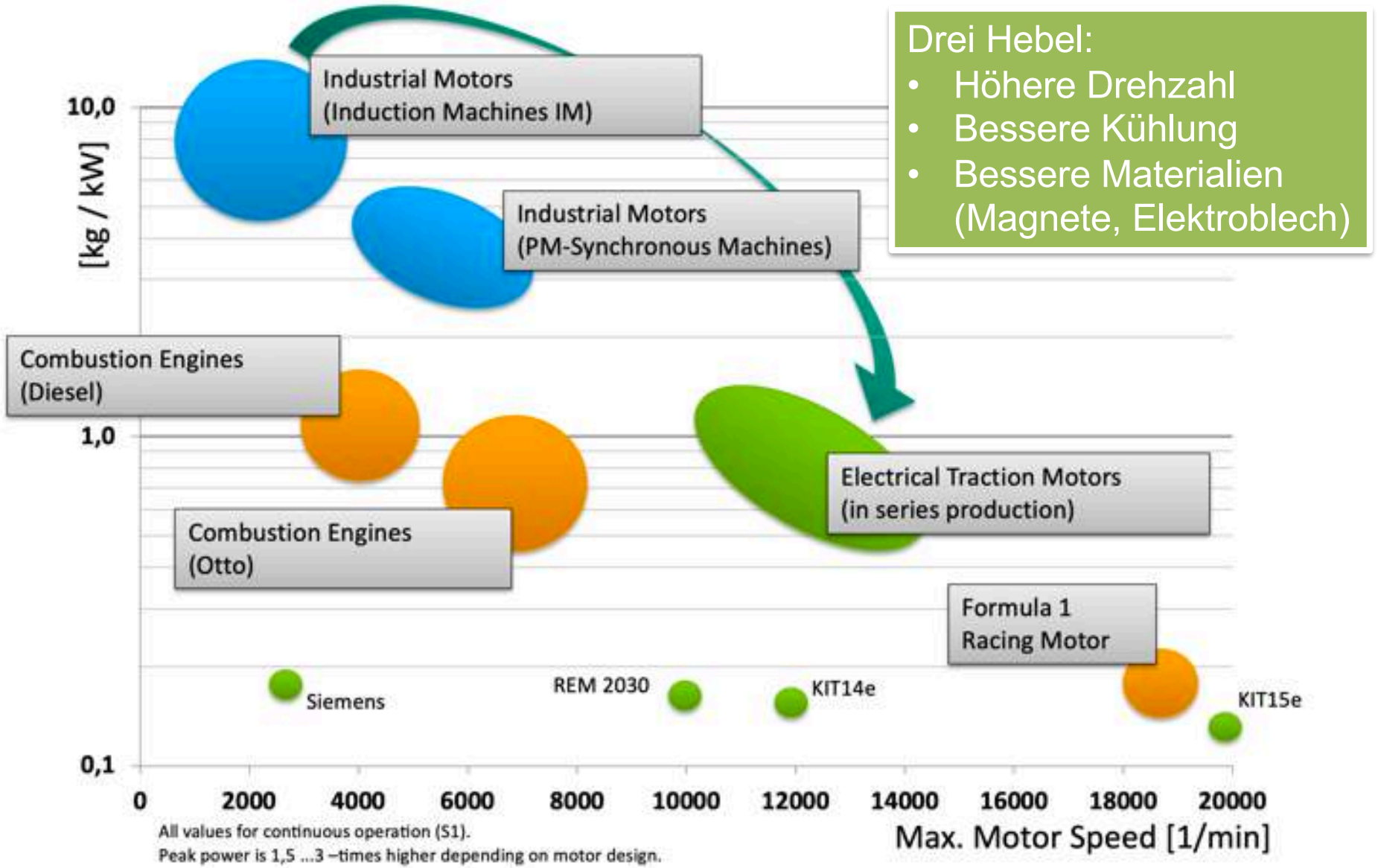
Tesla Model 3 (hinten)
Toyota Prius
Nissan Leaf
BMW i3
VW e-Golf, e-up
Jaguar I-Pace

FESM
Fremderregte
Synchronmaschine



Renault Zoe, Kangoo
Daimler Smart EQ

Leistungsgewicht
VKM und E-Motoren



Drei Hebel:
- Höhere Drehzahl
- Bessere Kühlung
- Bessere Materialien (Magnete, Elektroblech)

Moderne Elektrofahrzeuge
Konstruktive Vorteile von BEVs

Wenig Technik unter der „Motorhaube“
→ Kürzer Überstand, mehr Platz im Passagierbereich (**Cab-Forward Design**)
→ Platz für zusätzlichen, vorderen Kofferraum

Tiefliegende, flache Batterie (**Skateboard-Design**)
→ Tiefer Schwerpunkt, gute Straßenlage, Sicherheit gegen Überschlag
→ Leicht erhöhte Sitzposition, bessere Übersicht

Kompakte elektrische Antriebe
→ Motor direkt an der Achse, kaum Transmissionsverluste
→ **Dual-Motor** = Allradantrieb einfach möglich

Bildquelle: CNBC.com, Jaguar

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Laden
Steckersysteme

← PKW | NFZ→

	IEC Typ 2		IEC Combo 2 CCS 1.0 / 2.0 / 3.0 (i.V.)		OppCharge	
			CHAdeMO			
	AC-Laden		**DC-Laden**			
Langsam	3 kW	7 h / 100 km				
	7 kW	3 h / 100 km				
Mittel	**11 kW**	2 h / 100 km				
	22 kW	1 h / 100 km				
Schnell	43 kW	30 min / 100 km	**50 kW**	30 min / 100 km	CCS bis 3 MW ist in Planung	
Tesla SuC V2	Rot = Eingeführt in Europa		100 kW	15 min / 100 km		
			120 kW	15 min / 125 km		
			150 kW	15 min / 150 km		
Tesla SuC V3			**250 kW**	10 min / 240 km		
Ultraschnell			**350 kW**	10 min / 300 km		
					600 kW	für Busse, LKW
China/Japan					900 kW	in Vorbereitung*

* Chinesisch-/Japanischer ChaoJi-Ladestandard

Laden
Im Alltag

Im Alltag erfolgt das Laden daheim,
beim Arbeitgeber oder während des Einkaufens.
So hat man immer ein geladenes Auto.

**→ Mit Elektroautos spart man in Summe Tankzeit,
weil man nicht mehr zur Tankstelle fahren muss!**

Bildquelle: Stuttgarter Zeitung, Elektromobilität NRW, Aldi AG

Laden
Auf der Langstrecke – so nicht !

Bildquelle: Handelsblatt

Laden
Auf der Langstrecke – sondern so!

Bildquelle: Tesla Motors

Das Laden an der Autobahn wird nicht mehr an einzelnen Zapfsäulen stattfinden, neben denen man steht und wartet, sondern an Parkplätzen. Während des Ladevorgangs kann man im Shop einkaufen, Essen oder sich entspannen.

Laden
Auf der Langstrecke – sondern so!

Und wenn im Sommer die Urlaubslawine gen Süden rollt?

36 kV Mittel-spannungskabel

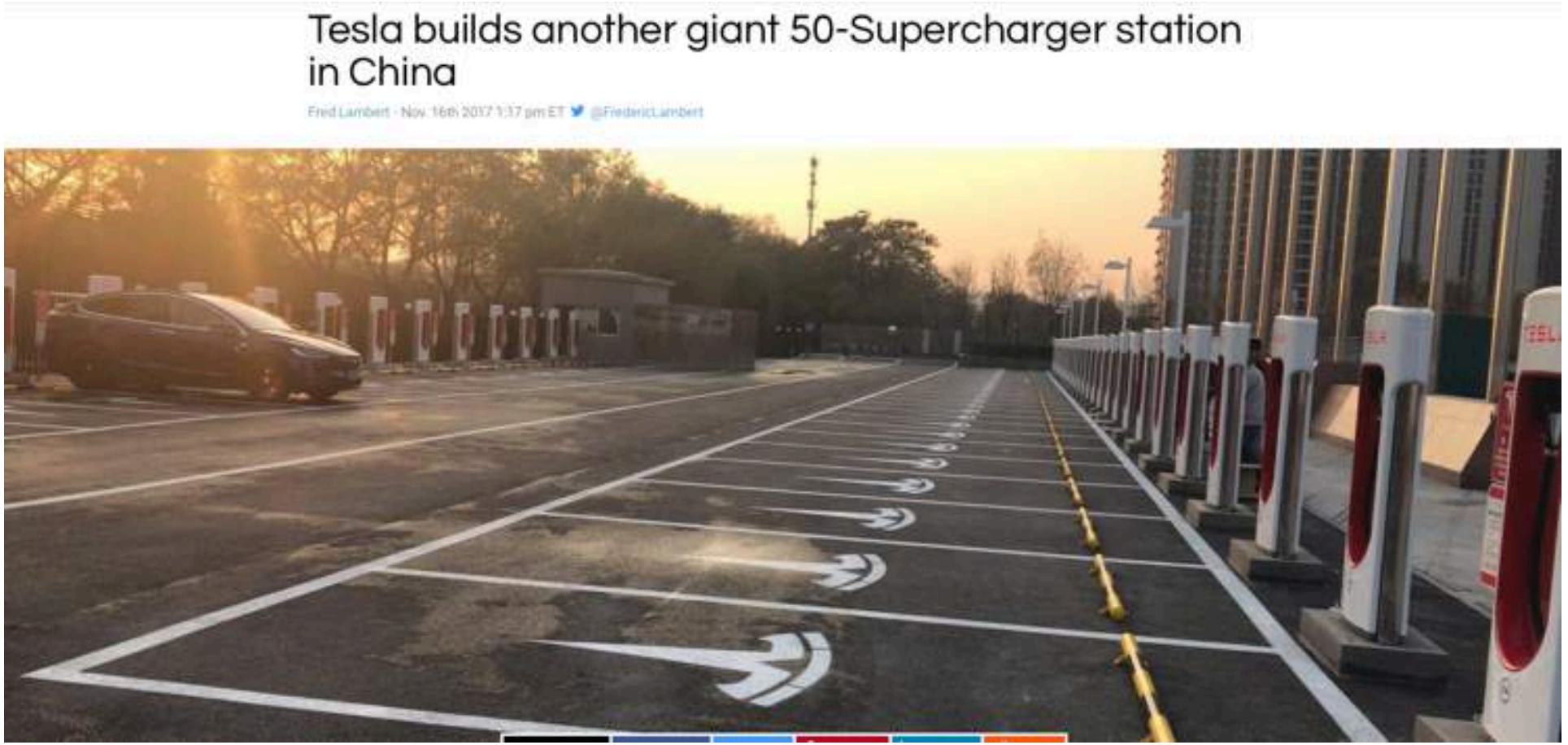
2x 4,4 MW Transformator

Abschätzung Autobahntankstelle: 8 Tanksäulen, 6 Minuten Tankzeit incl. Bezahlvorgang
→ **80 Autos pro Stunde**

Elektrische Ladesäulen: **(heutiger Stand)**
100 kWh Batterie, **400 km Reichweite zwischen Tankstopps** (10 bis 80% SoC), Laden mit 100 kW im Mittel (150 kW Spitze)
→ pro Ladevorgang ca. **30 bis 45 Minuten**
→ **60 Parkplätze mit Ladesäulen**
→ Mittlerer Leistungsbedarf rund **6 MW**

Bildquelle: Aral

Laden
Auf der Langstrecke – sondern so!



Tesla Supercharger (Stand Anfang 2020):

- 4 Stationen mit je 30+ Stellplätzen in Europa (Niederlande, England)
- 8 Stationen mit je 40+ Stellplätzen in USA und Norwegen
- 3 Stationen mit je 50 Stellplätzen in China (Beijing, Shanghai)

Bildquelle: electrek.net

Laden
Ultraschnelle Ladesäulen mit 350 kW

Bildquelle: Motor-Talk.de

400 solche Tankstellen sind bis zum Jahresende 2020 in ganz Europa geplant

Laden
Ultraschnelle Ladesäulen mit 350 kW

Standorte von DC-Ultraschnelladesäulen (**Ionity 350 kW**), Stand 02/2019

218 Standorte geöffnet
44 im Aufbau
(Stand März 2020)

Beteiligte Hersteller:
- Daimler
- BMW
- VW-Konzern (Audi, Porsche)
- Ford
- Hyundai

Quelle: https://ionity.eu/de/wo-und-wie.html

Laden
Auf der Langstrecke – es geht noch schneller

Das ist immer noch zu langsam?
Kein Problem:

450 kW, 920 V Ultraschnelllader für PKWs
3 Minuten Ladezeit für 100 km

Prototypenanlage FastCharge-Projekt am Autohof in Jettach-Scheppach
(A8 zwischen Günzburg und Augsburg)
Konsortialpartner BMW, Porsche, Allego, Phoenix Contact, Siemens

Bildquellen: Porsche, Siemens

Laden
Auf der Langstrecke – es geht immer noch schneller

Batterietausch

NIO ES8

NIO Batteriewechselstationen von Peking nach Shanghai und Shenzhen
Die Strecke nach Shanghai wurde am 16.01.2019 in Betrieb genommen.

Bildquelle: Nio

Laden
Induktives Laden - Vision

Auf der Autobahn:

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

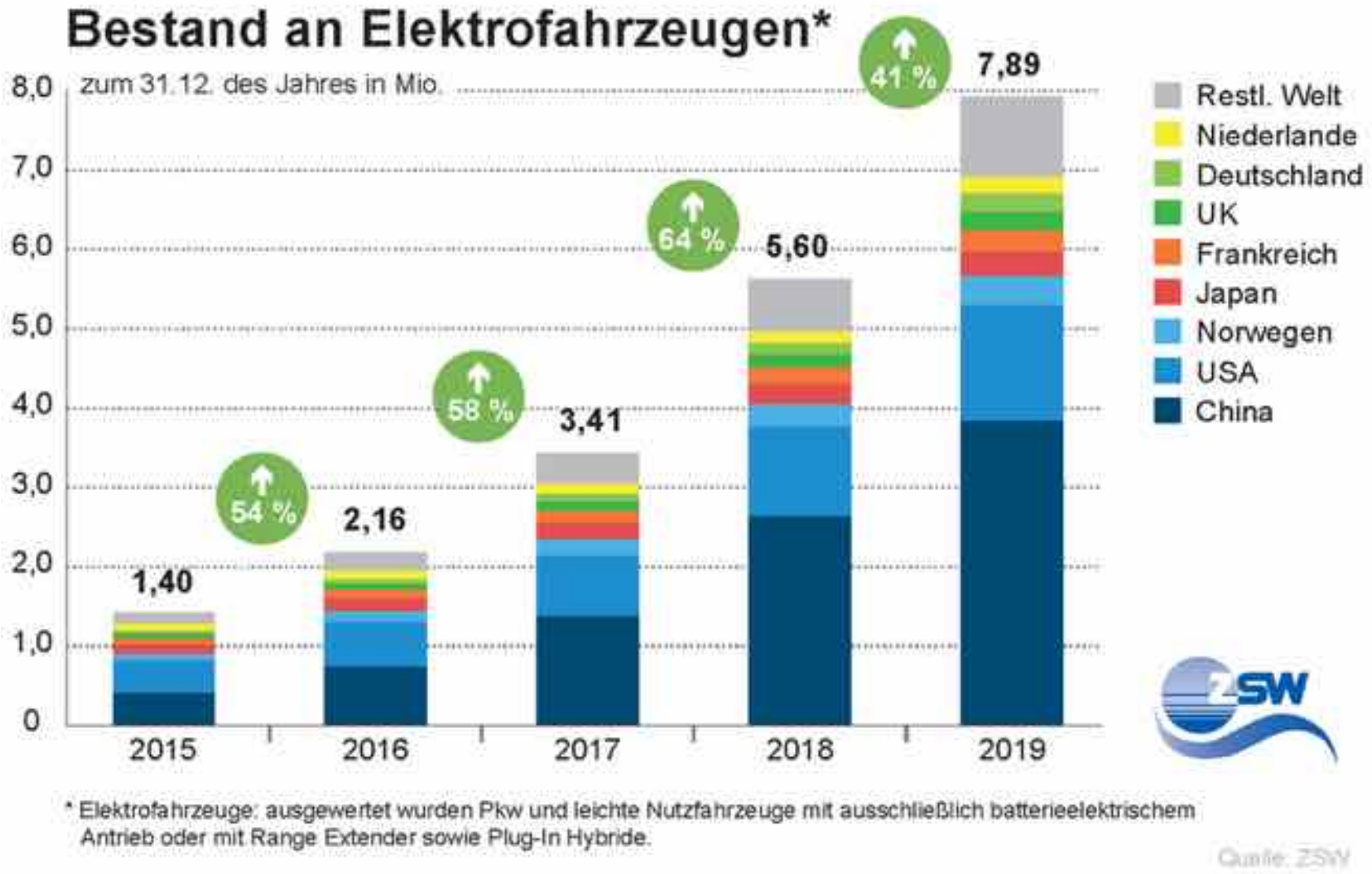
Laden
Induktives Laden – Feldversuch in Jian, China

Derzeit 1,2 Meilen (2 km) Teststrecke, mehr ist geplant.

Bildquelle: People.cn/Facebook

Moderne Elektrofahrzeuge

Aktueller Bestand Elektrofahrzeuge Weltweit

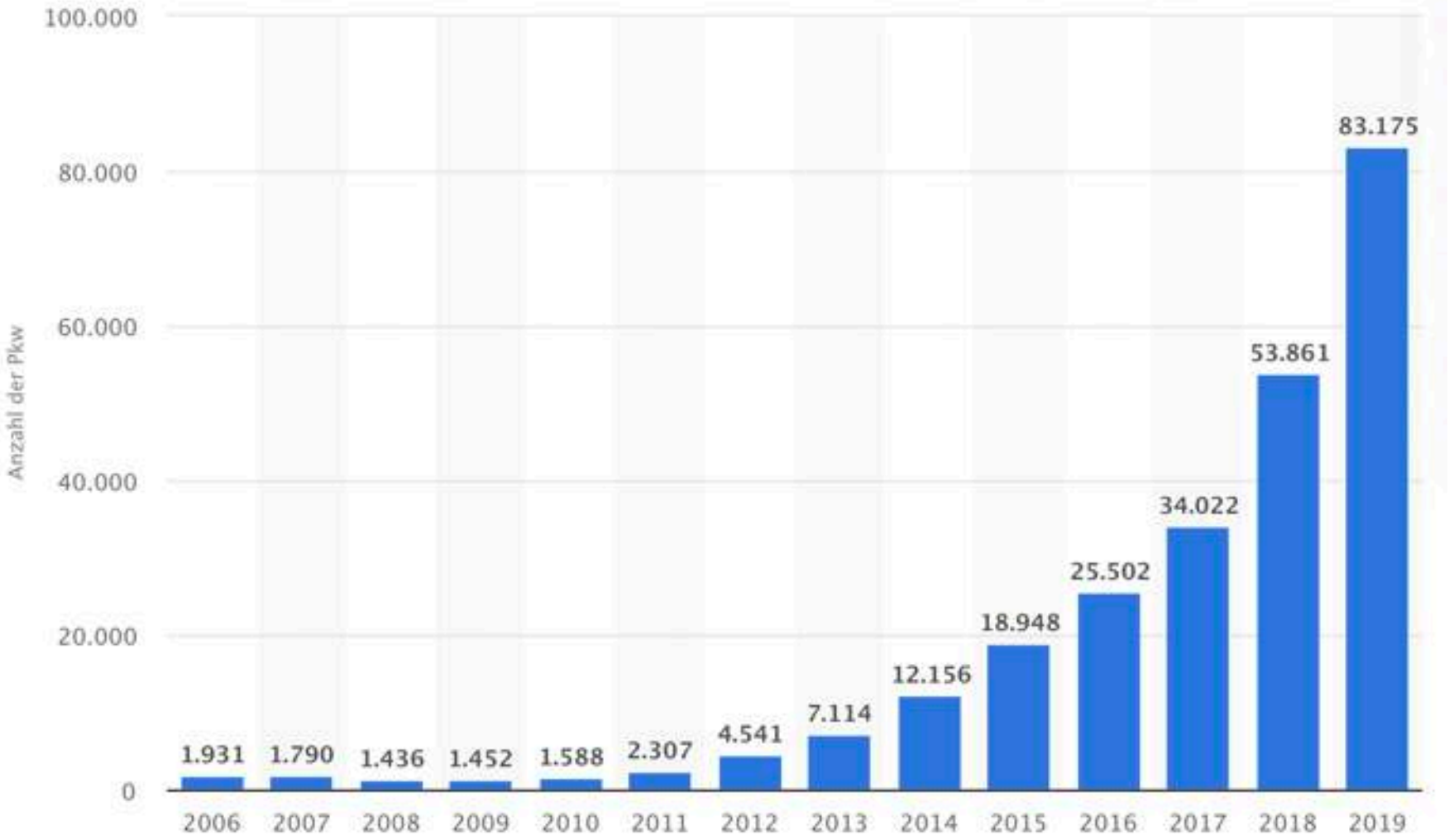


... zuzüglich ca. 0,1 ... 0,2 % Brennstoffzellen-Pkw

Quelle: https://www.zsw-bw.de/

Moderne Elektrofahrzeuge

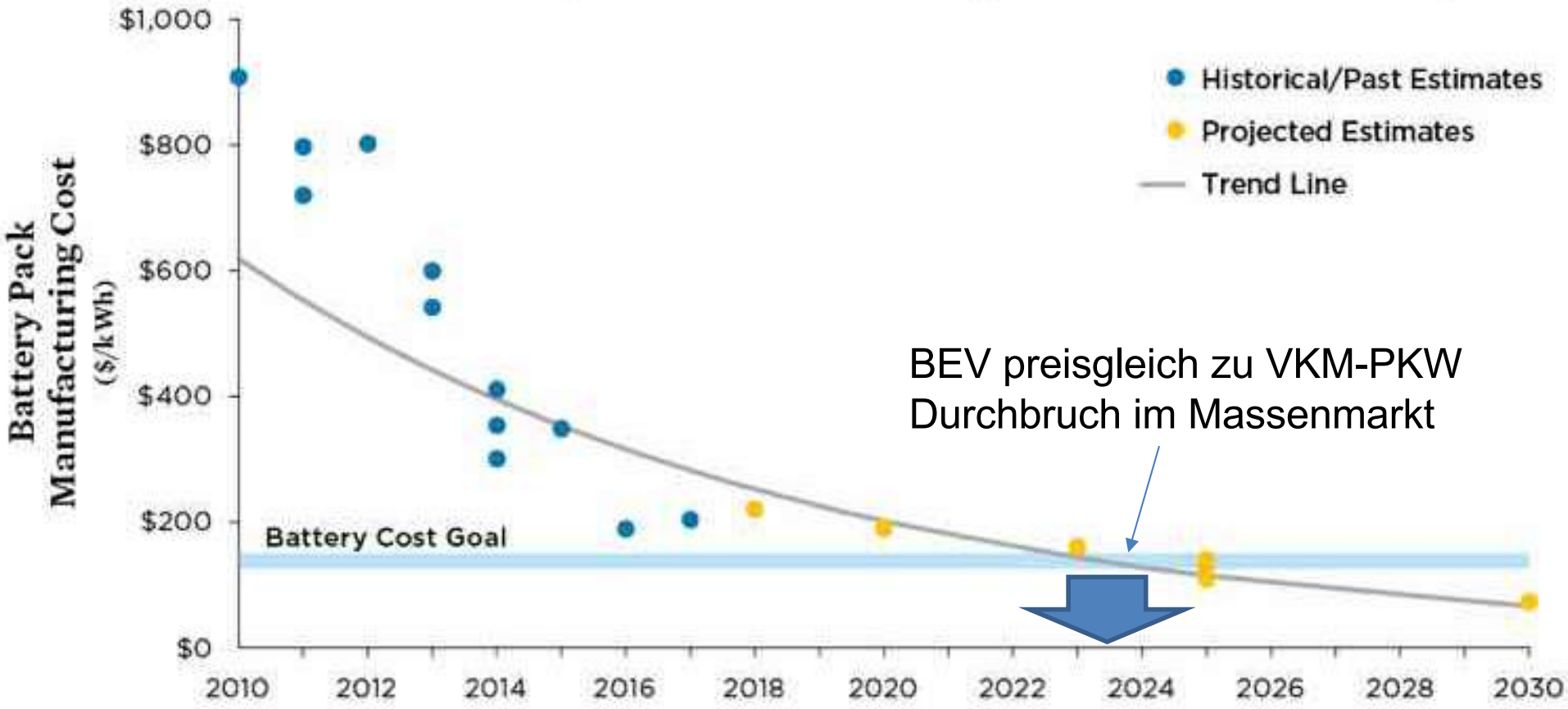
Absatzzahlen Elektrofahrzeuge Deutschland



Quelle: de.statista.com

Lithium-Ionen-Batterien
Kostenentwicklung

Preise für komplette Batteriemodule



Quelle: https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/electric-cars-battery-life-materials-cost, März 2018

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Moderne Elektrofahrzeuge

Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

~~**Seltene Erden**~~	▪ Nutzung in manchen Varianten von **Elektromotoren** (PMSM) → Kann leicht ersetzt werden (ASM, FESM) ▪ Nutzung in manchen Varianten von **Windturbinen** (PMSM) → Kann leicht ersetzt werden (DGASM) ▪ Nutzung in manchen Varianten von **Photozellen** (CdTel, Cu(In,Ga)Se2) → Kann leicht ersetzt werden (Mono- und polykristallines Silizium cSi) ▪ <u>Keine</u> Nutzung in **Lithium-Ionen Akkus**
~~**Kobalt**~~	▪ Stark rückläufige Nutzung in **Lithium-Ionen Akkus**. Bei aktuellen Batterien (NCA-Panasonic/Tesla) nur noch 0,6 kg pro 10 kWh. ▪ <u>Keine</u> Nutzung in **Windturbinen**, **Photovoltaik**, **Elektromotoren** ▪ Komponente in Schnellarbeitsstählen HSSE (5 bis 8% Legierungsanteil) → Unverzichtbar für die Herstellung von Verbrennungsmotoren und komplexen Automatikgetrieben
Lithium	▪ Unverzichtbar für **Lithium-Ionen Akkus**, derzeit rund 0,6 kg pro 10 kWh ▪ <u>Keine</u> Nutzung in **Windturbinen**, **Photovoltaik**, **Elektromotoren**
~~**Platin**~~	▪ Nutzung in **Brennstoffzellen**, soll durch Kobalt (!) ersetzt werden ▪ <u>Keine</u> Nutzung in **Windturbinen**, **Photovoltaik**, **Elektromotoren, Li-Ion Akkus**

Aluminium, Eisen, Kupfer, Silizium, Lithium und Kohlenstoff/Graphit
sind die wirklichen Rohstoffe der Energiewende!

Moderne Elektrofahrzeuge

Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

Lithium	Jährliche Fördermenge in tsd. Tonnen	Reserven in tsd. Tonnen	Ressourcen in tsd. Tonnen
Weltweit	**37,8**	**16.000**	**53.800**
Argentinien	5,5	2.000	9.800
Australien	18,7	2.700	5.000
Bolivien	-	-	9.000
Brasilien	0,2	48	180
Chile	14,1	7.500	8.400
China	3	3.200	7.000
Kanada	-	-	1.900
Kongo	-	-	1.000
Mali	-	-	200
Mexiko	-	-	180
Österreich	-	-	50
Portugal	0,4	60	100
Russland	-	-	1.000
Serbien	-	-	1.000
Simbabwe	1,0	23	500
Spanien	-	-	400
Tschechien	-	-	840
USA	-	35	6.800

Quelle: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2018

PKW-Bestand in der gesamten Welt:
Ca. 1,2 Mrd. Fahrzeuge

- Eine moderne Batterie benötigt nur noch 0,6 kg Lithium pro 10 kWh (Tesla/Panasonic NCM811).
- 4,5 kg Lithium werden für eine Fahrzeugbatterie mittlerer Größe (75 kWh) benötigt
- 5.400 Tsd. Tonnen werden benötigt, um für alle Fahrzeuge weltweit je eine Batterie zu bauen, allerdings sind heute (2019) bereits 70.000 Tsd. Tonnen bekannt
- Darin ist Recycling (Sekundär-Lithium) noch nicht eingerechnet
- Weiteres Lithium ist in **Salzwasser (Ozeane)** enthalten, geschätzt **230.000.000 Tsd. Tonnen**.

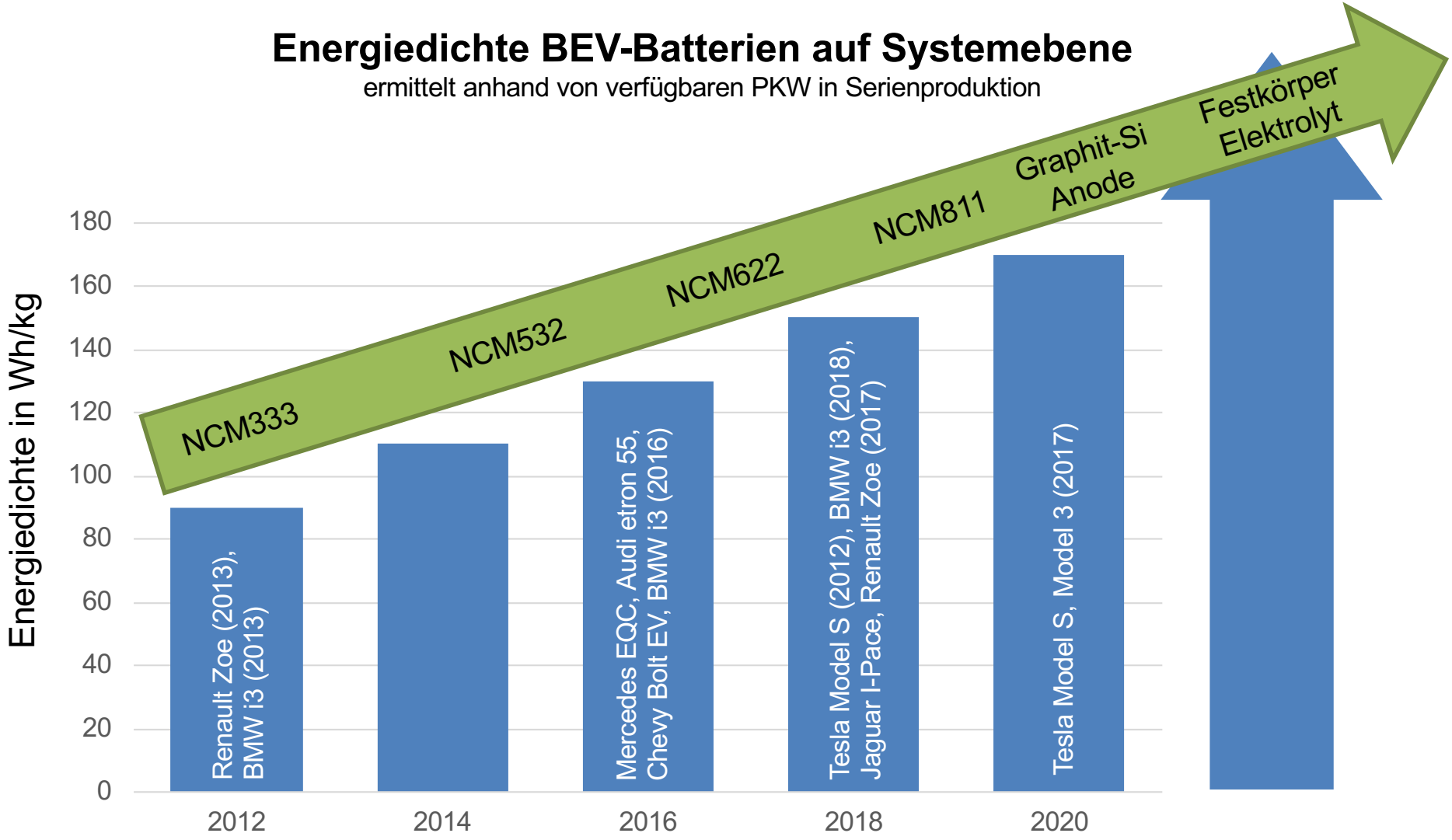
→ Das Lithium für Batterien wird uns nie ausgehen!

Moderne Elektrofahrzeuge

Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

Energiedichte BEV-Batterien auf Systemebene

ermittelt anhand von verfügbaren PKW in Serienproduktion



Systemgewicht = Kompletter Batterie-Pack incl. Zellen, Gehäuse, Kühlung, BMS, Sicherheitstechnik, …

Tesla nutzt NCA-Rundzellen mit NCM811 Material, Systemgewicht 168 Wh/kg

Moderne Elektrofahrzeuge

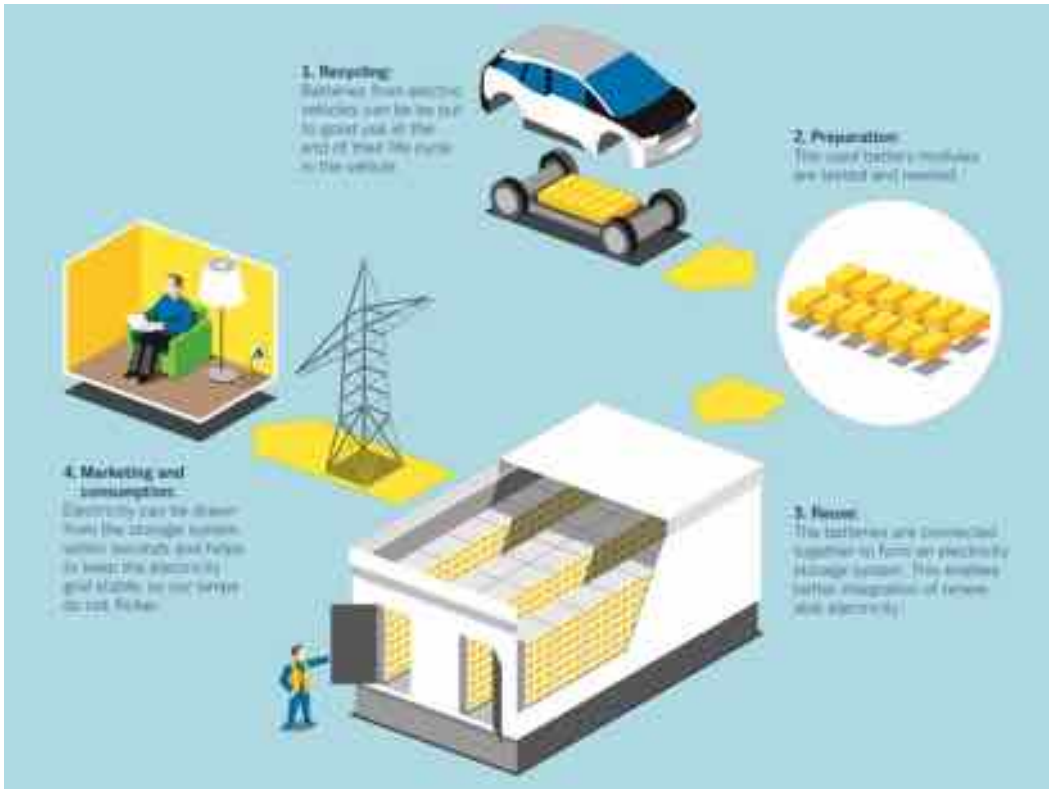
Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

2nd Life

Second-life EV battery market to grow to $4.2 billion by 2025

Circular Energy Storage, a London-based research and consulting group, reports a strong business case for reconstituted electric vehicle batteries for energy storage applications. As the EV and static storage system markets grow rapidly, synergies could be a useful tool for continued cost optimization.

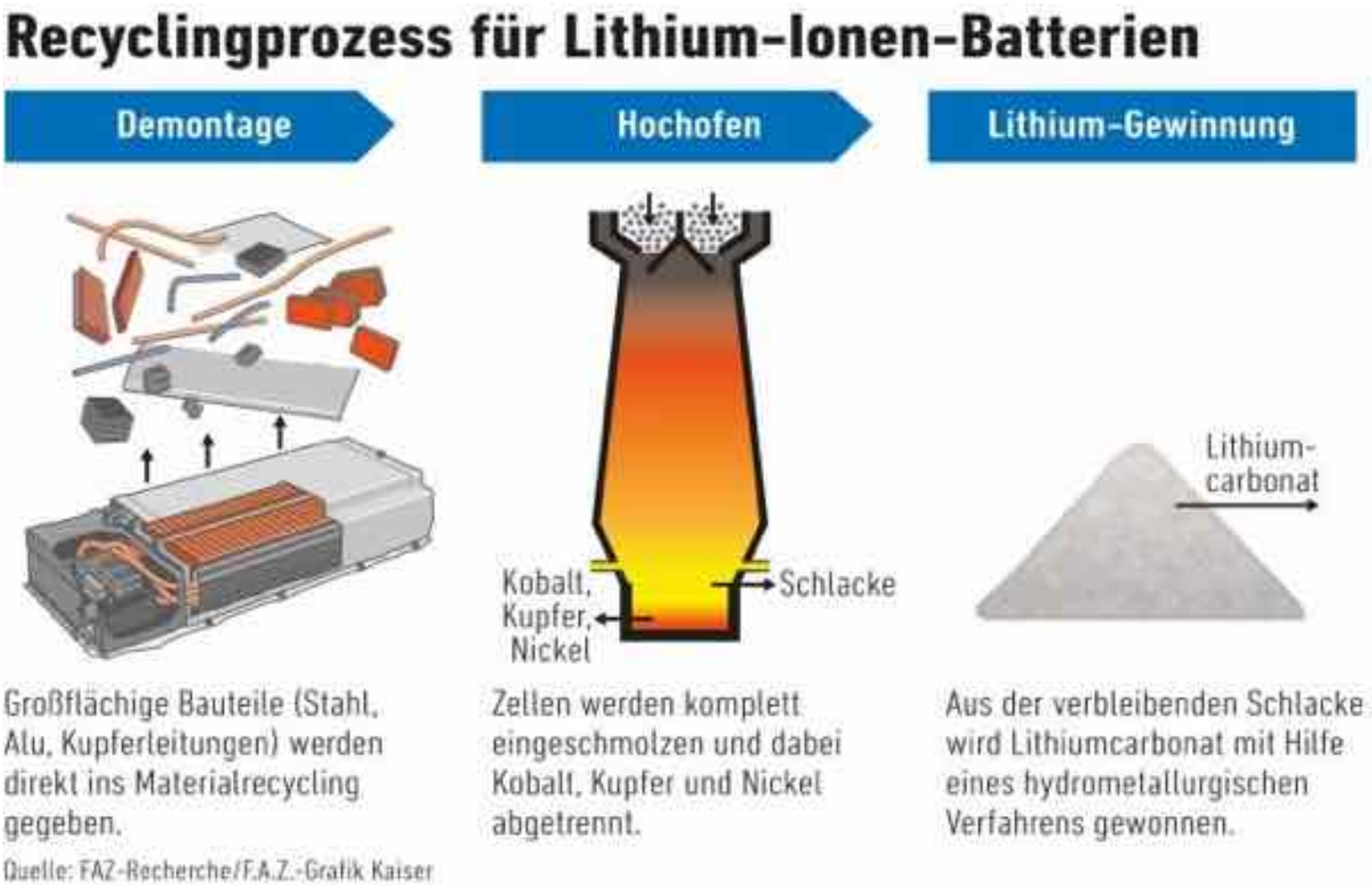
Quelle: https://www.pv-magazine.com/2018/08/03/second-life-ev-battery-market-to-grow-to-4-2-billion-by-2025/



Bildquelle: Bosch

Moderne Elektrofahrzeuge
Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

Recycling



Quelle: FAZ, Johannes Winterhagen, *Wohin mit den alten Akkus der E-Autos?*, 10.01.2018

Moderne Elektrofahrzeuge
Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

Recycling

Bild: Lithium-Ionen-Recyclinganlage Bremerhaven

Redux Recycling GmbH: Zwei Standorte (Offenbach am Main, Bremerhaven), Kapazität für 46 Mio. t Batterien pro Jahr, Gründung 1997, 80 Mitarbeiter.

Quelle: Saubermacher AG

Moderne Elektrofahrzeuge
Aber das Problem mit den Rohstoffen und dem Gewicht!

Problemfall Lithium-Ionen Akku? Einige Fakten:

- Li-Ion Akkus enthalten **keine Seltenerdmaterialien**.
- Der Kobaltanteil wurde in aktuellen Zellen bereits erheblich reduziert(1). **Mittelfristig** werden Autobatterien **gar kein Kobalt mehr** enthalten(2). Viele Heimspeicher-Batterien (LiFePO) enthalten heute schon kein Kobalt mehr, z.B. Produkte der Firma Sonnen.
- Lithium ist **in sehr großen Mengen** in der Erdkruste in vielen verschiedenen Ländern und noch mehr im Salzwasser der Meere vorhanden - hier gibt es überhaupt keine Knappheit und auch keine grundsätzlichen ethischen/ökologischen Probleme bei der Förderung.
  Die Förderung und Aufbereitung von Lithium ist nicht grundsätzlich umweltschädlicher als die von Kupfer oder Bauxit/Aluminium, der Wasserverbrauch ist vergleichsweise gering!
- Elektroautos mit Lithium-Ionen Akkus sind **sicherer** als PKWs mit Benzin oder Diesel. Brände durch Gewalteinwirkung entstehen erst nach minutenlanger Verzögerung und können mit Wasser gelöscht werden. Explosionen nach Unfällen, wie sie bei Benzin- und Diesel-PKW häufig vorkommen, sind bisher nicht bekannt geworden.
- Die Lebensdauer von modernen Batterien in BEVs liegt über **200 Tsd. km**(3).
- Autobatterien können später als Heimspeicher oder in Großanlagen zur Netzstützung weiterverwendet werden (**Second Life**), außerdem ist nahezu vollständiges **Recycling** möglich. Dadurch sinken die anteiligen CO_2-Emissionen bei der Produktion erheblich.

(1) Tesla/Panasonic nutzt im Model 3 rund 4,5 kg Kobalt pro Auto gegenüber 11 kg früher (NCM811-Zellen), das sind 0,6 kg pro 10 kWh.
(2) Tesla hat angekündigt, schon bei der nächsten Batteriegeneration vollständig auf Kobalt zu verzichten.
(3) Tesla gewährt eine Garantie von 8 Jahren auf den Antriebsstrang einschließlich der Batterie – bei Batterien ab 85 kWh ohne km-Beschränkung, bei kleineren Batterien bis 200.000 km. Es fahren Tesla Model S mit 200.000 Meilen (320.000 km) und der ersten Batterie.

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Umweltbilanz
Mittelklasse-PKW

Lebenszyklus Analyse Mittelklasse-PKW

Otto-Motor
Verbrauch 7 l/100 km real*
Erzeugungs-Wirkungsgrad 90% (Raffinierung 6-10%, Transport 1%)
Fahrzeugproduktion 6 t CO_2

Diesel-Motor
Verbrauch 6 l/100 km real*
Erzeugungs-Wirkungsgrad 90% (Raffinierung 6-10%, Transport 1%)
Fahrzeugproduktion 6 t CO_2

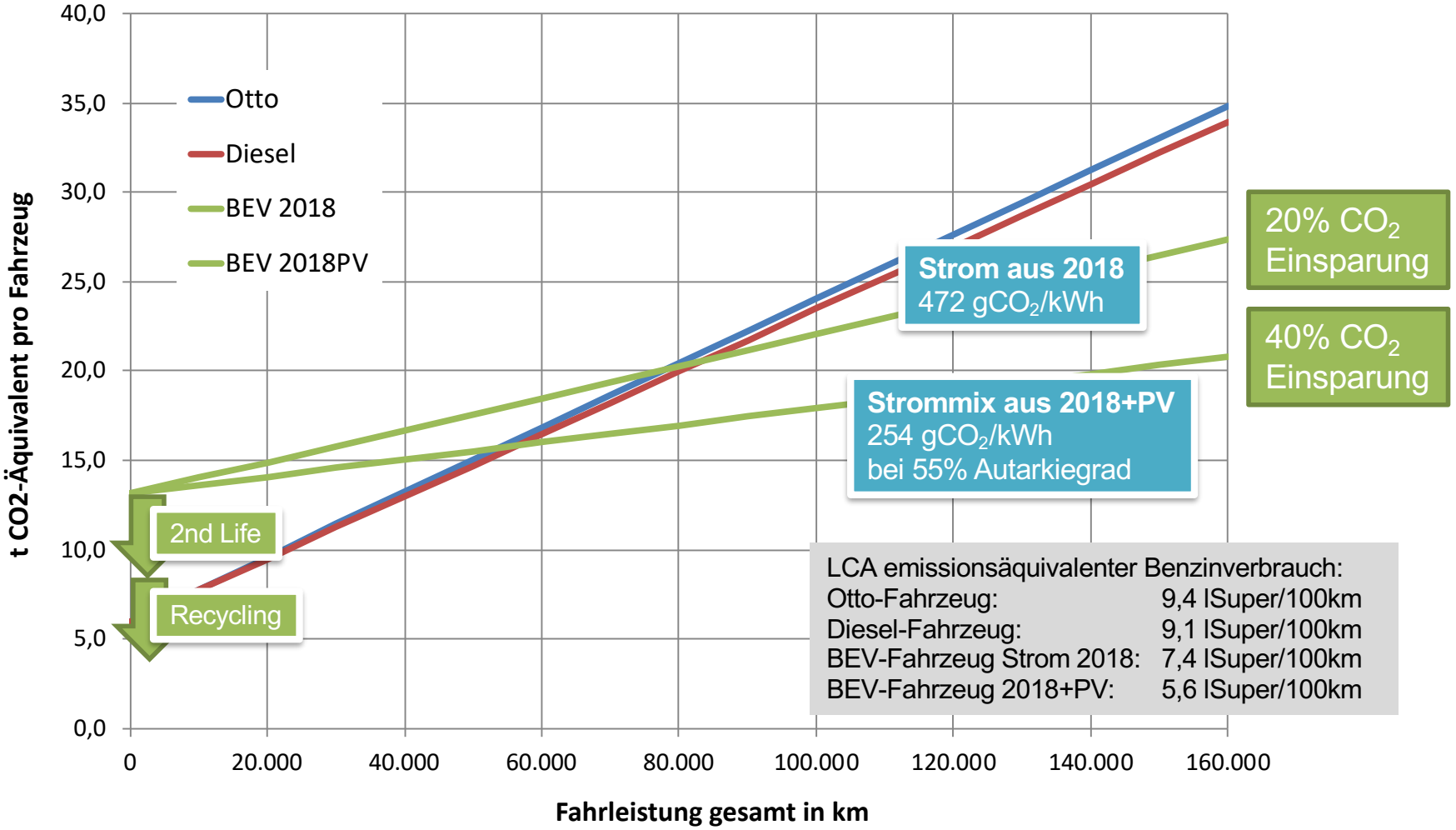
BEV
Verbrauch 17 kWh/100km real
Lade-Wirkungsgrad 90% (Ladeelektronik 95%, Batteriezyklus 92%)
Fahrzeugproduktion 6 t CO_2
Batterieproduktion 95 kgCO_2/kWh (Stand Tesla 2017)
Batteriekapazität 75 kWh (> 400 km Reichweite)
ohne 2nd-Life, ohne Recycling

* Durchschnittsverbrauch aller PKW in DL ca. 7,3 l

Bildquelle: Tesla Motors

Umweltbilanz
Mittelklasse-PKW

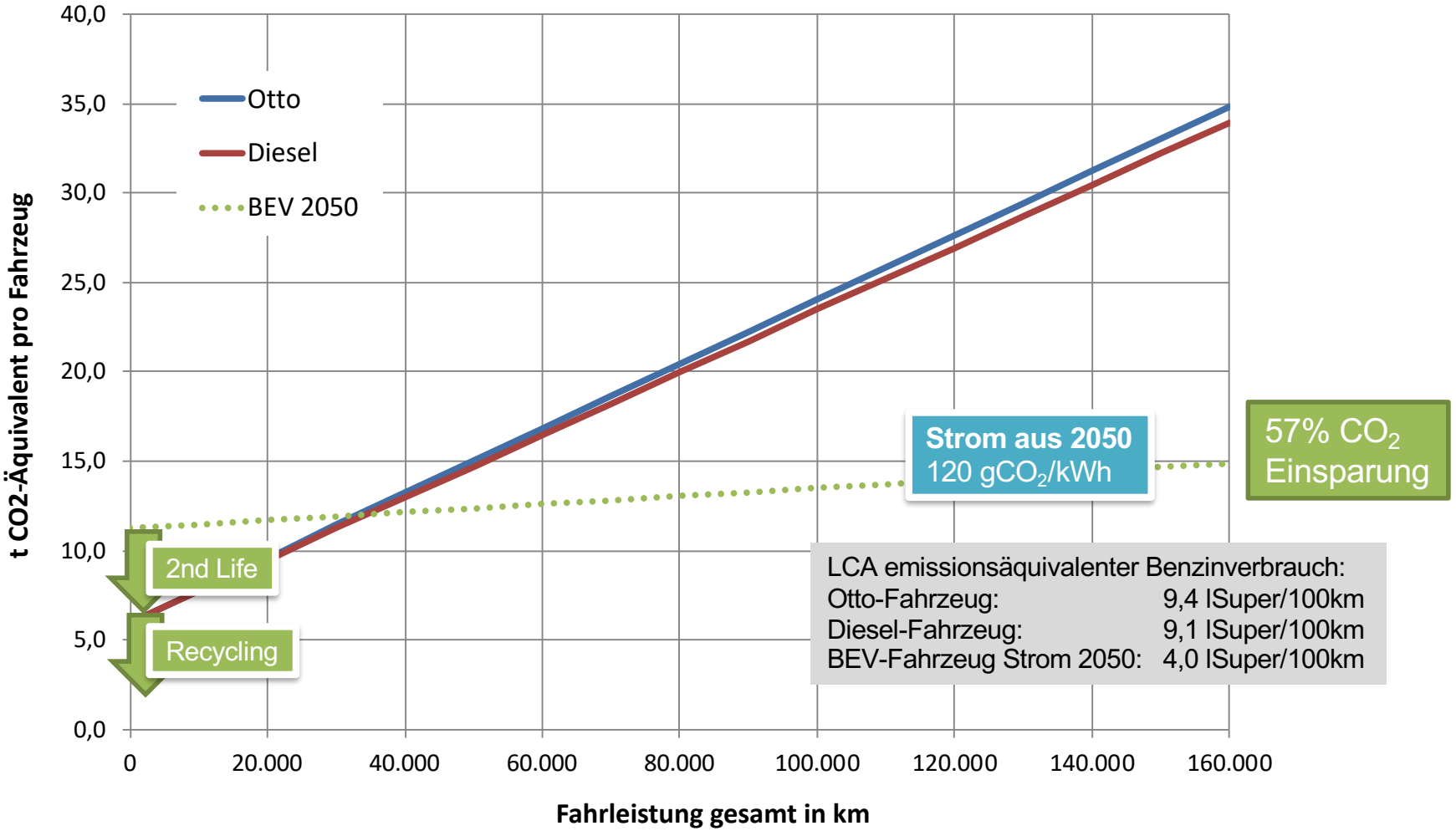
Lebenszyklus Analyse Mittelklasse-PKW
Heutige Stromproduktion in Deutschland (472 gCO_2/kWh in 2018)
50 kWh Batterie aus heutiger Produktion (110 $kgCO_2$/kWh)



LCA emissionsäquivalenter Benzinverbrauch:	
Otto-Fahrzeug:	9,4 lSuper/100km
Diesel-Fahrzeug:	9,1 lSuper/100km
BEV-Fahrzeug Strom 2018:	7,4 lSuper/100km
BEV-Fahrzeug 2018+PV:	5,6 lSuper/100km

Umweltbilanz
Mittelklasse-PKW

Lebenszyklus Analyse Mittelklasse-PKW
Stromproduktion Klimaziel 2050 in Deutschland (120 gCO_2/kWh)
50 kWh Batterie aus Produktion in 2050 (70 kgCO2/kWh)



Umweltbilanz
Kompaktklasse-PKW

Lebenszyklus Analyse Kompaktklasse-PKW

Otto-Motor
Verbrauch 5 l/100 km
Erzeugungs-Wirkungsgrad 90% (Raffinierung 6-10%, Transport 1%)
Fahrzeugproduktion 4 t CO_2

Diesel-Motor
Verbrauch 4 l/100 km
Erzeugungs-Wirkungsgrad 90% (Raffinierung 6-10%, Transport 1%)
Fahrzeugproduktion 4 t CO_2

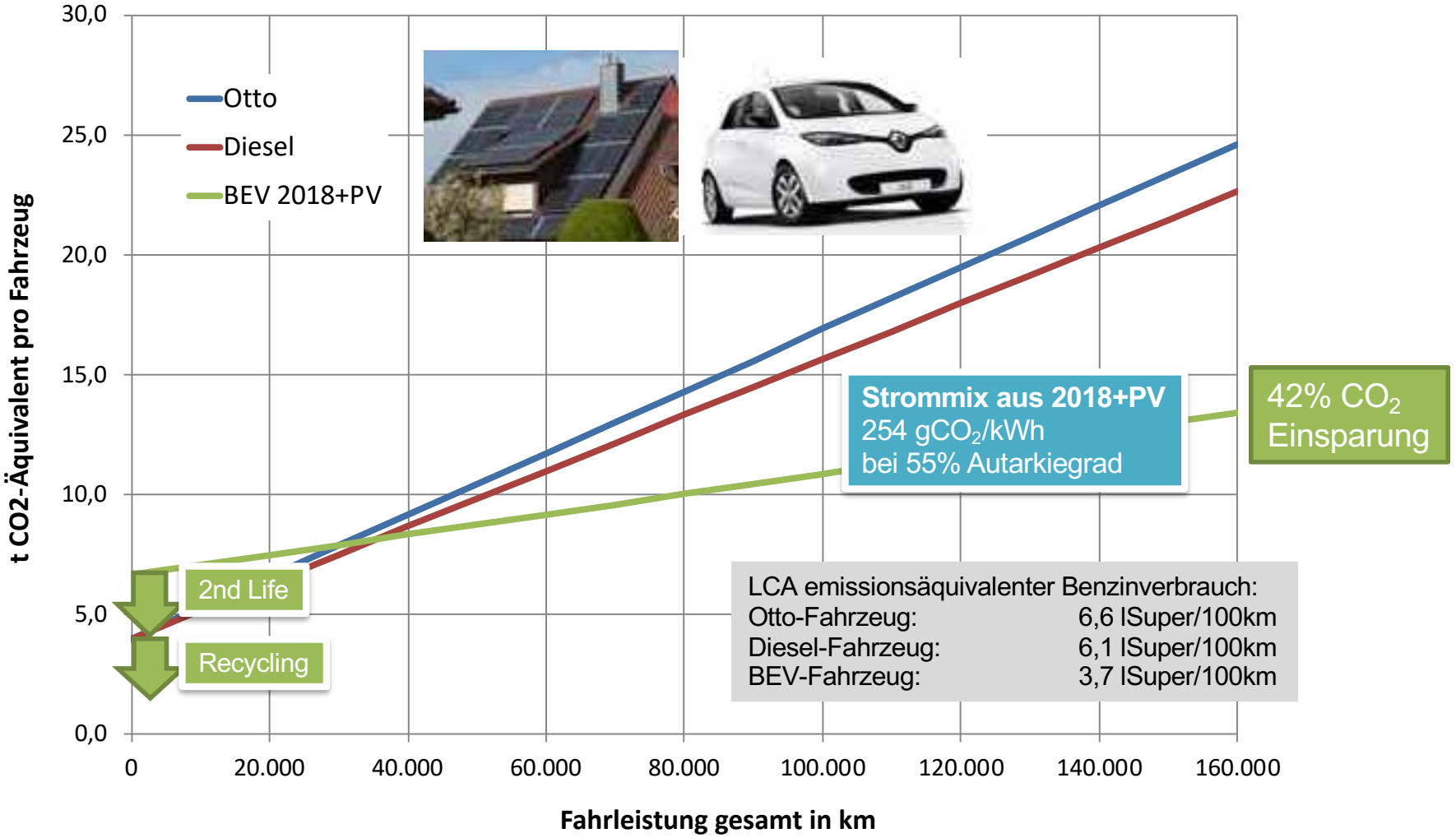
BEV
Verbrauch 15 kWh/100km
Lade-Wirkungsgrad 90% (Ladeelektronik 95%, Batteriezyklus 92%)
Fahrzeugproduktion 4 t CO_2 (ohne Batterie)
Batterieproduktion 110 kgCO_2/kWh (Stand 2017)
Batteriekapazität 24 kWh (140 km Reichweite)
ohne 2nd-Life, ohne Recycling

Bildquelle: Renault

Umweltbilanz
Kompaktklasse-PKW

Lebenszyklus Analyse Kompaktklasse-PKW

Heutige Stromproduktion in Deutschland **mit 55% Eigenproduktion PV** = 254 gCO2/kWh im Mittel
24 kWh Batterie aus heutiger Produktion (110 kgCO2/kWh)



Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

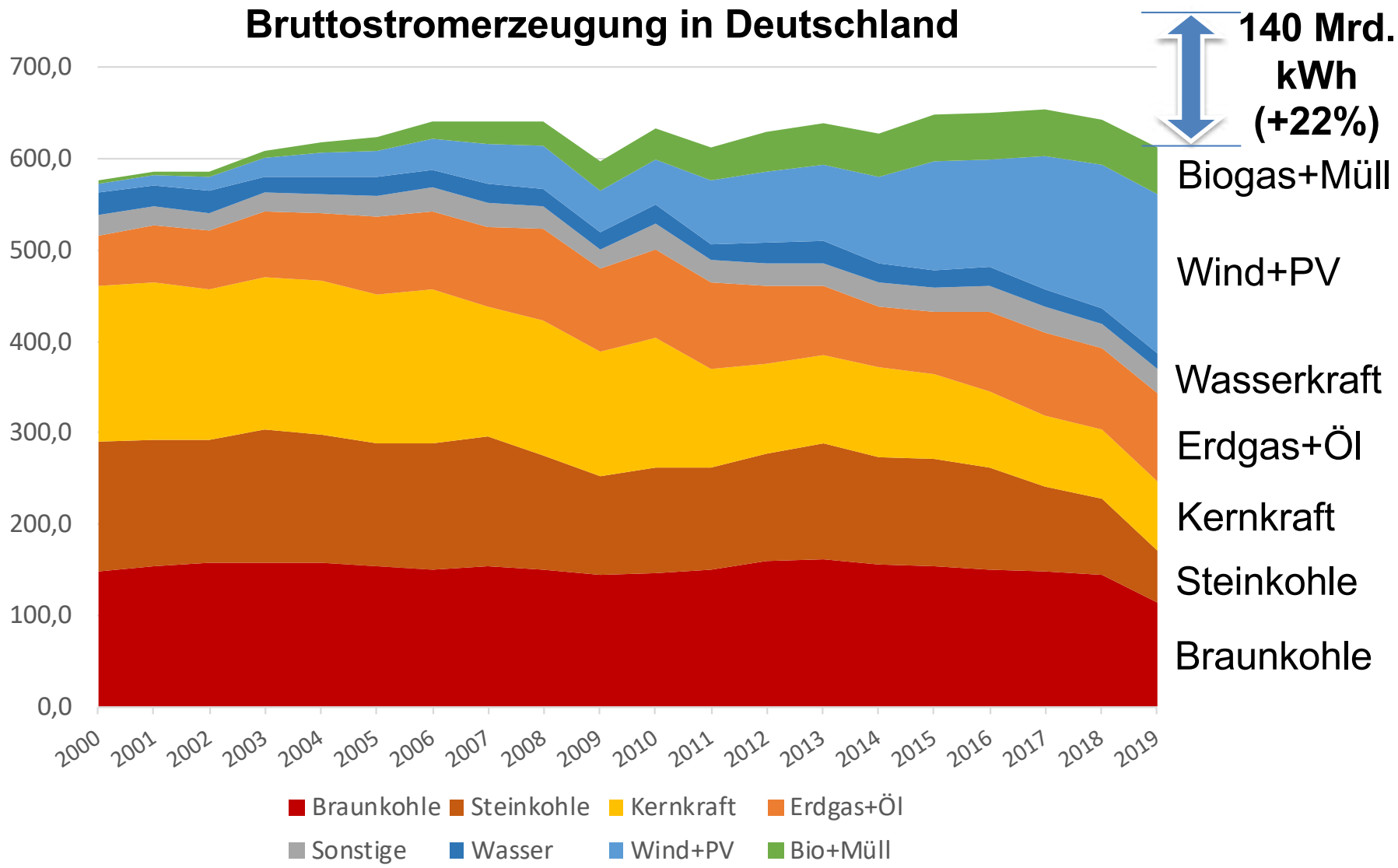
Energieversorgung
Woher kommt der ganze Strom?

- **630 Mrd. PKW-km** wurden 2017 in Deutschland gefahren (Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt)
- Der mittlere Energieverbrauch eines BEV wird mit **20 kWh/100 km** abgeschätzt und der Ladewirkungsgrad (Elektronik, Batterie) mit **90%**
- Daraus ergibt sich ein **Strombedarf von 140 Mrd. kWh** pro Jahr, um alle in Deutschland angemeldeten PKW elektrisch zu betreiben

Bildquelle: Umweltbundesamt

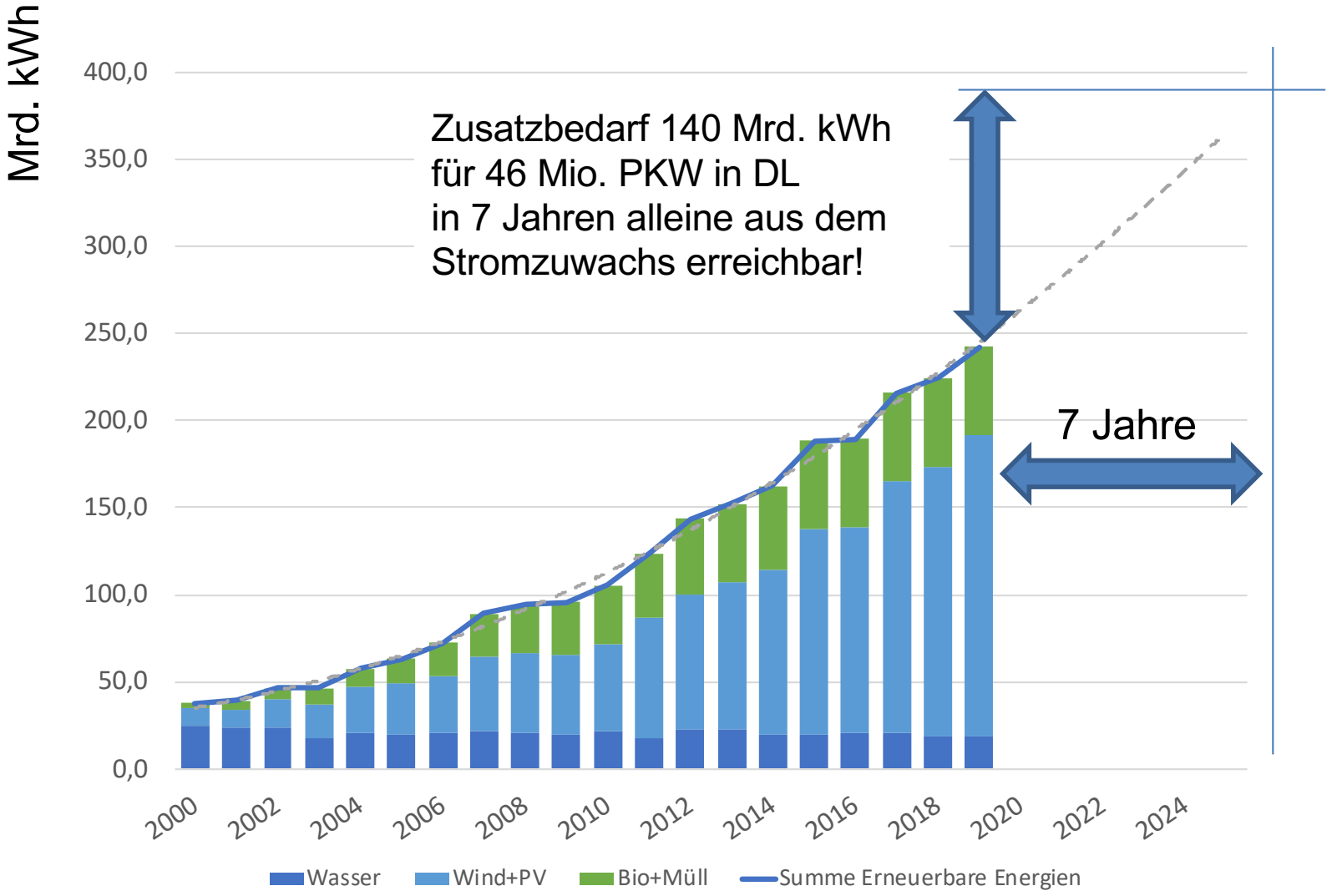
Energieversorgung

Woher kommt der ganze Strom?



Quelle: AG Energiebilanzen

Energieversorgung
Woher kommt der ganze Strom?



Quelle: AG Energiebilanzen

Netzstabilisierung durch lokale Erzeugung und lokalen Verbrauch

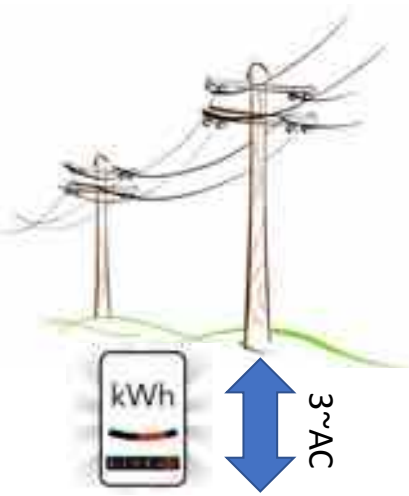
DC

Solarwechselrichter

3~AC

Batteriespeicher

3~AC



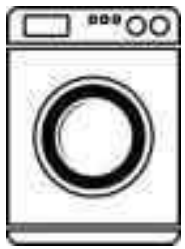
3~AC

Ladestation Elektroauto

3~AC

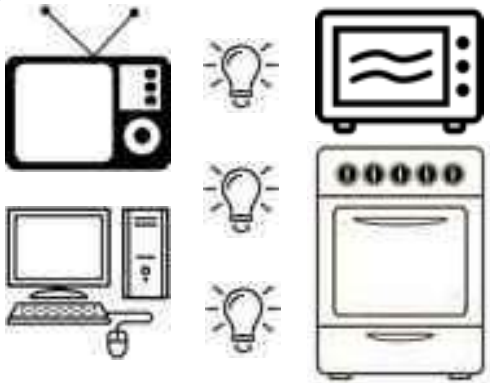
PV-gesteuerte Funksteckdose

1~AC



1~AC

Haushaltsverbraucher



Ladeinfrastruktur
Anzahl Ladepunkte und Kosten

Infrastruktur im Jahr 2050 für 42 Mio. BEV	Anzahl Ladepunkte	Art	CAPEX
Privat (eigener Parkplatz)	11 Mio.	Überwiegend langsam (AC 3,7 und 11 kW, vereinzelt 22 kW)	13 Mrd. €
Privat (geteilter Parkraum, z.B. Mehrfamilienhaus)	20 Mio.	Überwiegend langsam (AC 3,7 und 11 kW, vereinzelt 22 kW)	28 Mrd. €
Arbeitgeber	2 Mio.	Mittelschnell (11 und 22 kW AC)	3 Mrd. €
Allgemein zugängliche Einrichtungen (Einkaufszentren, Freizeit- und Kultureinrichtungen)	2 Mio.	Erhöht (22 kW AC und 50 kW DC)	17 Mrd. €
Nahverkehrsraum (Laternenparker in Wohngebieten)	2 Mio.	Erhöht (22 kW AC und 50 kW DC)	19 Mrd. €
Fernverkehrsraum (Autobahnraststätte)	20.000	Schnell (≧ 50 KW DC)	0,5 Mrd. €
Summe	**37 Mio.**		80 Mrd. €

Zum Vergleich: Jährliche Einnahmen aus KFZ-Steuer rund 9 Mrd. €, aus Mineralölsteuer rund 41 Mrd. €

Auer, J., Heinz, D., Jochem, P., Doppelbauer, M., *Scope and Total Investment for a Charging Infrastructure for 100% Market Share of BEVs in Germany by 2050*, 32nd Electric Vehicle Symposium (EVS32), Lyon, France, 2019

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

Moderne Elektrofahrzeuge

... aber lieber (nicht!) mit Wasserstoff?

BEV
20 kWh /100km

Tanken
10% Verlust
LE+Batterie
22 kWh

Private Erzeugung
22 kWh

Stromnetz
5% Leitungsverluste
23 kWh

Dezentrale Erzeugung
23 kWh

FCEV
1,2 kg/100km
40 kWh/100km

Tanken CH2
12% Verlust
GH2 → CH2 (700 bar)
45 kWh

Elektrolyseur
Wirkungsgrad 55%
83 kWh

Transport LH2
5% Abdampfung
48 kWh

Lokale Erzeugung
83 kWh

Verflüssigung
36% Verlust
GH2 → LH2 (- 253°C)
75 kWh

Elektrolyseur
Wirkungsgrad 55%
136 kWh

Dezentrale Erzeugung
136 kWh

Grüner Wasserstoff ist CO_2-frei!

... leider nicht - der Anlagenbau braucht Energie!

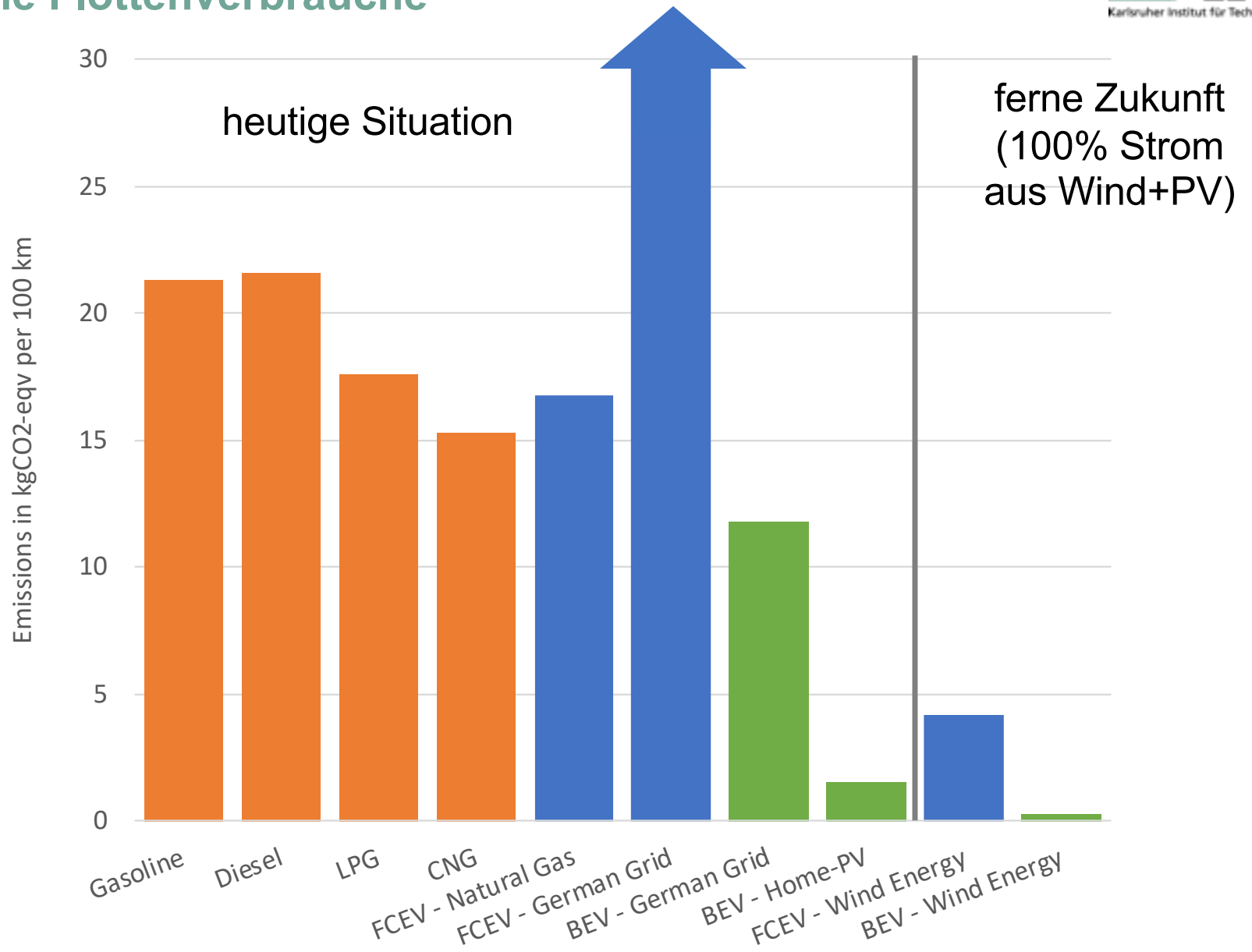
Regenerativ hergestellte elektrische Energie ist nicht emissionsfrei!

	Emissionen in $g_{CO2\text{-}eqv}/kWh_{el}$ mit Anlagenbau
Photovoltaik	67
Laufwasserkraftwerk	2,7
Wasserspeicherkraftwerk	25
Windkraft onshore	10,5
Windkraft offshore	6
Biomasse fest	74
Biomasse flüssig	204
Geothermische Energie	183

Source: Climate Change 37/2019, *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger*, Umweltbundesamt, November 2019

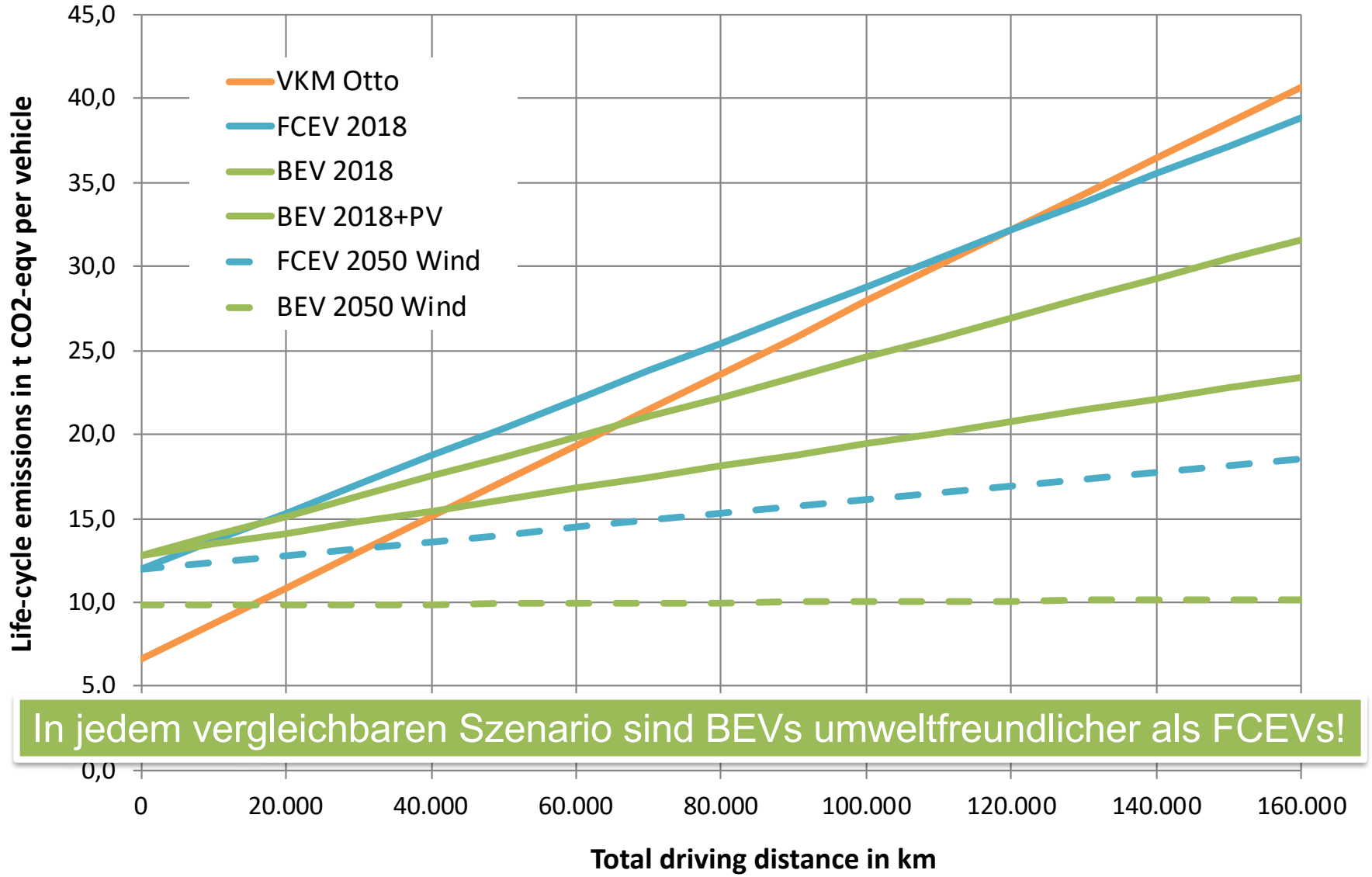
Well-to-Wheel Analyse

Typische Flottenverbräuche



Lebenszyklusanalyse

Moderne Batterien sind nicht zu toppen



In jedem vergleichbaren Szenario sind BEVs umweltfreundlicher als FCEVs!

Energieerzeugung
Energieverbrauch für alle Pkws in Deutschland

47 Mio. Pkws in Deutschland
631 Mrd. km pro Jahr

Mittlerer Strombedarf ab Windpark pro Auto pro 100 km:

BEV
23 kWh/100km

FCEV
136 kWh/100km

Jährlicher Strombedarf ab Windpark für alle Pkw:

BEV
140 Mrd. kWh

FCEV
860 Mrd. kWh

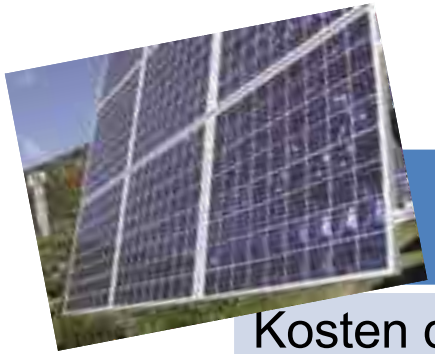
Heutige Nettostromproduktion (zum Vergleich):

540 Mrd. kWh

Energieerzeugung
Wasserstoff aus Afrika?!

Image source: https://de.wikipedia.org/wiki/Alice_Springs#/media/Datei:Alice_Springs,_2015_(01).JPG

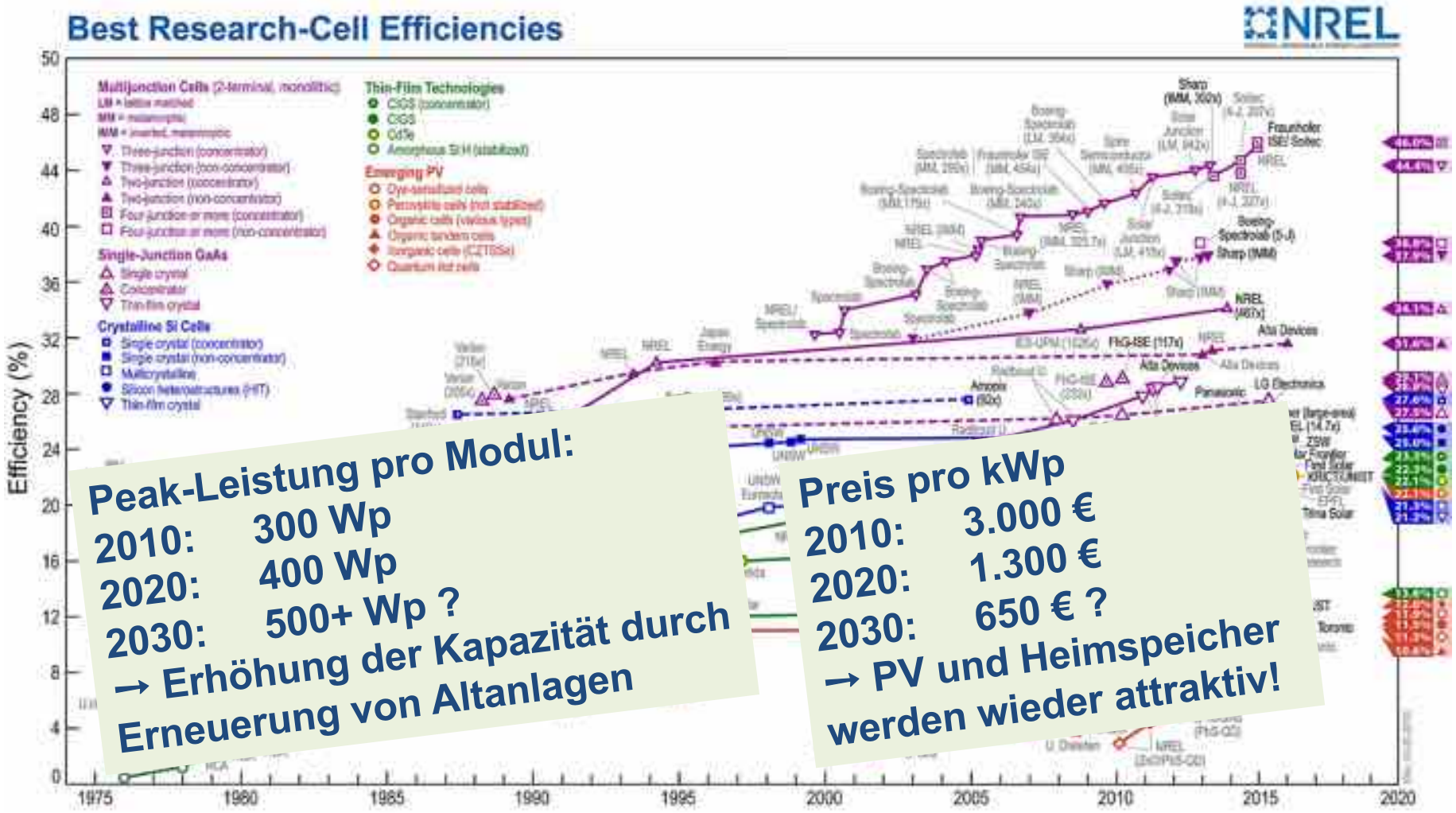
Energieerzeugung
Wasserstoff aus Afrika?!



	Solarfeld in Mosbach	Solarfeld in Alice Springs
Kosten der Panels und der Elektronik	gleich (kommt aus China)	
Jährliche Produktion pro kWp	1.000 kWh	1.800 kWh
Verfügbare Energie am BEV	**900 kWh**	-
Elektrolyse extra $	-	1.000 kWh
Verflüssigung extra $	-	650 kWh
LH2 Transport nach Deutschland extra $	-	600 kWh
LH2 Verteilung in Deutschland extra $	-	600 kWh
Ladevorgang 700 bar	-	530 kWh
Brennstoffzelle	-	300 kWh
Verfügbare Energie am FCEV		**300 kWh**

Image source: https://de.wikipedia.org/wiki/Solarmodul#/media/Datei:Themis_8.JPG

Energieerzeugung
Wir machen unseren Strom selbst!

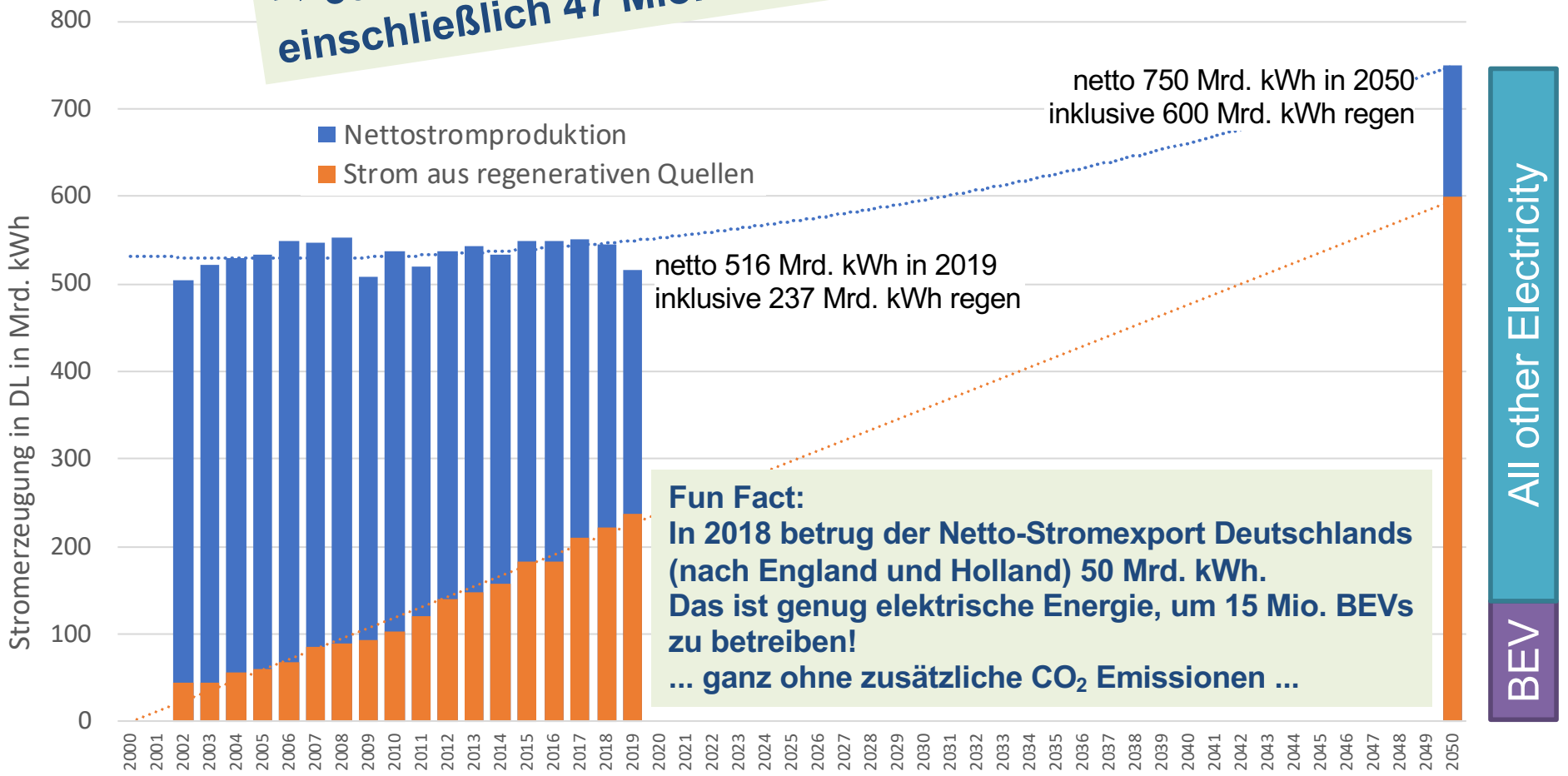


Source: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3APVeff(rev160420).jpg

Energieerzeugung

Wir machen unseren Strom selbst!

→ 80 % erneuerbare Stromproduktion in 2050 einschließlich 47 Mio. Elektroautos ist machbar!



Fun Fact:
In 2018 betrug der Netto-Stromexport Deutschlands (nach England und Holland) 50 Mrd. kWh.
Das ist genug elektrische Energie, um 15 Mio. BEVs zu betreiben!
... ganz ohne zusätzliche CO_2 Emissionen ...

Moderne Elektrofahrzeuge
Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs)

Daimler Brennstoffzellen-Stack im F-Cell (2019)

200 bar Turbolader zum
Pumpen von Sauerstoff

Brennstoffzelle mit Nebenaggregaten benötigt so viel Platz wie ein großer Dieselmotor, hinzu kommt ein aufwändiger und sehr großer Tank

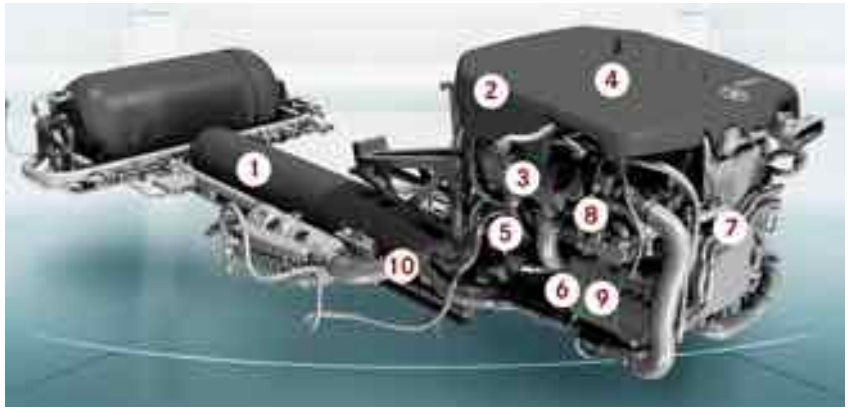
→ Weniger Platz im Auto als in konventionellen Fahrzeuge

→ Deutlich schlechtere Raumnutzung als BEVs

Bildquelle: Daimler AG

Moderne Elektrofahrzeuge
Oder doch lieber (nicht!) mit Wasserstoff?

> 50 Jahre Entwicklung
Brennstoffzellen-PKW



15 Jahre Entwicklung
BEV mit Lithium-Ionen Akku

	Daimler F-Cell (2019)	**Tesla Model 3 RWD LR**
Abmessungen (LxBxH)	4,67 m x 1,89 m x 1,65 m	4,69 m x 1,85 m 1,44 m
Reichweite	**430 km NEFZ** + 50 km aus der Batterie	**560 km WLTP**
Mehrgewicht GLC 2130 kg – (EQC 2425 kg – EQC-Batterie 650 kg)	**355 kg** für H2-System	**480 kg** für die Batterie
Mehrgewicht pro 100 km Reichweite	**83 kg**	**86 kg**

Der „CO_2-Rucksack“ bei der Produktion ist annähernd proportional zum Mehrgewicht
➞ Der Gewichtsnachteil der Batterie ist (fast) egalisiert!

Bildquelle: Daimler AG, Cardebater.com

Moderne Elektrofahrzeuge
Oder doch lieber (nicht!) mit Wasserstoff?

Abmessungen (LxBxH)	4,67 m x 1,86 m x 1,63 m	4,69 m x 1,85 m 1,44 m
Preis (USA, Anfang 2019)	58.300 US$	43.000 US$
Motorisierung	163 PS, 179 km/h max	287 PS, 233 km/h max
Tank	6,3 kg CH2 in drei Tanks	75 kWh Batterie
Reichweite nach EPA	370 Meilen	325 Meilen (12% weniger)
Gesamtgewicht	**1.889** kg	**1.726** kg
Verbrauch nach EPA	1,06 kgH2/100km **35** kWh/100km	**14,4** kWh/100km
Strombedarf und Invest bei lokaler Produktion	**73** kWh/100km* **2,8 Mio. €** Tankstelle 2019	**16** kWh/100km* **1.000 €** für Wallbox 2019
Strombedarf bei Off-Shore Windpark	**127** kWh/100km**	**17** kWh/100km**

* 88% H2-Kompression auf 700 bar, 55% Elektrolyse
ca. 1,5 Stunden Produktionszeit für einen Tankvorgang
** 90% Transportverluste, 64% Verflüssigung

* 90% Ladewirkungsgrad
** 95% Netzdurchleitung

Moderne Elektrofahrzeuge
Oder doch lieber (nicht!) mit Wasserstoff?

Bild: 40t LKW für LH2-Transport

Bild: 40t LKW für CH2-Transport

Kapazität pro 40t LKW:

Energie-träger	Kapazität pro LKW	Anzahl betankbarer PKWs (mit je 500 km Reichweite)	
Super-Benzin	35.000 l (1)	1000 PKW (2)	1:1
LH2	3,2 t (3)	530 PKW (4)	1:2
CH2	0,35 t	58 PKW (4)	1:17

Selbst mit Flüssigwasserstoff (LH2) muss man die Transport- (Schiff, LKW) und Lagerkapazität (Großhandel, Tankstellen) gegenüber Benzin/Diesel etwa **verdoppeln**.

(1) Begrenzend ist hier die Zuladung, nicht das Tankvolumen
(2) Typischer Benzinverbrauch von 7 l/100km
(3) Mit 45.000 l Tank
(4) Typischer Wasserstoff-Verbrauch von 1,2 kgH_2/100km

Bildquelle: Linde AG, Air Liquide

Inhalt

Einleitung – Warum überhaupt Elektromobilität?

Technik – Wie funktioniert das?

Praxis – Was ist der aktuelle Stand (Laden, Reichweite, Fahrzeuge)?

Batterien – Die sind doch so umweltschädlich!

Lebenszyklus – Elektroautos sparen doch gar kein CO2!

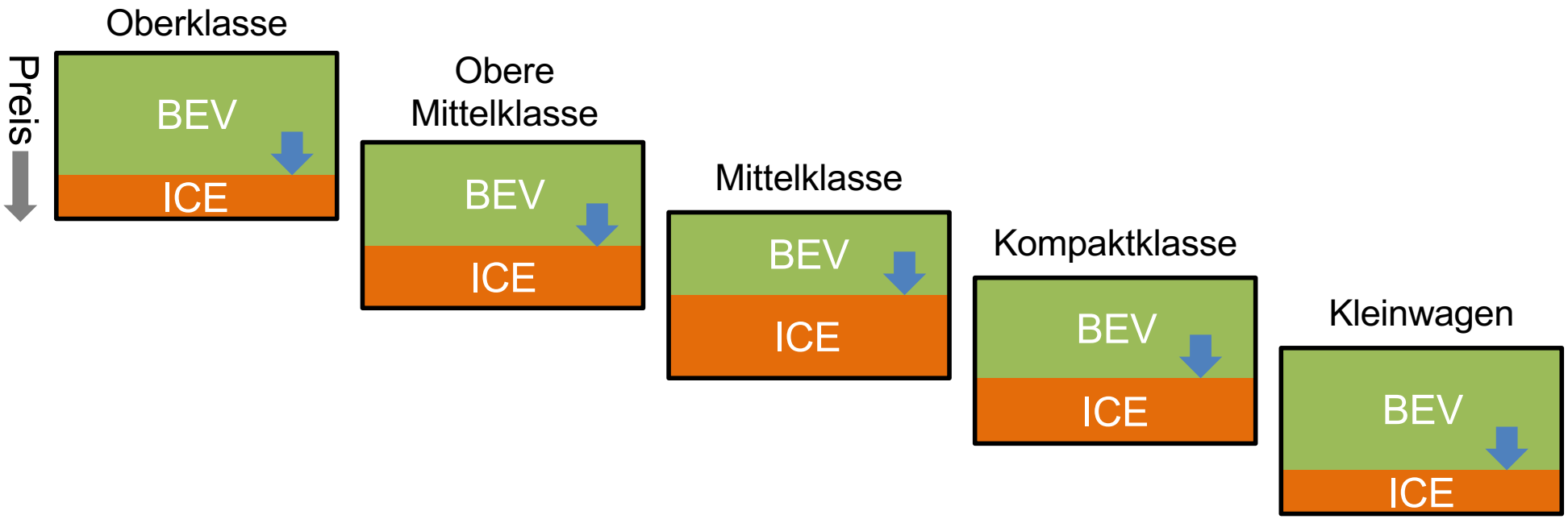
Infrastruktur – Elektromobilität geht doch gar nicht!

Wasserstoff – Steht die nächste Revolution bevor?

Ausblick – Wie geht‘s weiter?

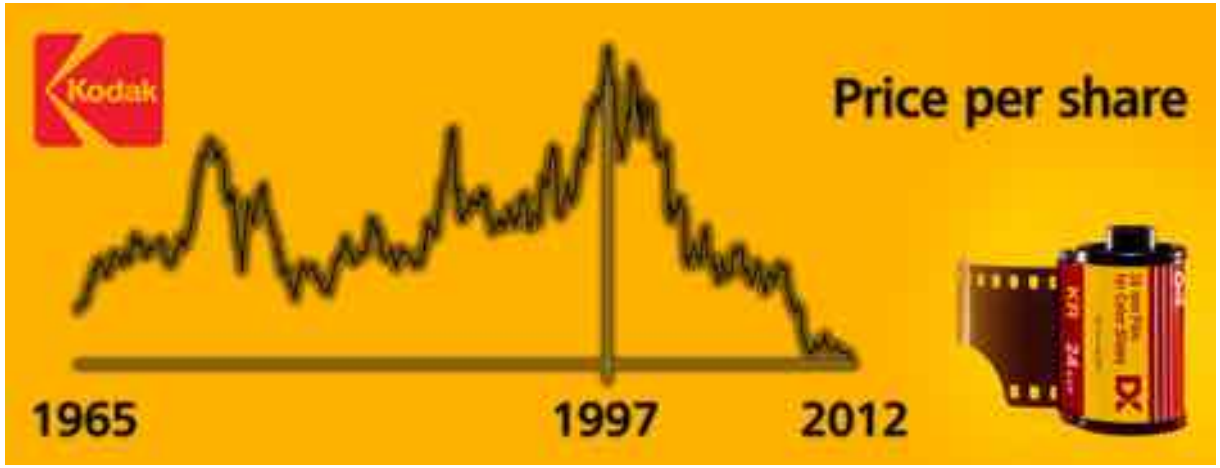
PKW 2.0
Disruptive Innovation

Durchschnittspreis Neuwagen in DL 2018: > 30.000 €



- BEVs werden mittelfristig jedes Marktsegment von oben (höchste Preise) aufrollen.
- Große Anteile BEV zuerst im Bereich Oberklasse und obere Mittelklasse (höhere Preise, große Reichweite) sowie bei Stadtautos (geringe Reichweite)
- Geringere Anteile BEV in der Mittelklasse (große Reichweite und preissensitiv)
- Für ICEs bleiben jeweils nur die Low-End Märkte
- Aufwändige Hybridfahrzeuge (PHEV, FHEV) verschwinden vom Markt, da zu teuer und zu wenige Vorteile gegenüber BEV

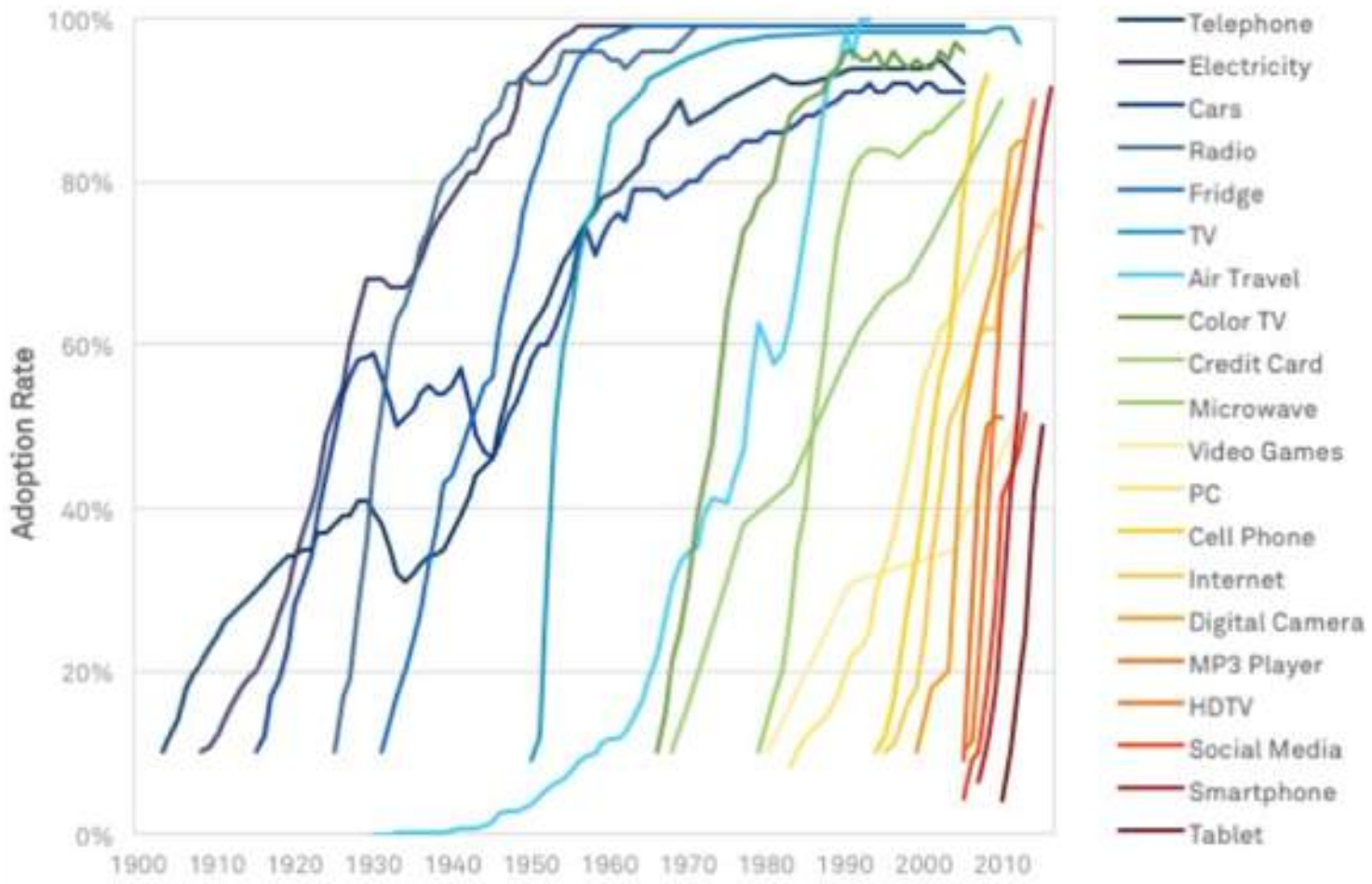
Kennen Sie die noch?



Der Niedergang setzte bei beiden ein,
als die Umsätze am höchsten waren
und sich beide unangreifbar wähnten…

Bildquellen: Nokia, M.Zellerhoff/wikimedia.org

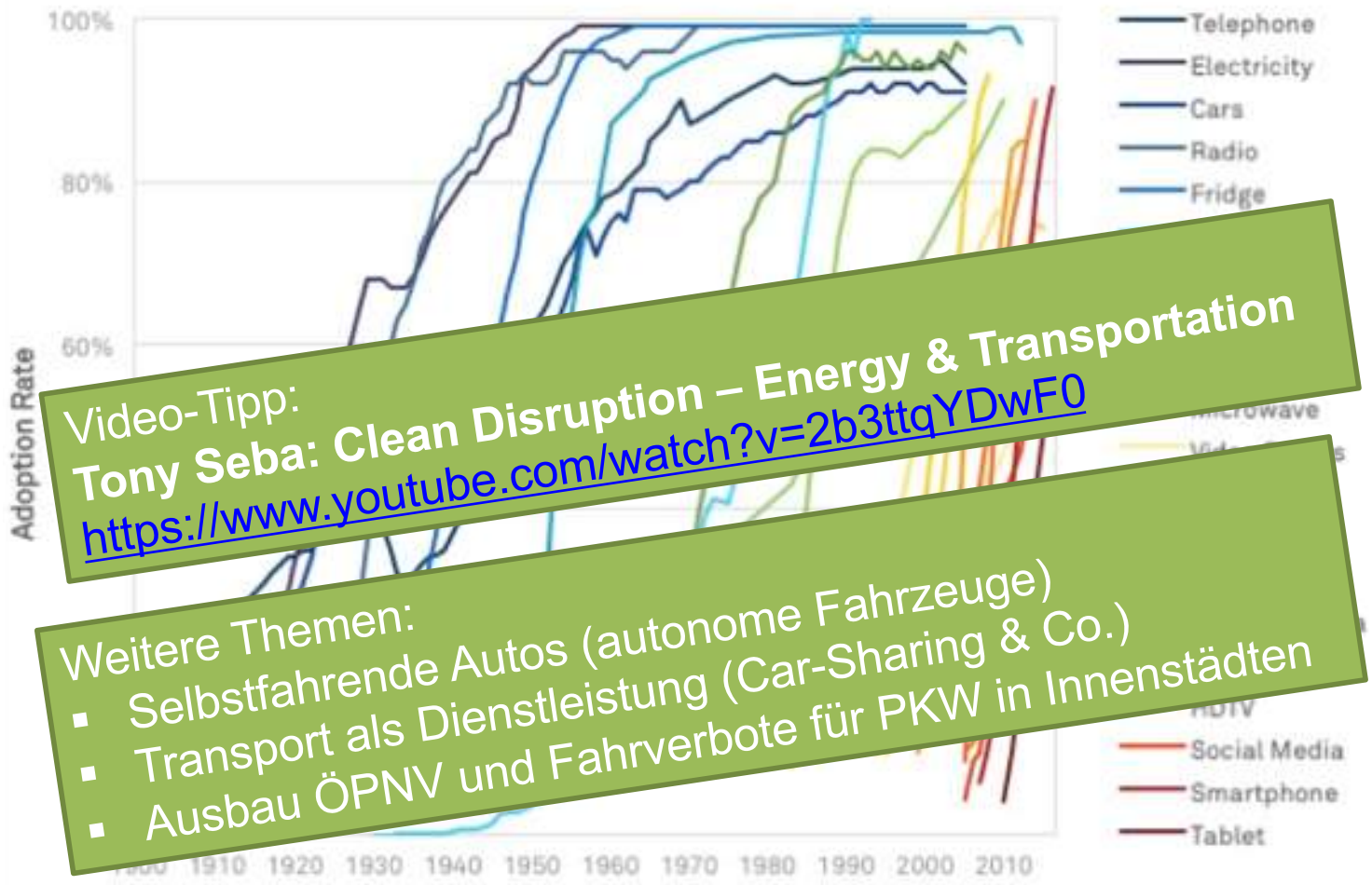
PKW 2.0
Disruptive Innovation



Innovation verläuft immer S-förmig, nie linear!
Wenn der Tipping-Point erst überschritten ist, geht es ganz schnell…

Quelle: Asymco, BlackRock

PKW 2.0
Disruptive Innovation



Video-Tipp:
Tony Seba: Clean Disruption – Energy & Transportation
https://www.youtube.com/watch?v=2b3ttqYDwF0

Weitere Themen:
- Selbstfahrende Autos (autonome Fahrzeuge)
- Transport als Dienstleistung (Car-Sharing & Co.)
- Ausbau ÖPNV und Fahrverbote für PKW in Innenstädten

Innovation verläuft immer S-förmig, nie linear!
Wenn der Tipping-Point erst überschritten ist, geht es ganz schnell…

Quelle: Asymco, BlackRock

PKW 2.0
Disruptive Innovation

Meine alte Prognosen aus 2017:

2017 Elektroautos (BEV) haben einen verschwindend geringen Marktanteil

2020 BEV mit **500 km Reichweite** werden von ersten Herstellern **preisgleich** zu konventionellen PKW angeboten

2023 BEV mit **500 km Reichweite** werden von vielen Herstellern **preisgleich oder billiger** als konventionelle PKW angeboten

2027 Alle großen Automobilhersteller fahren die Produktion von Otto- und Dieselmotoren massiv herunter, weil sich die Autos nicht mehr verkaufen

Schaun‘ mer‘ mal, wie der Kaiser immer sagte ☺

Werbeblock

Grundlagenbuch Elektromobilität erscheint im Sommer

Vielen Dank für Ihr Interesse – Fragen?