

Maximilian Fichtner

# Entwicklungen und Trends bei Batterien für mobile und stationäre Anwendungen

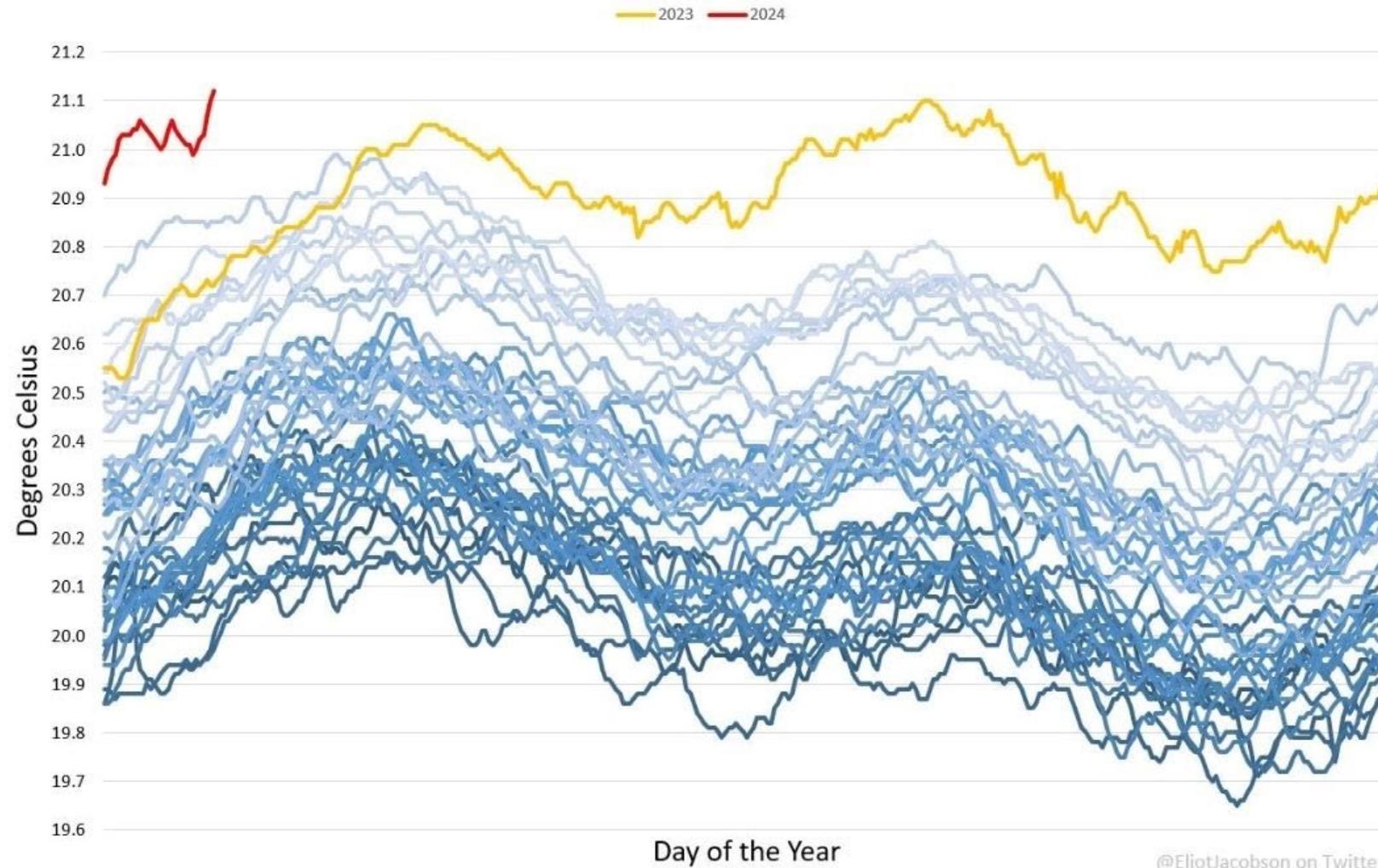
Energiegipfel Isny

16.3.2024

# Die Erwärmung beschleunigt sich

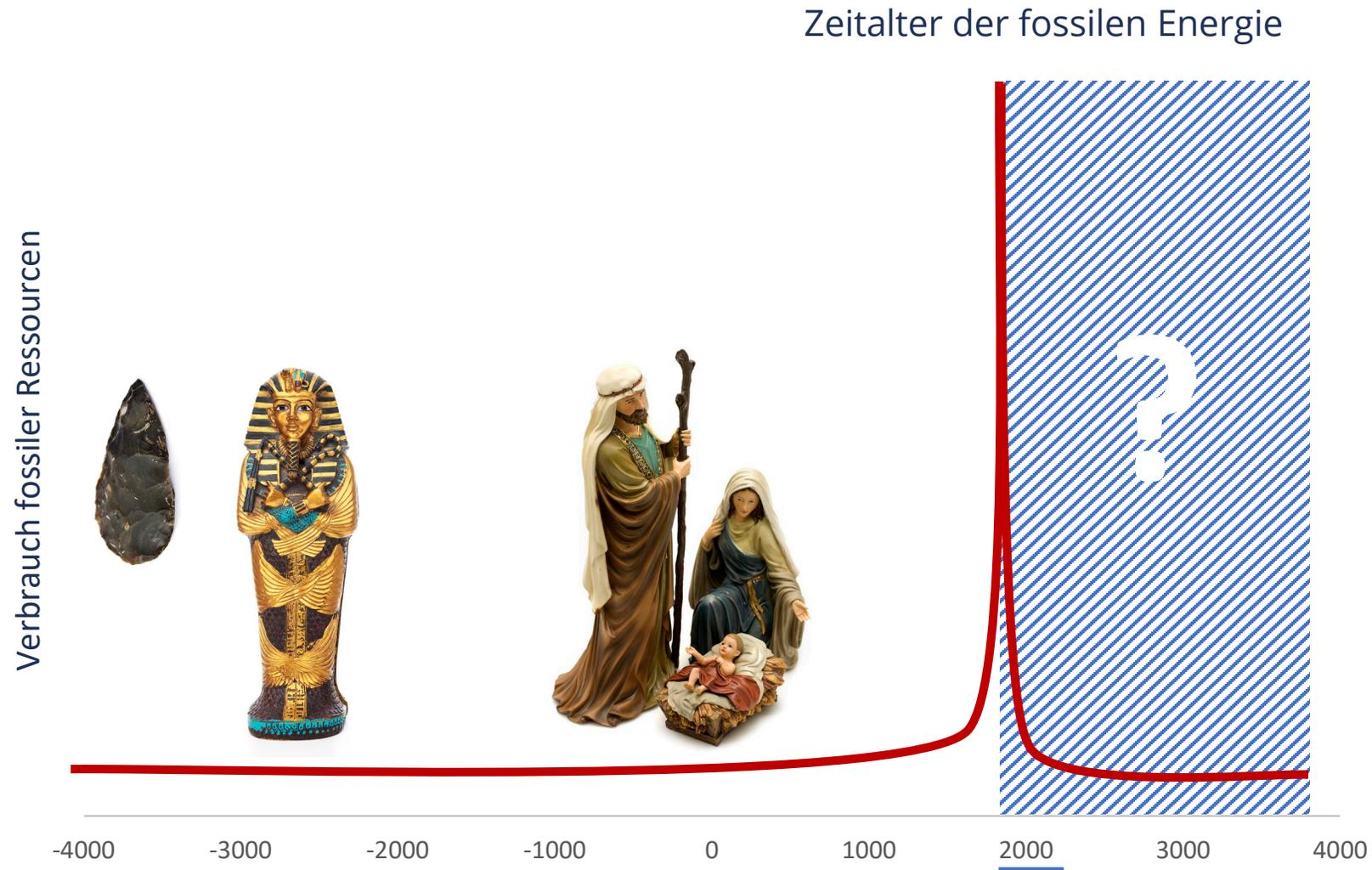
## Global Sea-Surface Temperatures (60°S-60°N): 1982-2024

Data: [https://climateresearcher.org/clim/sst\\_daily/json/oisst2.1\\_world2\\_sst\\_day.json](https://climateresearcher.org/clim/sst_daily/json/oisst2.1_world2_sst_day.json)

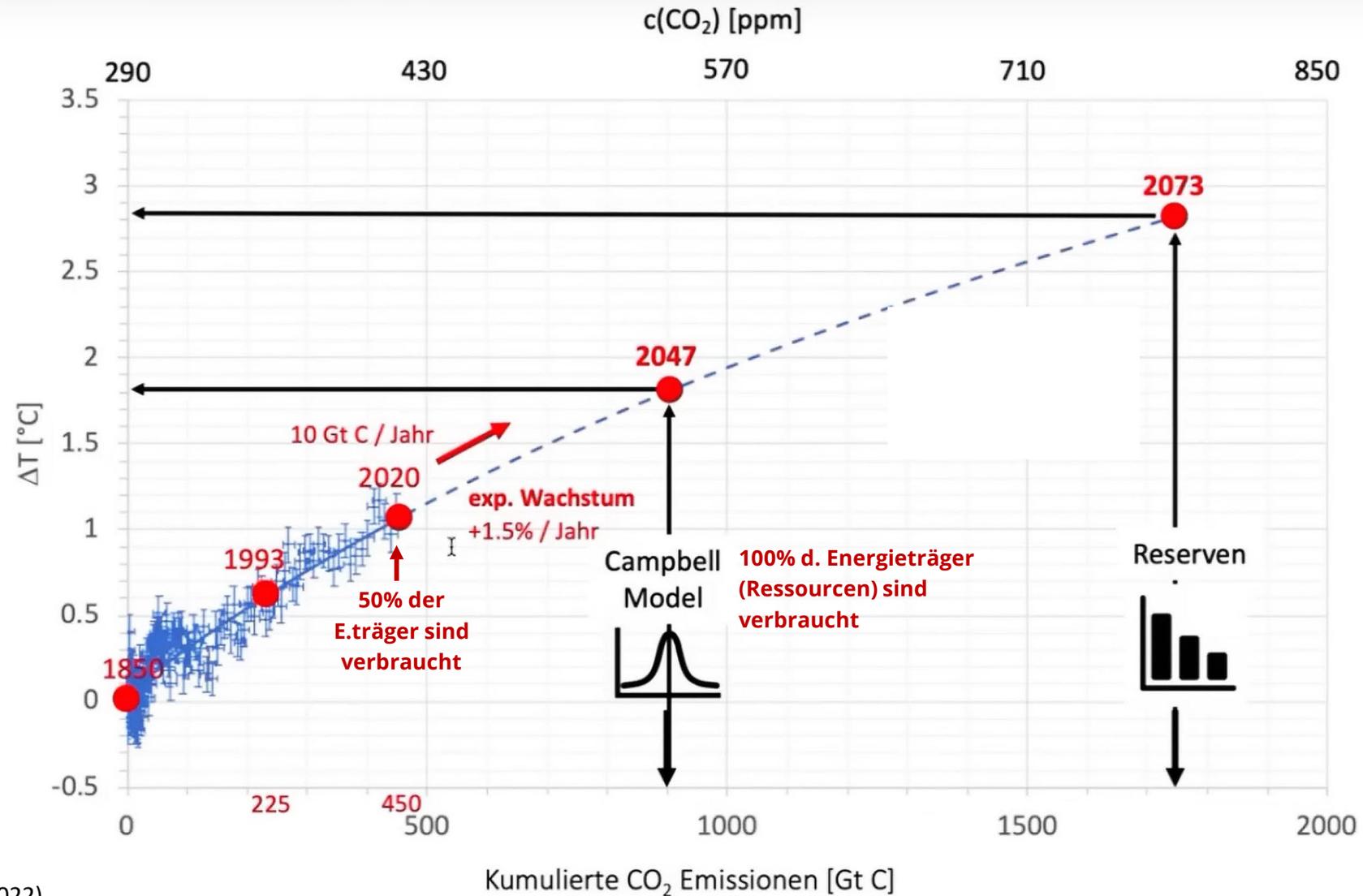


@EliotJacobson on Twitter

# Verbrauch fossiler Energieträger auf historischer Zeitskala...



# Konkret: Haben wir „nur“ ein CO<sub>2</sub>-Problem? Wie lange reichen die fossilen Reserven?



📖 A. Züttel (2022)

📖 C.J. Campbell, Sci. Am. (1998)

📖 U. Bardi, Energy Res. Soc. Sci (2019)

# Speicherung Erneuerbarer Energie



stationär / heim



(www.bauen.de)

portabel



(www.hp.com)

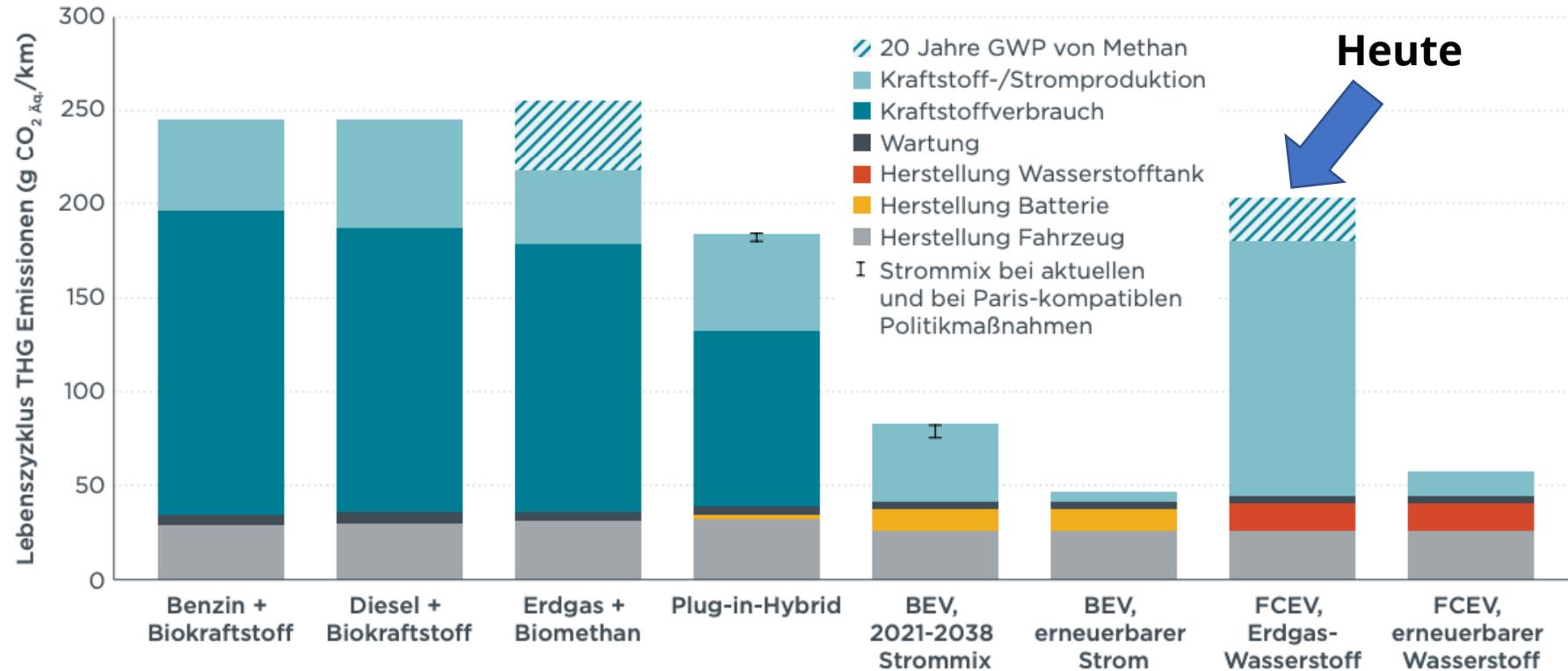
mobil



(www.mungali.com)

# Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsarten über den Lebenszyklus

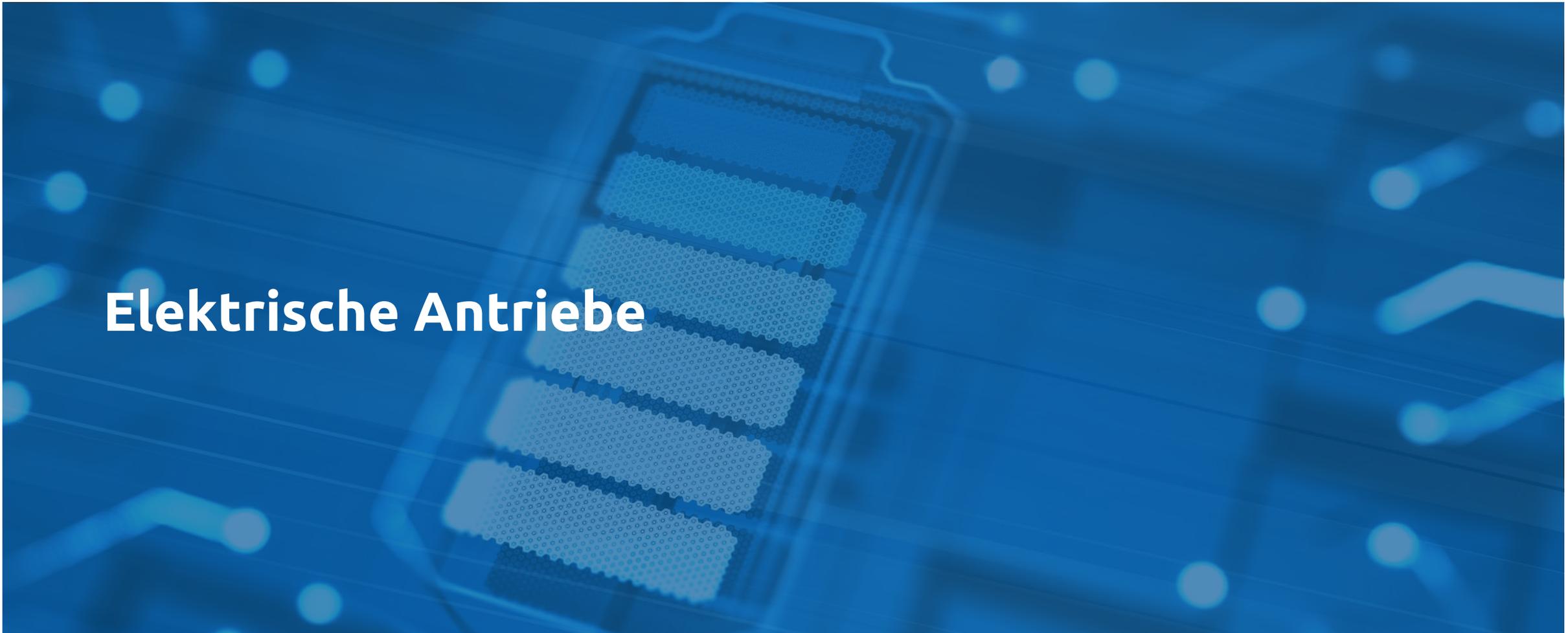
A GLOBAL COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC PASSENGER CARS



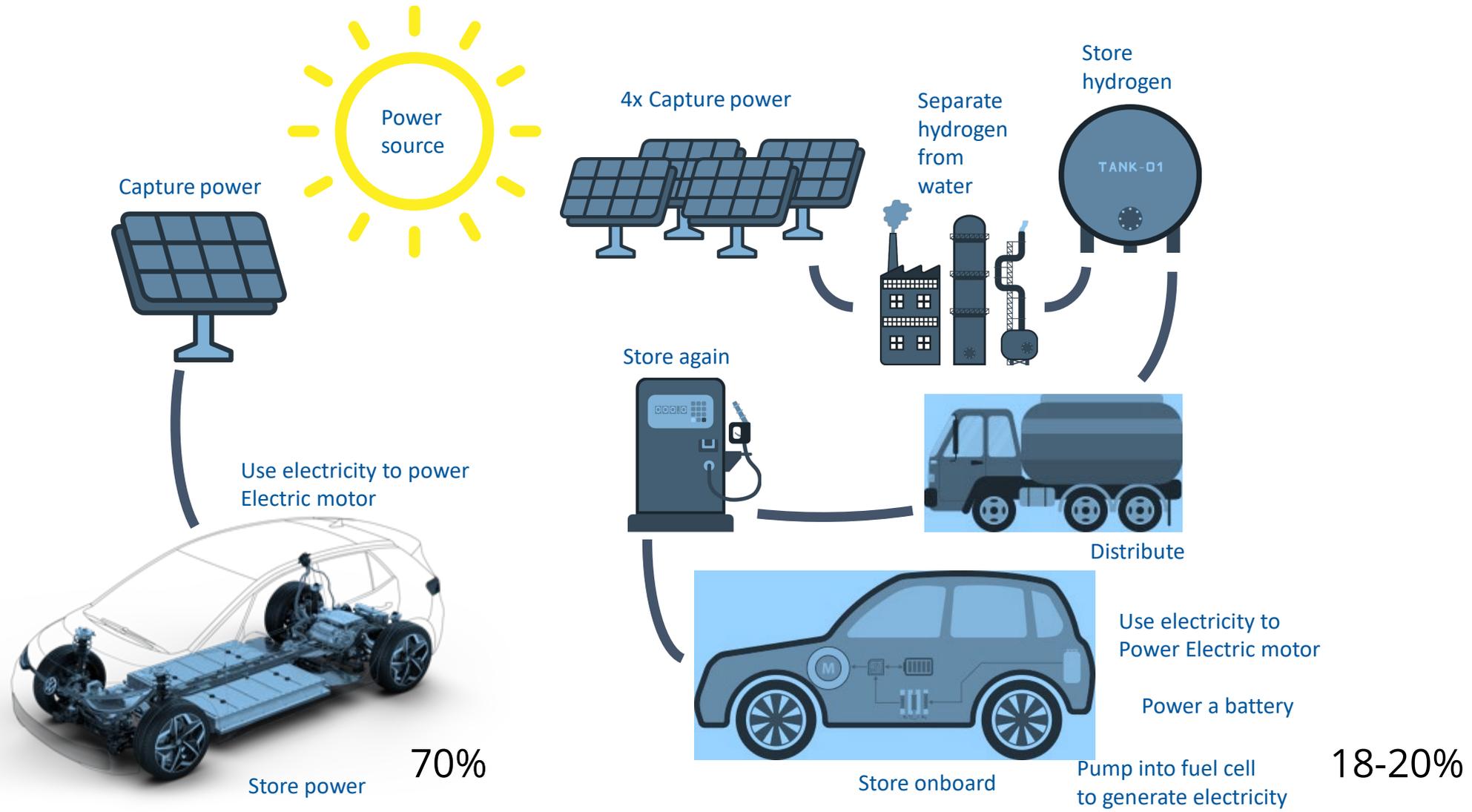
**Abbildung 1.** Lebenszyklus-Treibhausgas (THG)-Emissionen von durchschnittlichen neuen Benzin-, Diesel- und Erdgasfahrzeugen, Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeugen, Batterie-Elektrofahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) in der Kompaktklasse, die 2021 in Europa zugelassen werden. Die Fehlerbalken zeigen die Differenz zwischen der Entwicklung des Strommix gemäß der aktuellen Politikmaßnahmen (die höheren Werte) und dem, was erforderlich ist, um das Pariser Klimaabkommen zu erreichen. GWP = Treibhauspotenzial.

Quelle: ICCT, July2021

# Elektrische Antriebe



# Elektrische Antriebe als effizienteste Art des Antriebs



Batterieelektrischer Antrieb

H<sub>2</sub> Antrieb mit Brennstoffzelle

# Antriebsarten im Vergleich / Energiebedarf

3 MW  
2000 h/a

Energiequelle	Energieträger	Antrieb	lokal emissionfrei	Eine 3-MW-Windkraftanlage versorgt... (Kleinwagen mit einer Laufleistung von 20.000 km p.a.)
 z.B. 1 Windkraft- anlage 3 Megawatt 2000 Stunden pro Jahr	Strom	 Elektroauto mit Batterie (BEV)	ja	 1600 Fahrzeuge
	Wasserstoff	 Elektroauto mit Brennstoffzelle (FCEV)	ja	 600 Fahrzeuge
	eFuel	 Auto mit Verbrennungs- motor (ICE)	nein	 250 Fahrzeuge

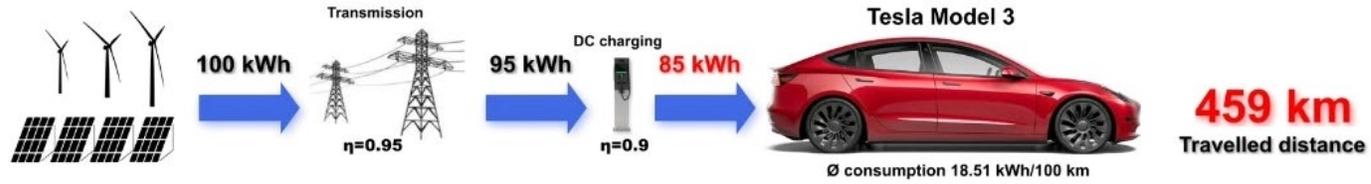
**Strom:**  
**1600 PKW**

**Wasserstoff:**  
**600 PKW**

**e-Fuel:**  
**250 PKW**

Quelle:  
VDE

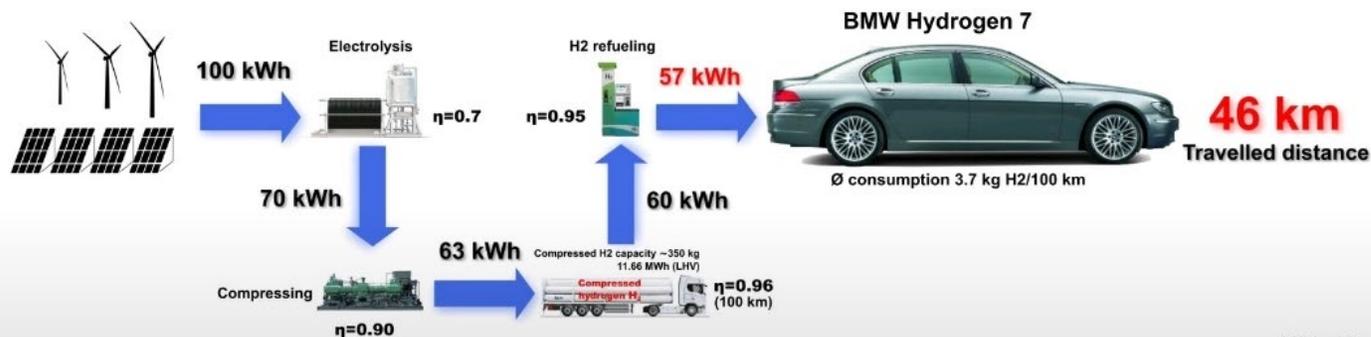
# Vergleich BEV mit H2-FCEV und H2-Verbrenner-PKW



BEV

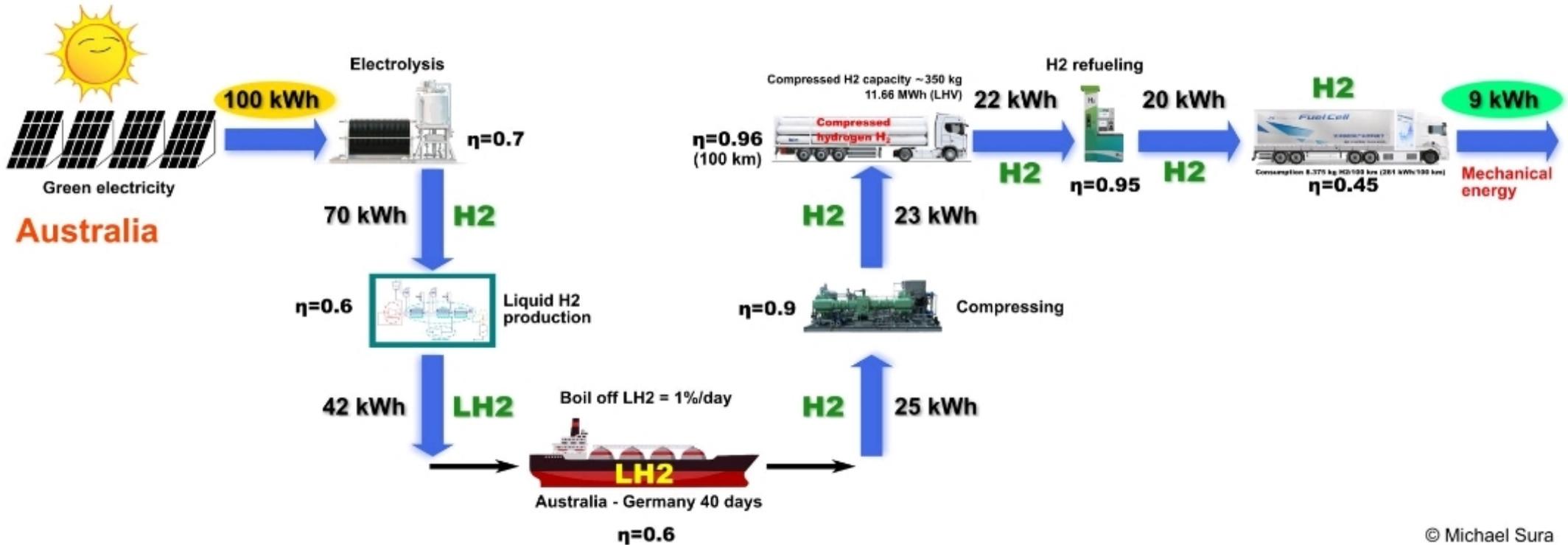
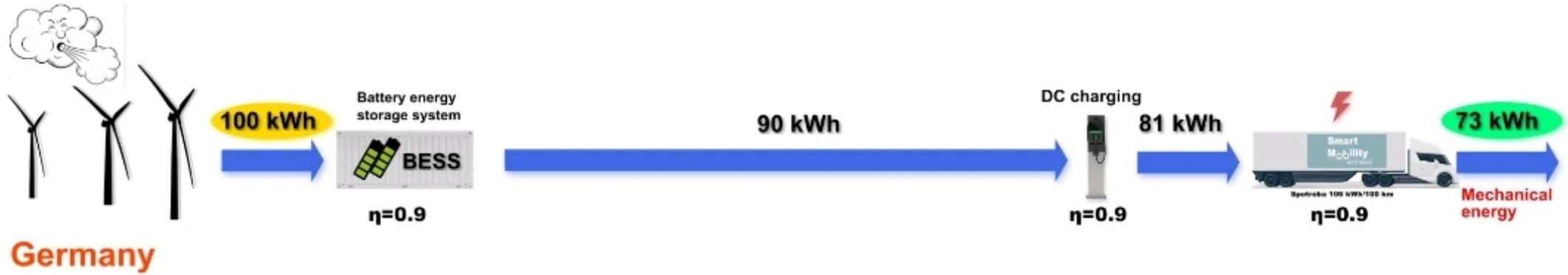


FCEV

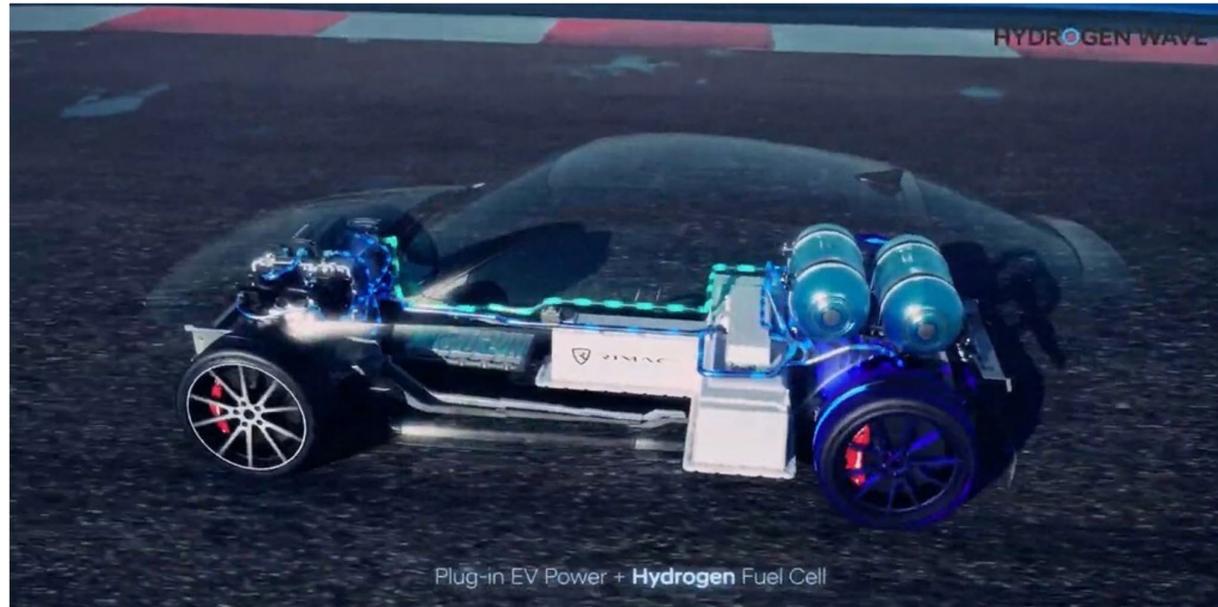


H2-Verbrenner

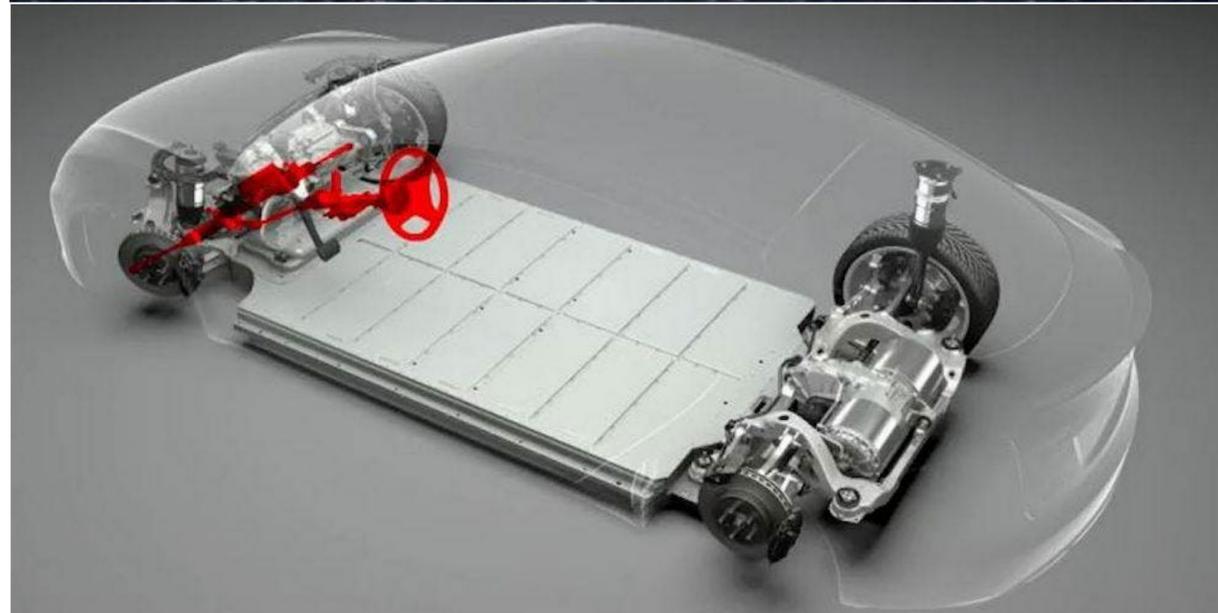
# LH<sub>2</sub> aus sonnenreichen Gegenden vs. lokale elektrische Lösung



Unterschiede  
Brennstoffzellenfahrzeug  
/ Batteriefahrzeug



FCEV  
(Fuel Cell Electric Vehicle)



BEV  
(Battery Electric Vehicle)

# Unterschiede Verbrenner / E-Antrieb

320 PS



Bewegte Teile Verbrenner:  
ca. 1300

560 PS



Bewegte Teile e-Antrieb:  
ca. 40

Daten für USA im Jahre 2020 (US Straßenwacht und Versicherer)

Fahrzeugtyp	Absolute Anzahl Brände <sup>[1]</sup>	Brände pro Mrd. gefahrene km	relative Anzahl bewegter Teile <sup>[1-3]</sup>
Verbrenner	199533	<b>94</b>	28
Batterieelektrisch	52	<b>3-4</b>	1

Studie der EMPA zur Auswirkung von Fahrzeugbränden bei Batterieauto und Verbrenner<sup>[4]</sup>

- Hitzeentwicklung vergleichbar (hoher Kunststoffanteil im PKW, Kraftstoff)
- Abtransport emittierter Luftschadstoffe: Tunnel unkritisch; Garage/Parkhaus: kritisch
- Löschwasser ist belasteter bei BEV

## References:

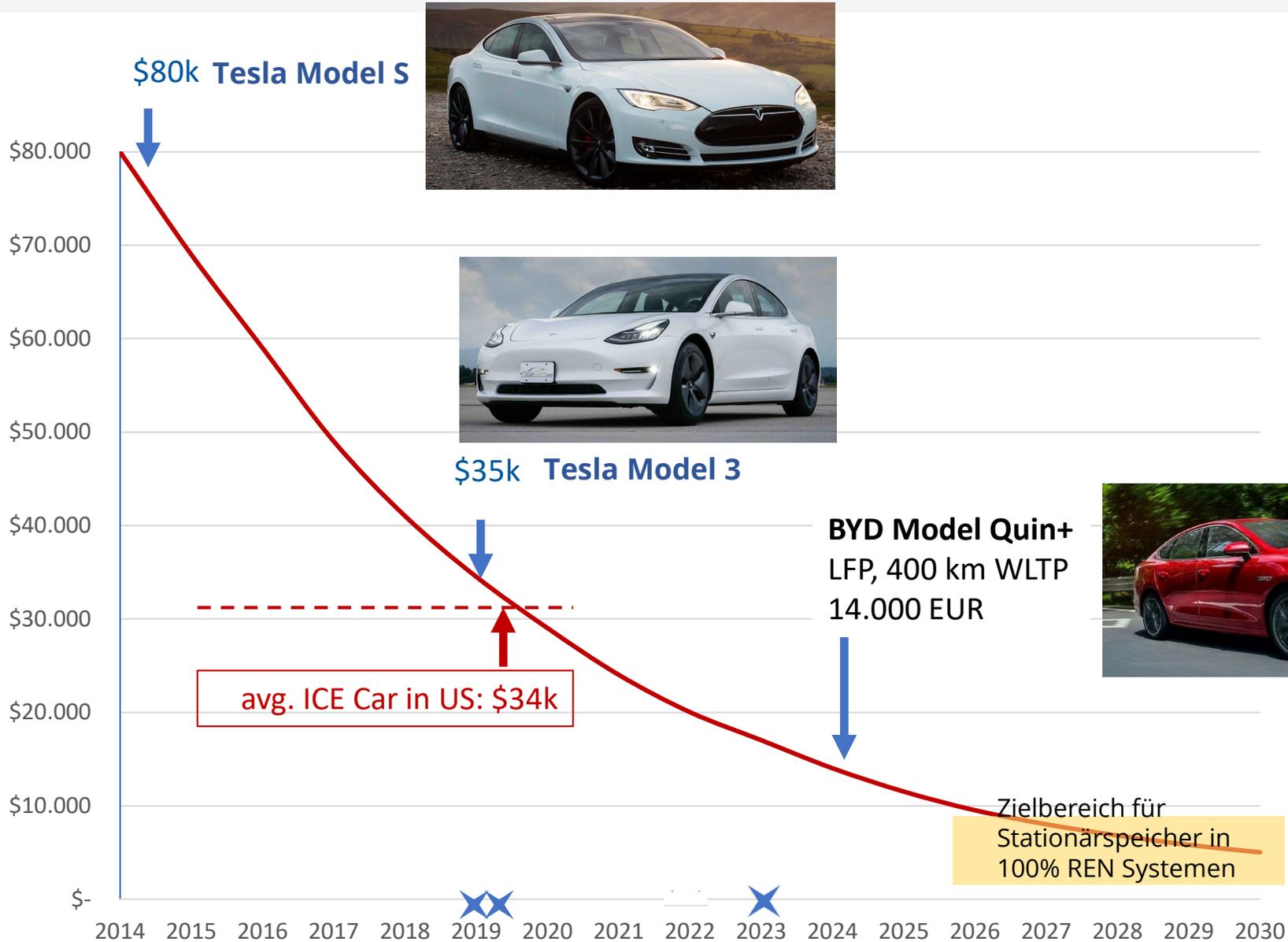
[1] <http://www.kbb.com/car-news/study-electric-vehicles-involved-in-fewest-car-fires/>

[2] D. Golke, Y. Zhou, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory 2021, doi: 10.2172/1785706

[3] Federal Highway Administration, Traffic Volume Trends 2020

[4] [www.empa.ch/de/web/s604/brandversuch-elektroauto](http://www.empa.ch/de/web/s604/brandversuch-elektroauto)

# Kostenkurve für Batteriefahrzeuge mit 350-400 km Reichweite



## Vergleich H2 PKW:

Hyundai Nexo (500 km)  
80 TEUR im Verkauf  
120 TEUR in der Produktion

## Verbrauch:

18 EUR/100 km in D



Vorhersage basiert auf einer einfachen cost-curve Analyse aus dem Jahre 2014 !



Mit dem **Qin Plus EV** bringt BYD eine vollelektrische Limousine für – je nach Ausstattung – **14.000 bis 18.000 Euro** und Reichweite von **420 bis 510 Kilometern** mit dem größeren 57,6-kWh-Akku.

(Ref.: <https://image.springnews.co.th>)

# Neue Batteriefahrzeuge für unter 30.000 EUR ab 2024

VINFAST  
VF 6



27.220 €

OMODA 5



22.000 €

Ford  
Puma EV



25.000 €

Skoda  
Elroq



24.000 €

32.900 €

Citroën  
ë-C3



18.070 €

HYUNDAI  
Casper EV



Quelle: ADAC, 2024

# Ranking derzeitiger Großspeicher im Stationärbetrieb (Li-Ionen Technologie)

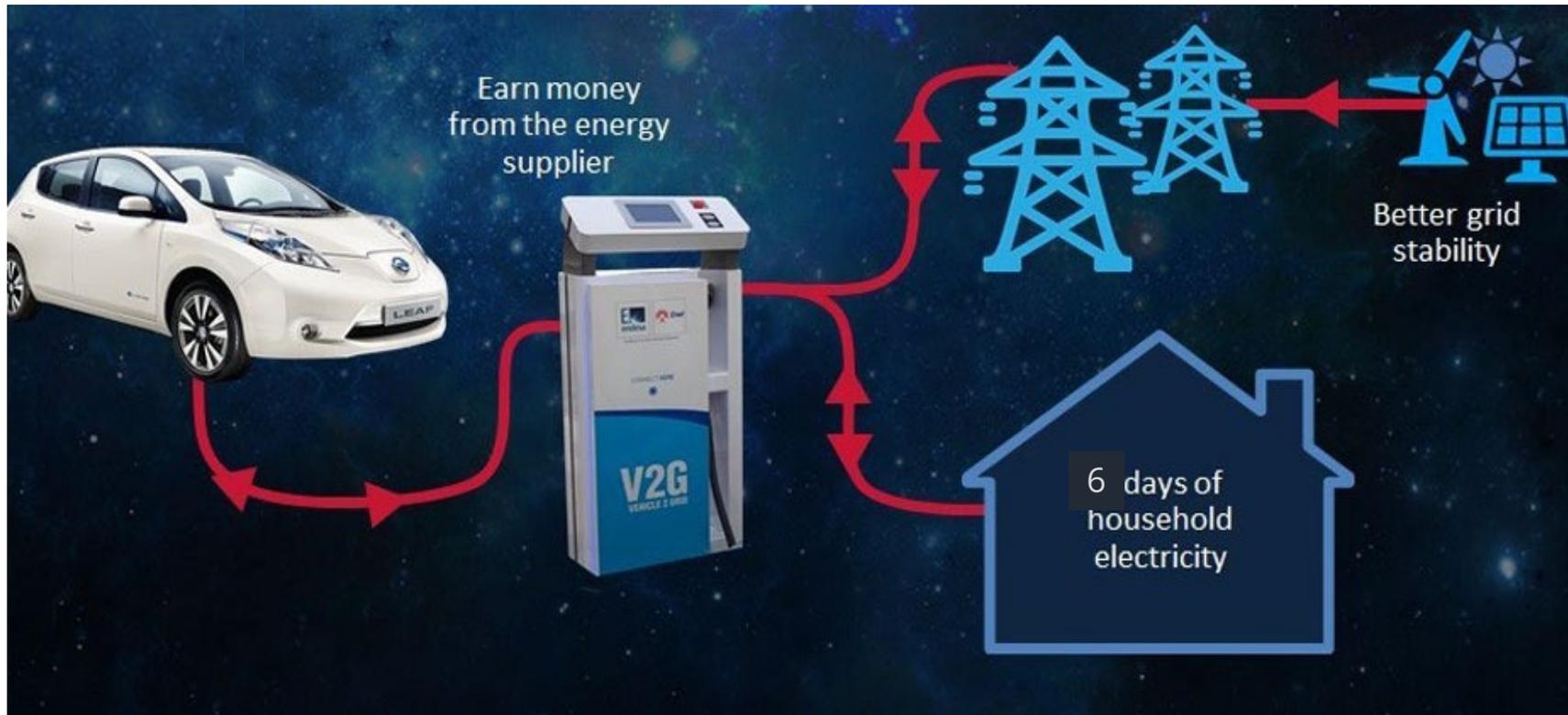
Ranking	Plant	Location	max. Power	Capacity
1	Moss Landing Energy Storage Facility	Monterey County, USA	<b>400 MW (1500 MW)</b>	<b>1.600 MWh (6 GWh)</b>
2	Hunter Valley	Newcastle, S. Australia	<b>1200 MW</b>	<b>4.8 GWh</b>
3	Manatee Energy Storage Center	Manatee County, FL/USA	<b>409 MW</b>	<b>900 MWh</b>
4	Alamitos Energy Center	Long Beach, USA	<b>100 MW</b>	<b>400 MWh</b>
5	Buzen Substation	Fukoka, Japan	<b>50 MW</b>	<b>300 MWh</b>
6	Gateway Energy Storage	Otay Mesa, USA	<b>250 MW</b>	<b>250 MWh</b>
7	Rokkasho Village Wind Farm	Aomori, Japan	<b>34 MW</b>	<b>245 MWh</b>
8	Hornsedale Power Reserve	Jamestown, Australien	<b>150 MW</b>	<b>193,5 MWh</b>
9	Escondido Substation	San Diego, USA	<b>30 MW</b>	<b>120 MWh</b>
10	Mira Loma Substation	Ontario, Kalifornien, USA	<b>20 MW</b>	<b>80 MWh</b>

#1 Moss Landing: Phase 1; installed in turbine hall of a former gas power plant

Largest in Germany: **Netzbooster Kupferzell with 250 MWh** (planned)

 [www.ingenieur.de](http://www.ingenieur.de); 2021





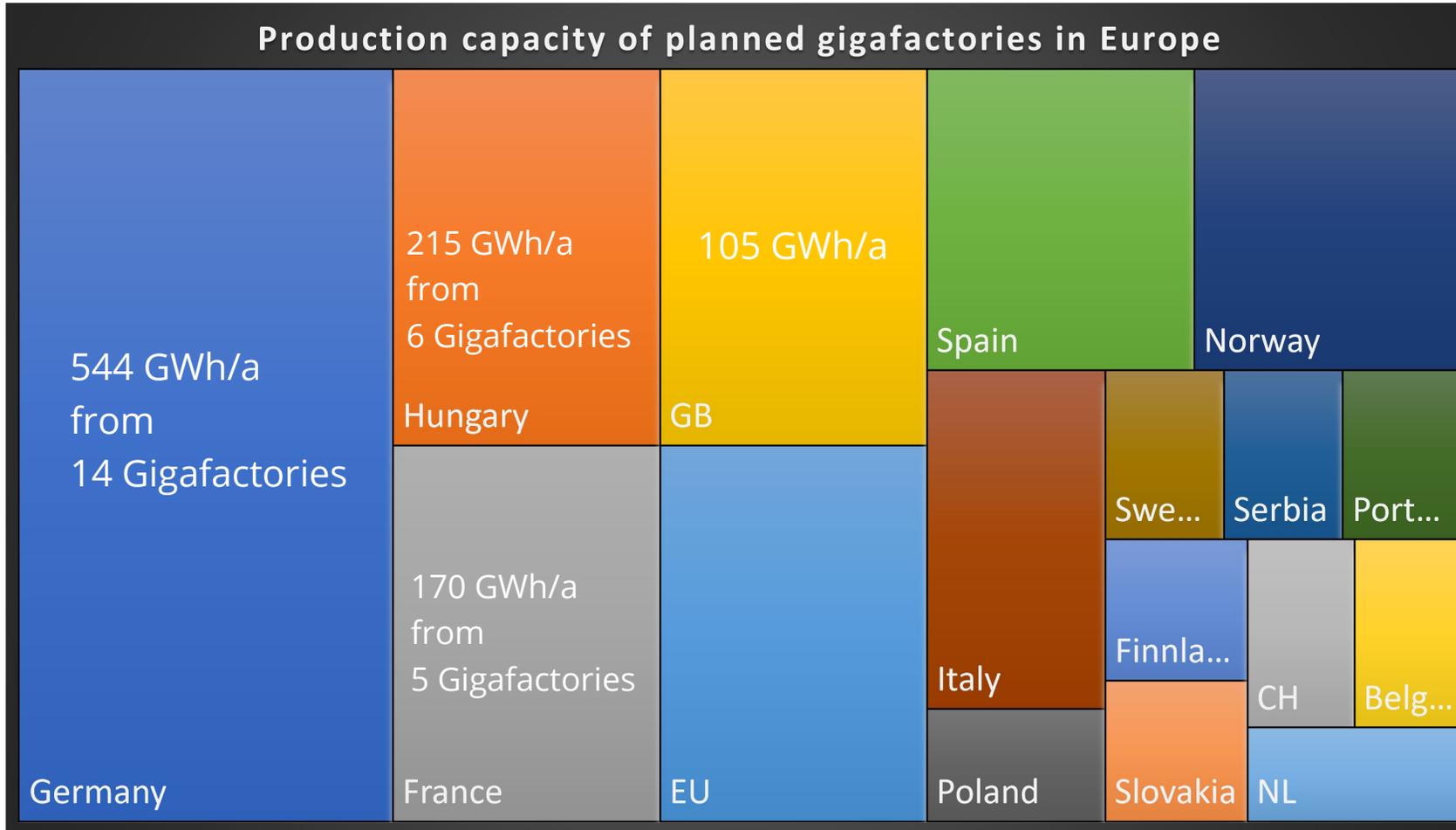
vehicle-to-grid (V2G)

vehicle-to-home (V2H)

Eigenverbrauchsoptimierung steigert Selbstversorgung (Autarkie). Ökonomisch sehr sinnvoll.

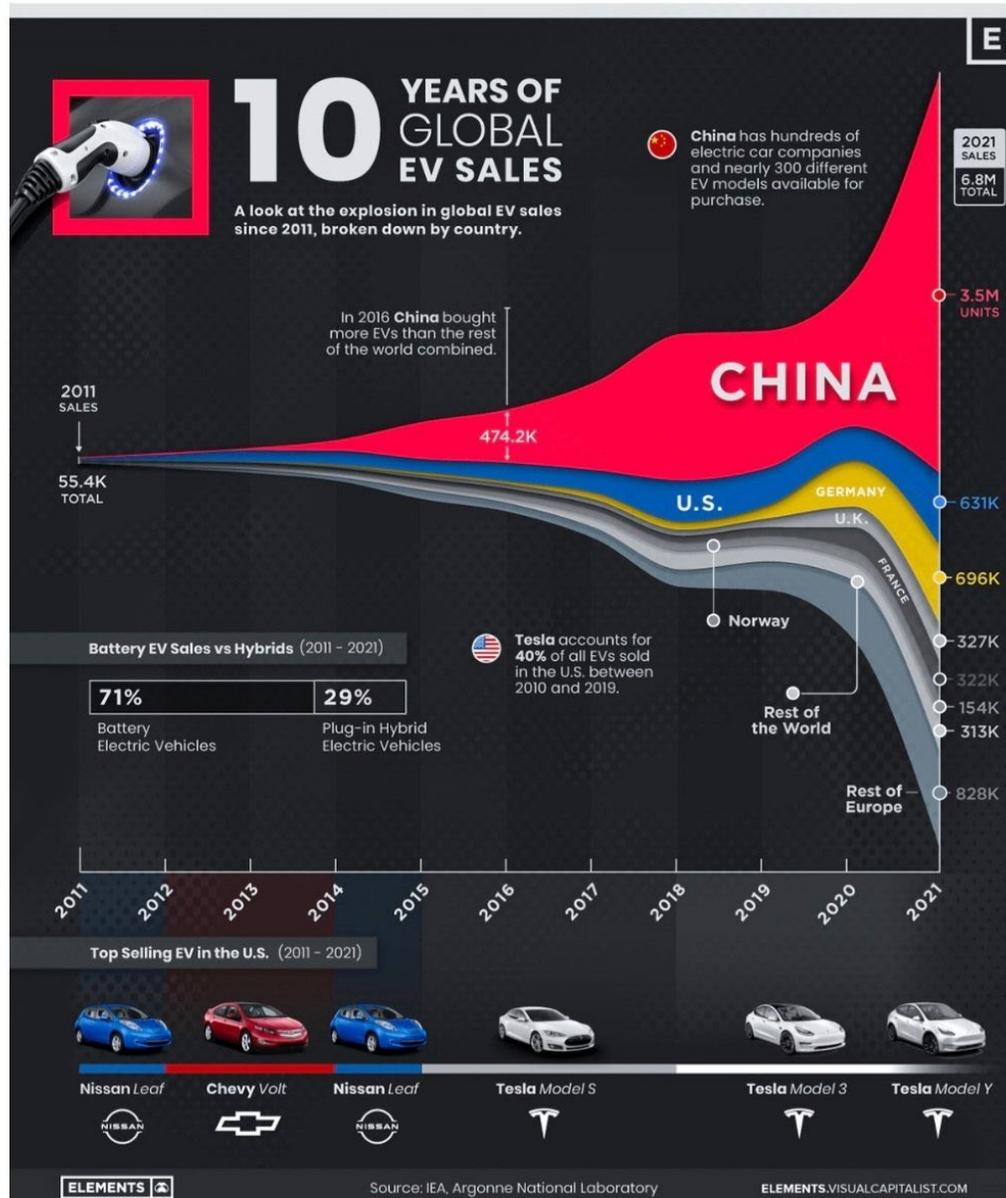
V2G und V2H ermöglichen

- die Sektorenkopplung (Verkehr / Wärme / Strom)
- die Versorgung eines Hauses bei Stromausfall.
- tarifoptimiertes Laden/Entladen → kann als zusätzliche Einnahmequelle für Besitzer von Elektroautos dienen.



Total: 2 TWh/a

# Zeitliche Entwicklung im Verkauf von Elektrofahrzeugen (global und BRD)



## Bestand batterieelektrischer PKW in Deutschland

Verdoppelung alle 1,5 Jahre



Aktuell werden binnen 3 Tagen weltweit so viele BEV zugelassen wie H2-Autos in den letzten 10 Jahren zusammengenommen.

→ „Tipping point“ ist überschritten.

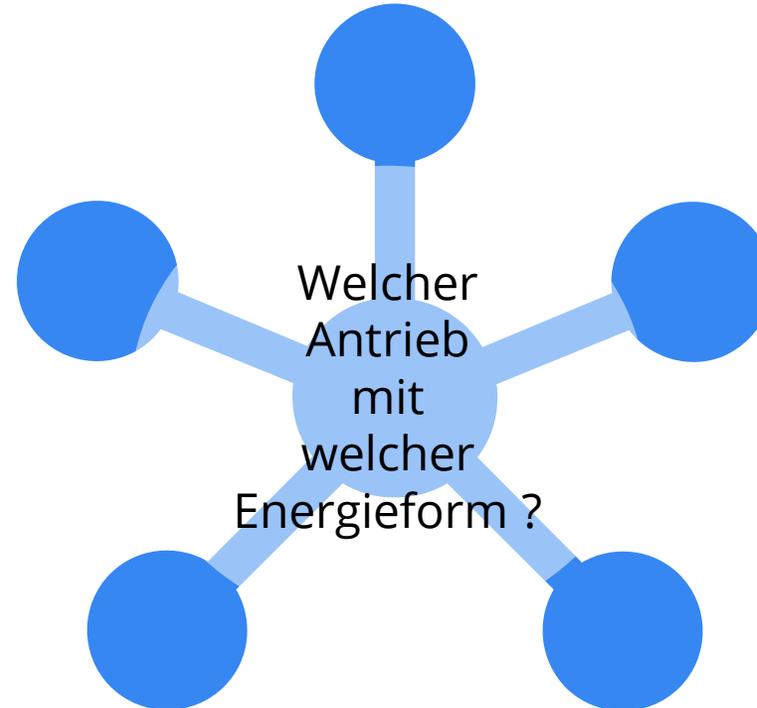
LKW:

- H<sub>2</sub> derzeit nicht wirtschaftlich (14-28 EUR/kg → 1,20 - 2,50 EUR/ km),
- kein grüner H<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> Fußabdruck ähnlich Diesel

## Batteriefahrzeug

Welcher Beitrag  
zur Treibhausgas (THG)-Minderung?

Nutzerfreundlichkeit ?



Kosten ?  
Sicherheit ?

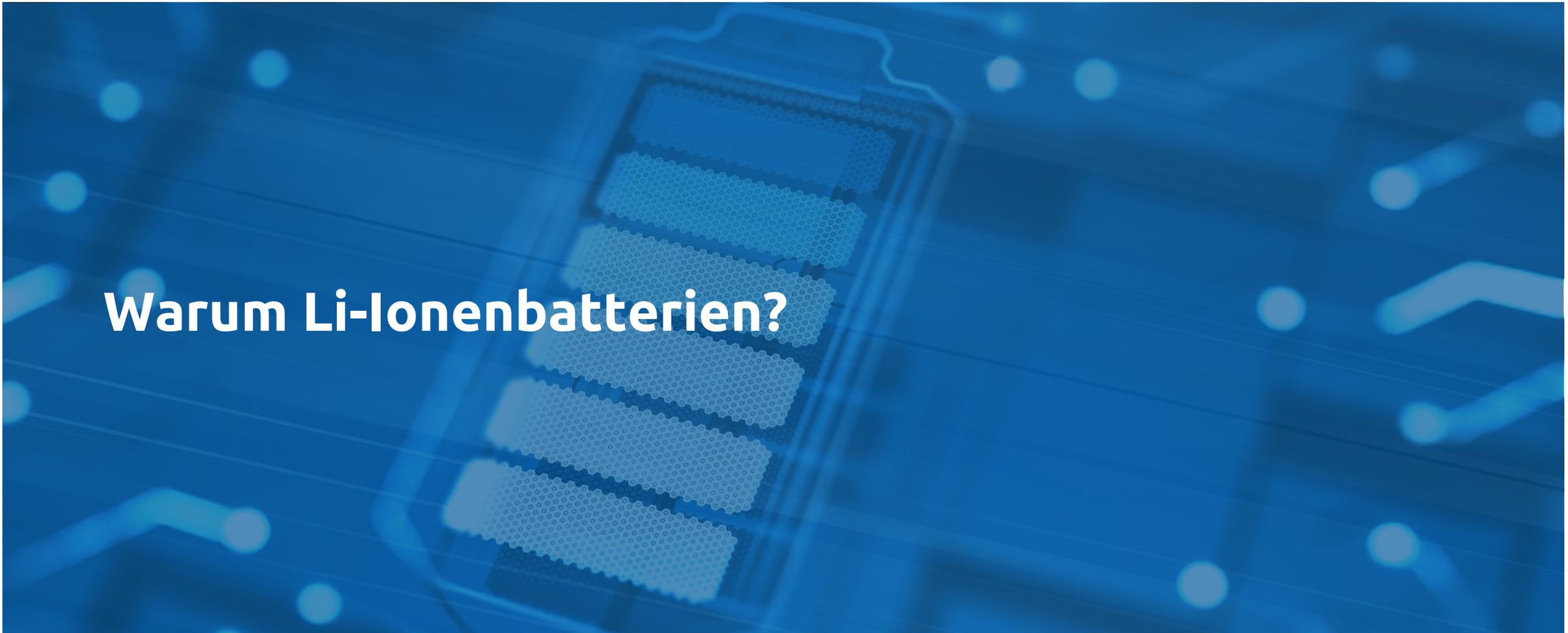
**Batteriefahrzeug**

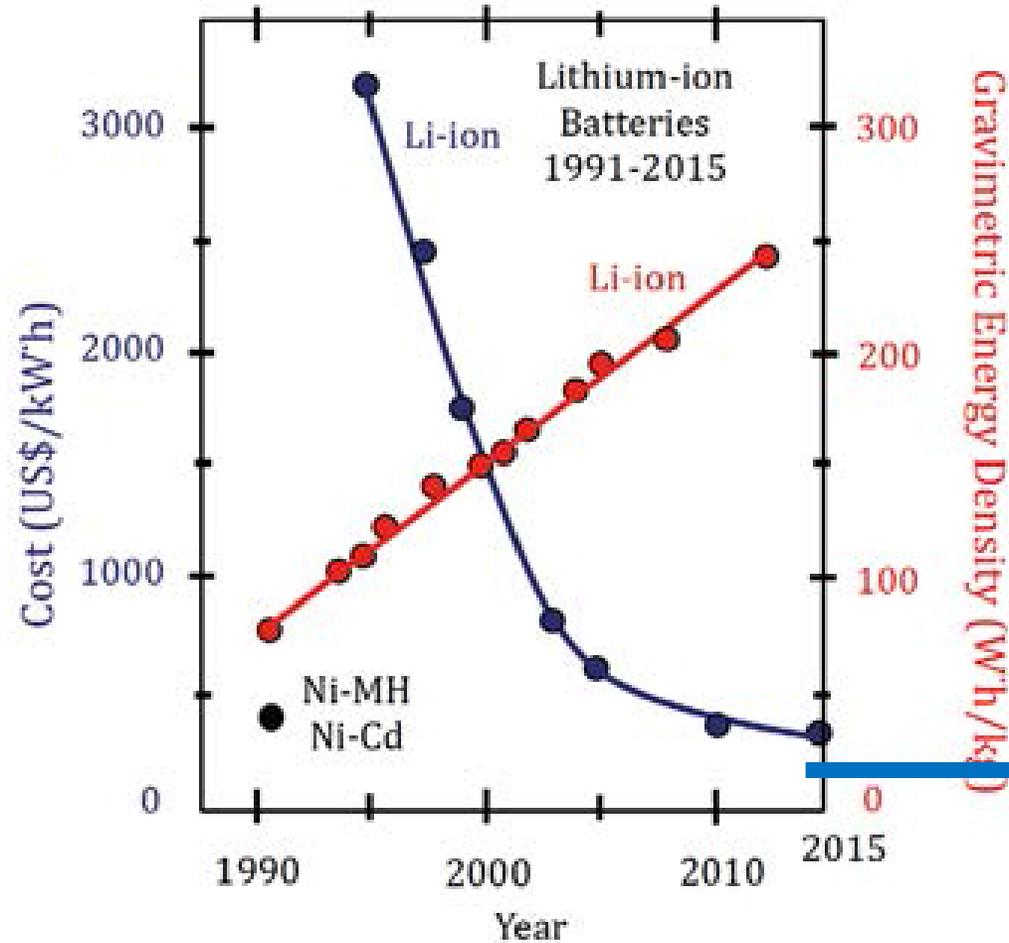
Wie effizient ist der Antrieb?

Wie ist die Rohstoffsituation ?

**Batteriefahrzeug**

# Warum Li-Ionenbatterien?





Seit der Markteinführung:  
Energiedichte: x4  
Kosten ÷ 18

- **90% Kostenreduktion in den letzten 10 Jahren**
- **Kapazität = verdoppelt in den letzten 10 Jahren**

Kostenziel  
für 2021

📖 G.Crabtree, *MRS Bulletin* 40, 1067 (2015)

## „Bessere“ Batterien

(mehr Energie, schnelleres Laden, sicherer, längere Lebensdauer)

→ „bessere“ Materialien und Batteriedesigns



## Nachhaltige Batterien

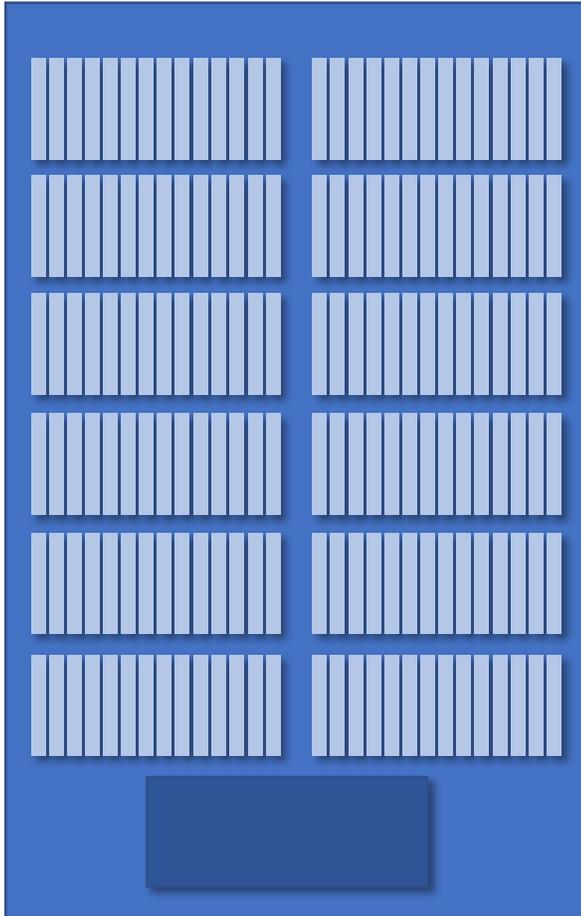
(häufig vorkommende und ungiftige Rohstoffe, Recycling)

→ Neue Batterietypen

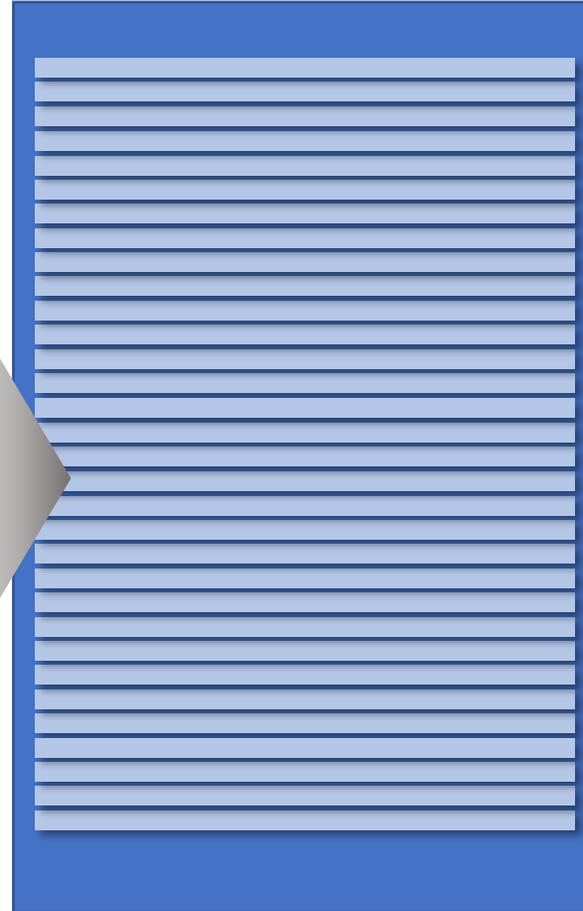
# Zusammenspiel von Chemie und Engineering

Reichweite, Ladegeschwindigkeiten, Rohstoffe

Nur 25% der aktuellen Batterie  
bestehen aus Speichermaterial



30-35% Speichermaterial  
Cell-to-Pack Design



## Cell-to-Pack (CTP) -Technologie Gen. 1

erhöht laut CATL

- Spezifische Energie um 10-15%, und
- **Energiedichte um 15-20%**, und

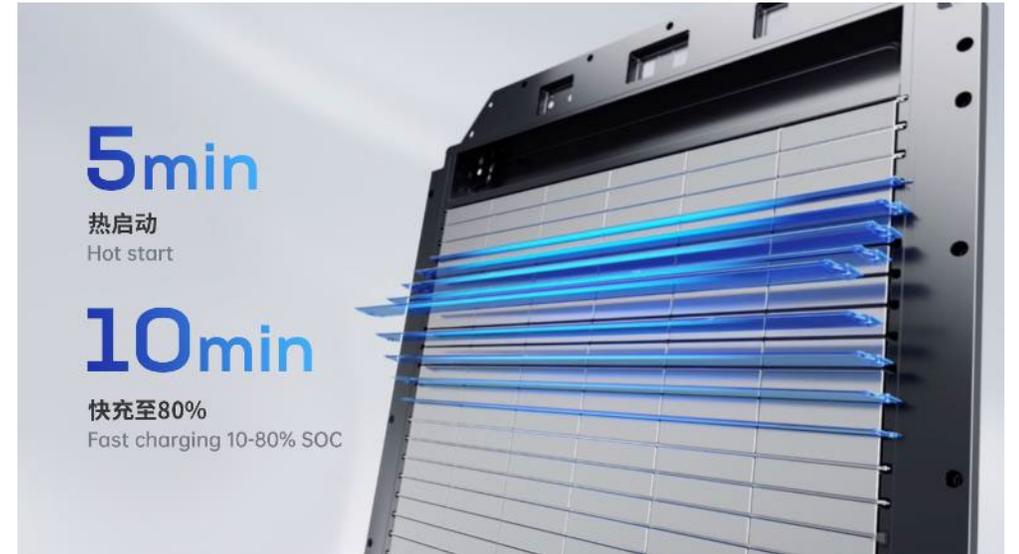
**Zahl der Teile für die Fertigung** des Batterie  
Packs **verringert sich um 40%**.

 M. Fichtner, *Recent research and progress in batteries for electric vehicles*, Batteries&Supercaps (2022) e202100224

## CATL launches CTP 3.0 battery “Qilin,” achieves the highest integration level in the world

2022-06-23

<https://www.catl.com/en/news/958.html>



255 Wh/kg auf Packlevel

### BYD und CATL: 2023

- >1000 km Reichweite (WLTP)
- Laden: 700 km in 10 min

# Erster Serien-PKW mit >1000 km Reichweite

Hersteller: **Geely, Modell Zeekr 001**

Geely-Konzern: Volvo, Lotus, Lynk, 10% bei Mercedes, ....

140 kWh LFP-Akku, 3,8 sec von 0-100 km/h, 120 km Laden in 5 min



<https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/geely-premium-e-autos-zeekr-001/>

LFP-Batterie Shenxing von CATL

Pluspol: LFP =  $\text{LiFePO}_4$  → kein Co, kein Ni

Minuspol: Graphit



Bild: Modell Exceed/Chery 2023, derzeit in China, demnächst auch Europa

**400 km Laden in 10 min bei 700 km Reichweite**

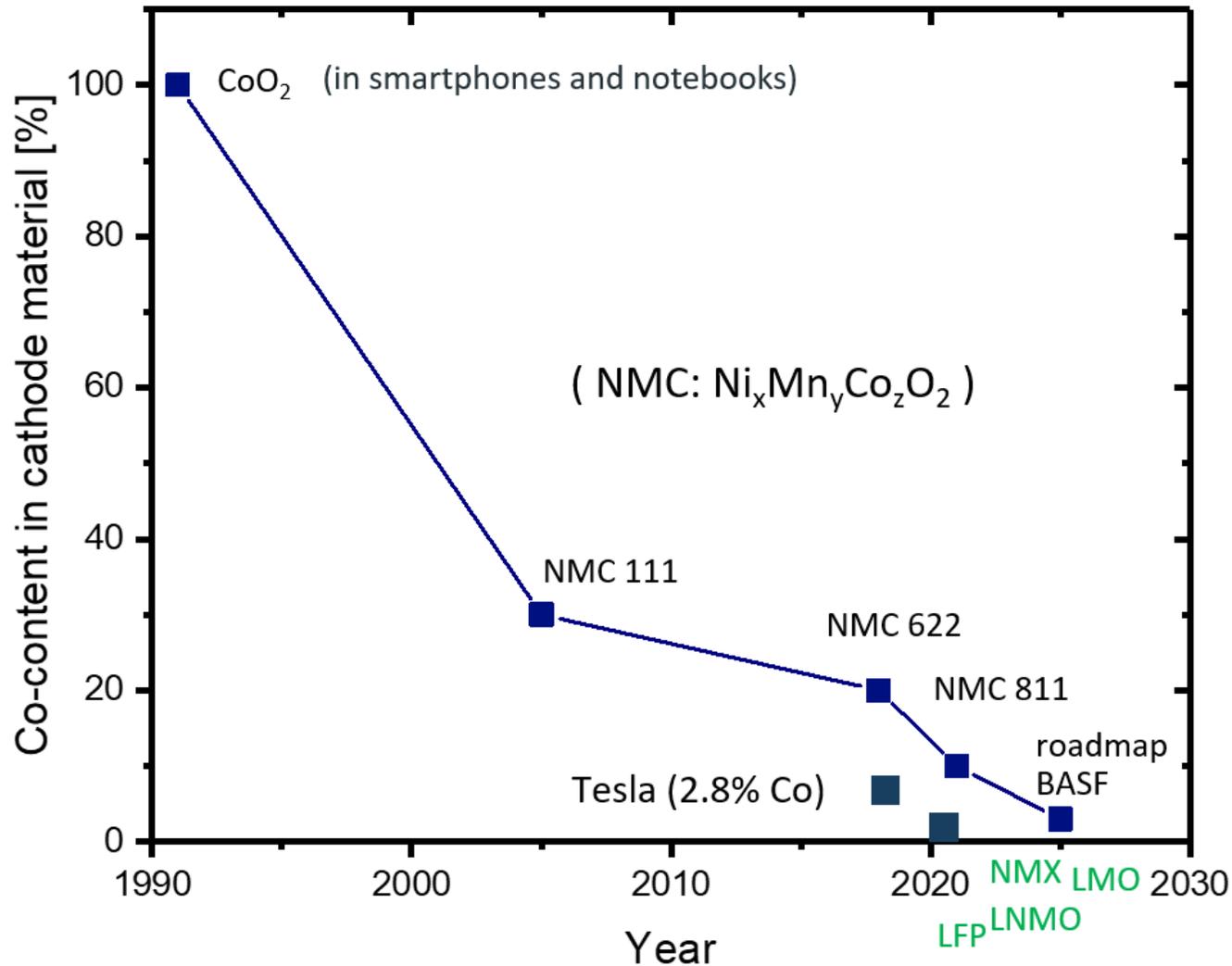
**Laderate „4C“:**

i.e. 4x pro Stunde zu 100% beladbar

# Aktuelle Entwicklungen bei der Li-Ionenbatterie



**Cathode:** Kobalt-Gehalt im Pluspol von Batterien.



Seit Juni 2022: TESLA liefert bereits > 50% ohne Co aus

LFP:  $\text{LiFePO}_4$   
NMX:  $\text{LiNi}_{3/4}\text{Mn}_{1/4}\text{O}_2$   
LMO:  $\text{LiMnO}_2$

(Materials with 0% cobalt)

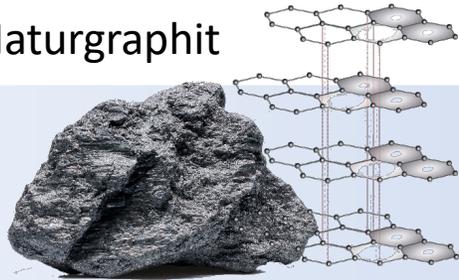
## Anode (Minuspol)

Petrolkoks



1990

Naturgraphit



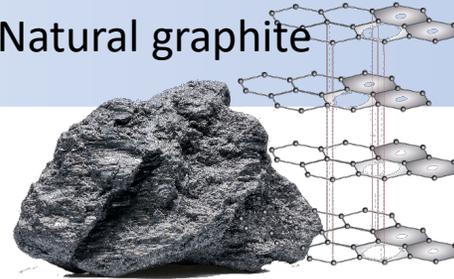
2000

Synthet. Graphite

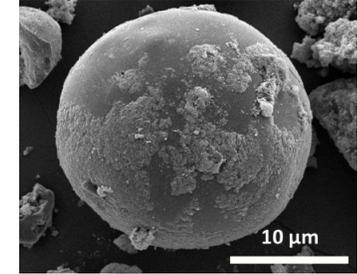


2020

Natural graphite



Si@C composite

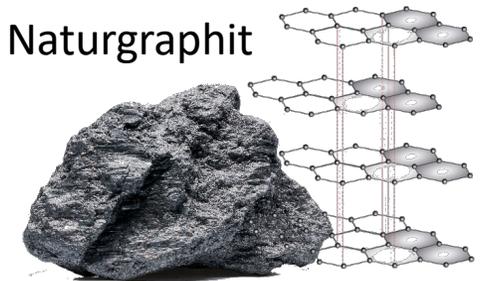


**4x capacity**  
→ **+40%**  
**on cell level**

Synthet. Graphit

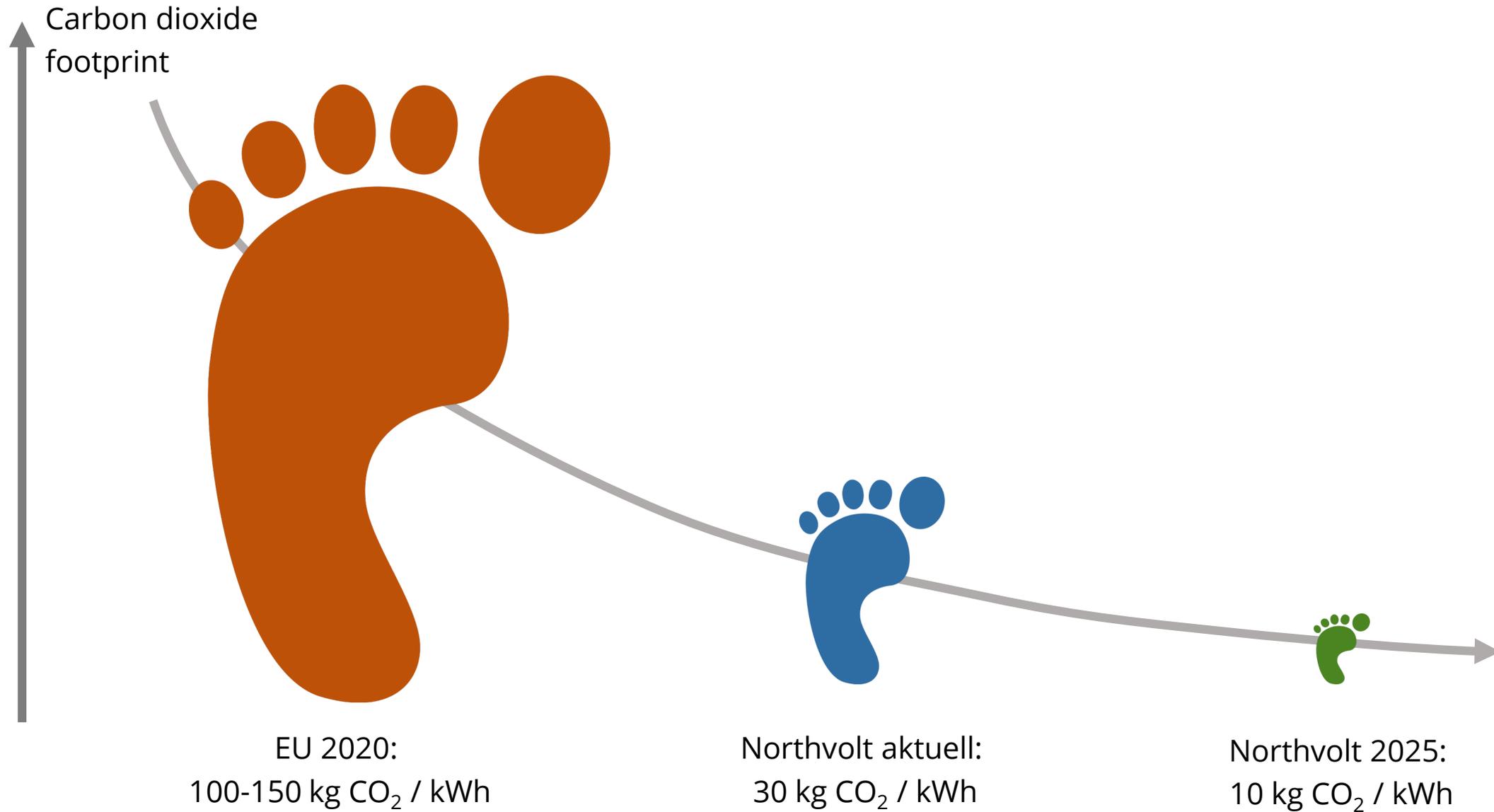


Naturgraphit



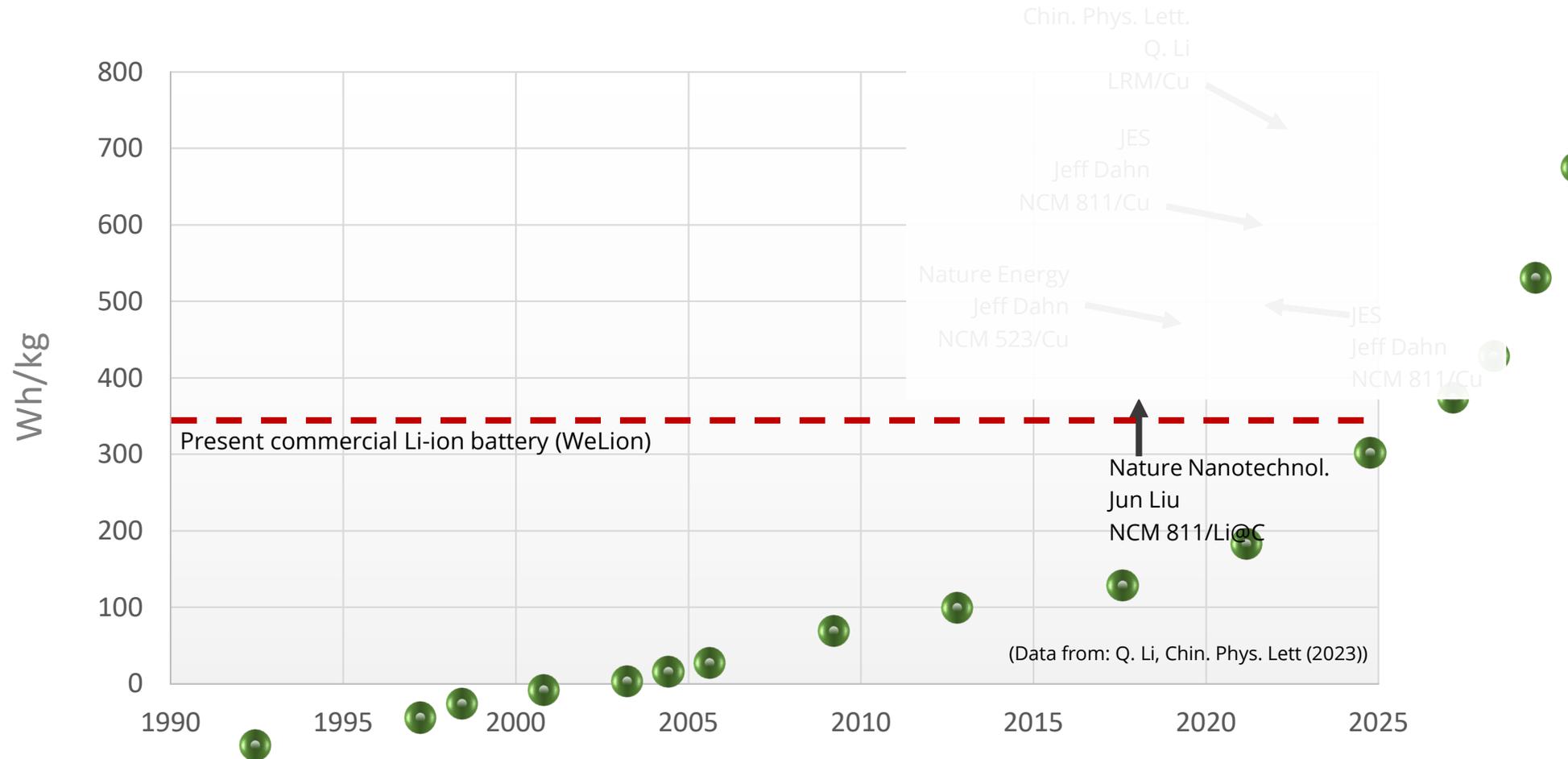
**Next years**

# Treibhausgasemission bei der Batterieproduktion



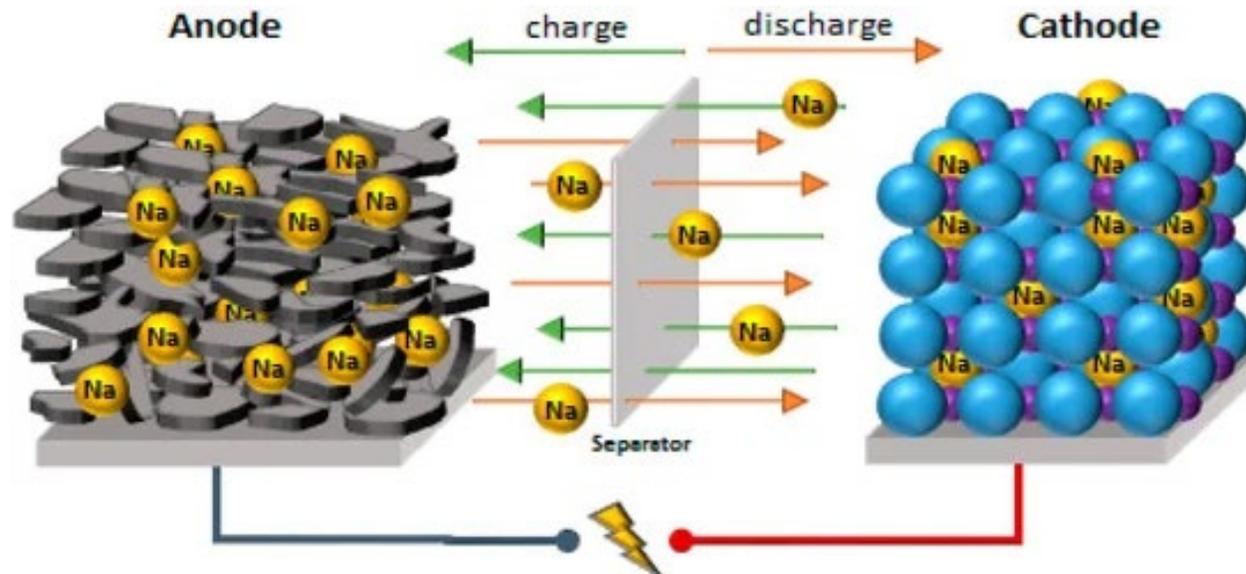
# Vergleich der Energiedichte von Li-Ionen-Pouchzellen während der letzten 30 Jahre

● Höchste Energiedichte in diesem Jahr



# Neue Batteriechemie, neue Forschung

## Natrium-Ionenbatterie

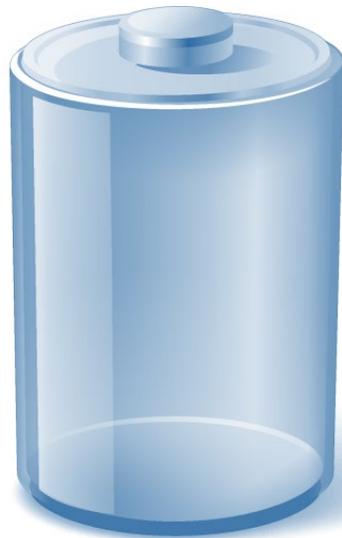


**POLoS**  
Post Lithium Storage  
Cluster of Excellence

📖 J. Peters et al., Batteries 2019, 5 (1), 10

„Drop-in“ technology

## Li-Batterien



Al

Li

Ni

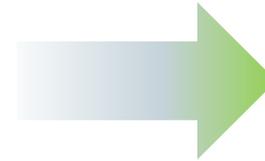
Mn

Co

Graphit

Cu

Kritische/teure/giftige Rohstoffe



## Na-Batterien



Al

Na

Fe

Mg

Mn

Hartkohlenstoffe

Al

Nachhaltige/preiswerte/häufige Rohstoffe

LIB mit  $\text{LiFePO}_4$ : 200 Wh/kg

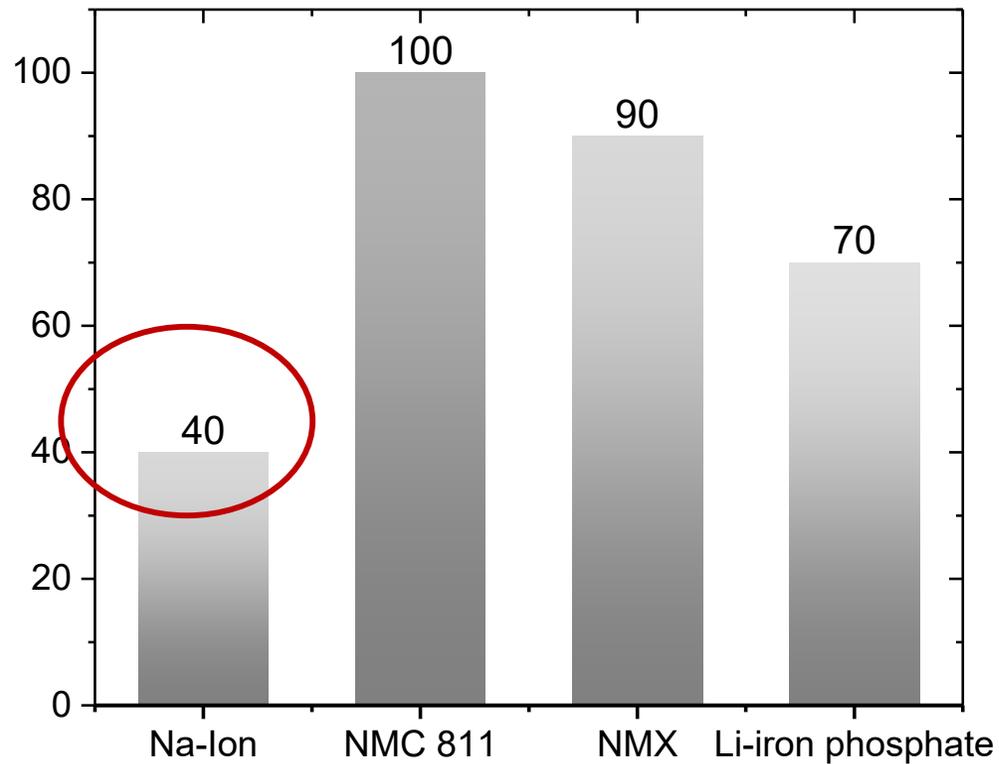
350 Wh/l

NIB: 160 Wh/kg (2021)

300 Wh/l

200 Wh/kg (2022)

relative Kosten



Kapazität bei -20°C

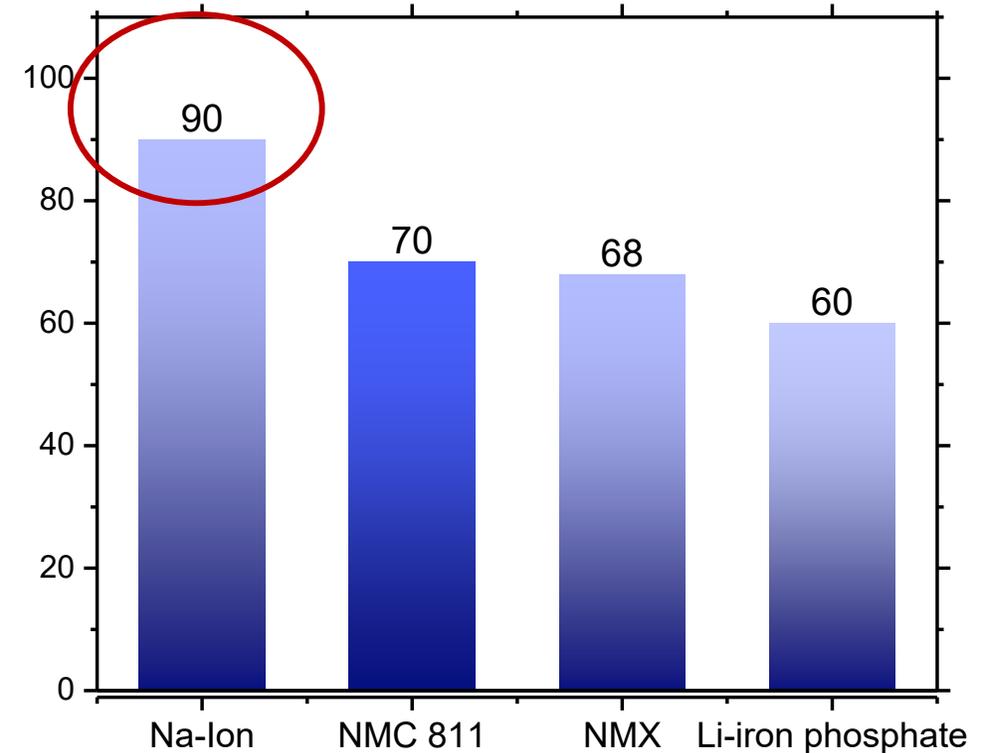


Bild: Modell Sol E10X / JAC (2023)



61 PS  
Batterie 30 kWh  
Reichweite 300 km

Ab 6500 EUR.



# Schlussfolgerungen und Perspektiven

The background of the slide is a deep blue color. It features a central, slightly tilted image of a battery cell. The cell's internal structure is visible, showing several layers of material with a porous, grid-like texture. Overlaid on this and the entire background are faint, glowing blue lines and shapes that resemble electronic circuit traces and nodes, creating a high-tech, futuristic aesthetic.

- **Gesamt:**

Batteriefahrzeuge weisen geringste THG Emissionen, beste Energieeffizienz und geringste Kosten auf  
Genereller Trend zur Abkehr von kritischen Rohmaterialien und zur Verringerung der Fertigungskosten

- billigere, häufiger vorkommende Materialien
- Fertigungsprozesse mit geringerem Energieaufwand
- Einsatz von 100% EE in der Produktion

- **Chemie**

- ca. 10-20% Kapazitätssteigerung durch bessere Kathoden mit höherer Spannung und Kapazität
- ca. 30-40% Kapazitätssteigerung durch bessere Anoden mit Silizium@Carbon-Kompositen
- Batterien frei von kritischen Rohstoffen, z.B. die Na-Ionenbatterie

- **Engineering**

Neue Batterien mit optimiertem Packdesign erlauben höhere Reichweiten, schnellere Beladung, höhere Sicherheit

- BYD, CATL, NIO: 1000 km WLTP, 700 km Zuladung in 10 min (ab 2023).

# Vielen Dank !

[www.celest.de](http://www.celest.de)

[www.hiu-batteries.de](http://www.hiu-batteries.de)

[www.postlithiumstorage.org](http://www.postlithiumstorage.org)



# Zusatzfolien

## H<sub>2</sub> für Schwerlastverkehr

wird konkurrenzfähig bei Kosten < 4-5 EUR/ kg H<sub>2</sub>

Derzeit: 13,85 EUR/ kg H<sub>2</sub> („grauer“ H<sub>2</sub>)

→ Faktor 1/3 für grünen H<sub>2</sub> wird schwierig zu erreichen, wird eher teurer.

→ Kosten für Batterien sinken stetig

Kostenanalyse mit Vorausschau für 2025+:\*

0,44 €/km 

0,6-0,8 €/km



Kilometerkosten  
40-80% höher als bei vollelektrisch

0,54 €/km



75% der ursprünglich für BZ-H2 avisierten Anwendungen werden als vollelektrisch projiziert.

## Lithium Produktion und Wasserverbrauch

Zur Produktion einer **60 kWh Autobatterie** (400 km Reichweite) werden ca. **6 kg Li** gebraucht.  
→ Die Produktion 1 Fahrzeugbatterie verbraucht **4000-5000 L Wasser**, welches aus der Salzlake verdunstet und das Salz zurücklässt.

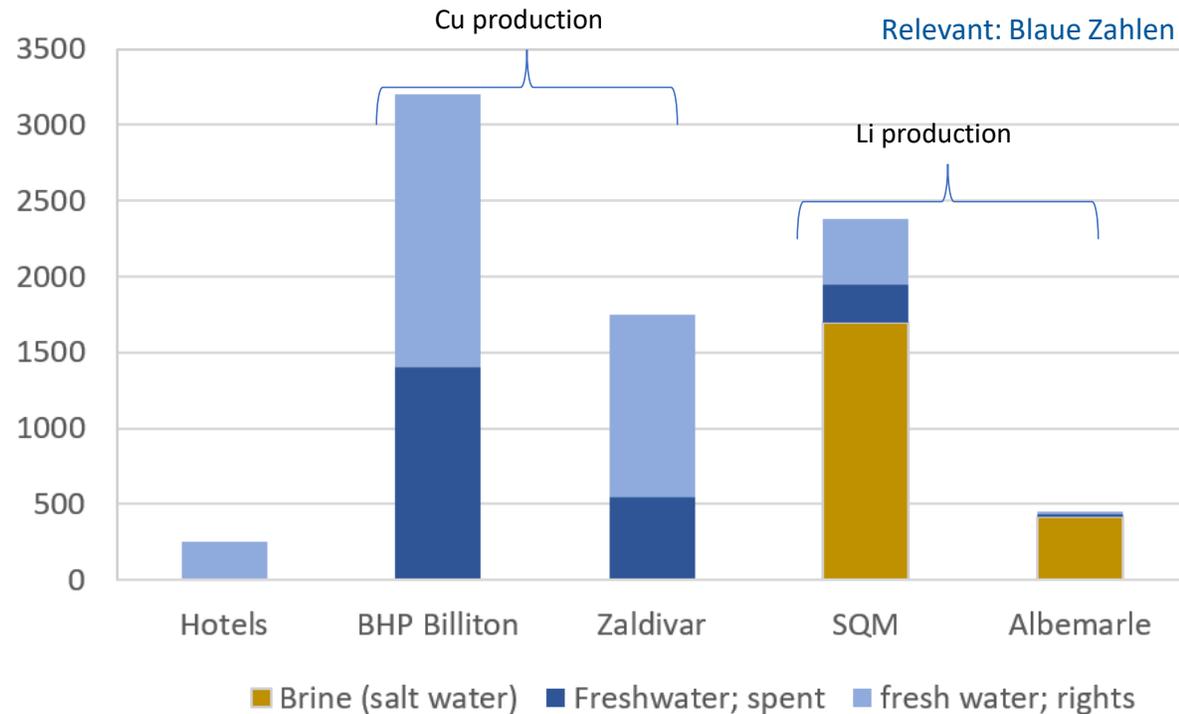
Das entspricht einem Wasserverbrauch bei der Produktion von

- **250g Rindersteak** oder
- **1/2 Jeans (Baumwolle)** oder
- **30 Tassen Kaffee** oder
- **10 Avocados**

([danwatch.dk/en/undersogelse/how-much-water-is-used-to-make-the-worlds-batteries/](http://danwatch.dk/en/undersogelse/how-much-water-is-used-to-make-the-worlds-batteries/))

([en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_water))

# Lithium Produktion und Wasserverbrauch/Wasserrechte vor Ort



data from:  
Ministerio de Minería  
Chile (2018)



ref.: [en.mercopress.com/2011/07/22/](https://en.mercopress.com/2011/07/22/)

Süßwasserverbrauch + Wasserrechte in der Salar de Atacama Region:

710 Mio m<sup>3</sup>/a für Li (Verbrauch: **260** Mio m<sup>3</sup>/a)

4950 Mio m<sup>3</sup>/a für Cu (Verbrauch: **2000** Mio m<sup>3</sup>/a)

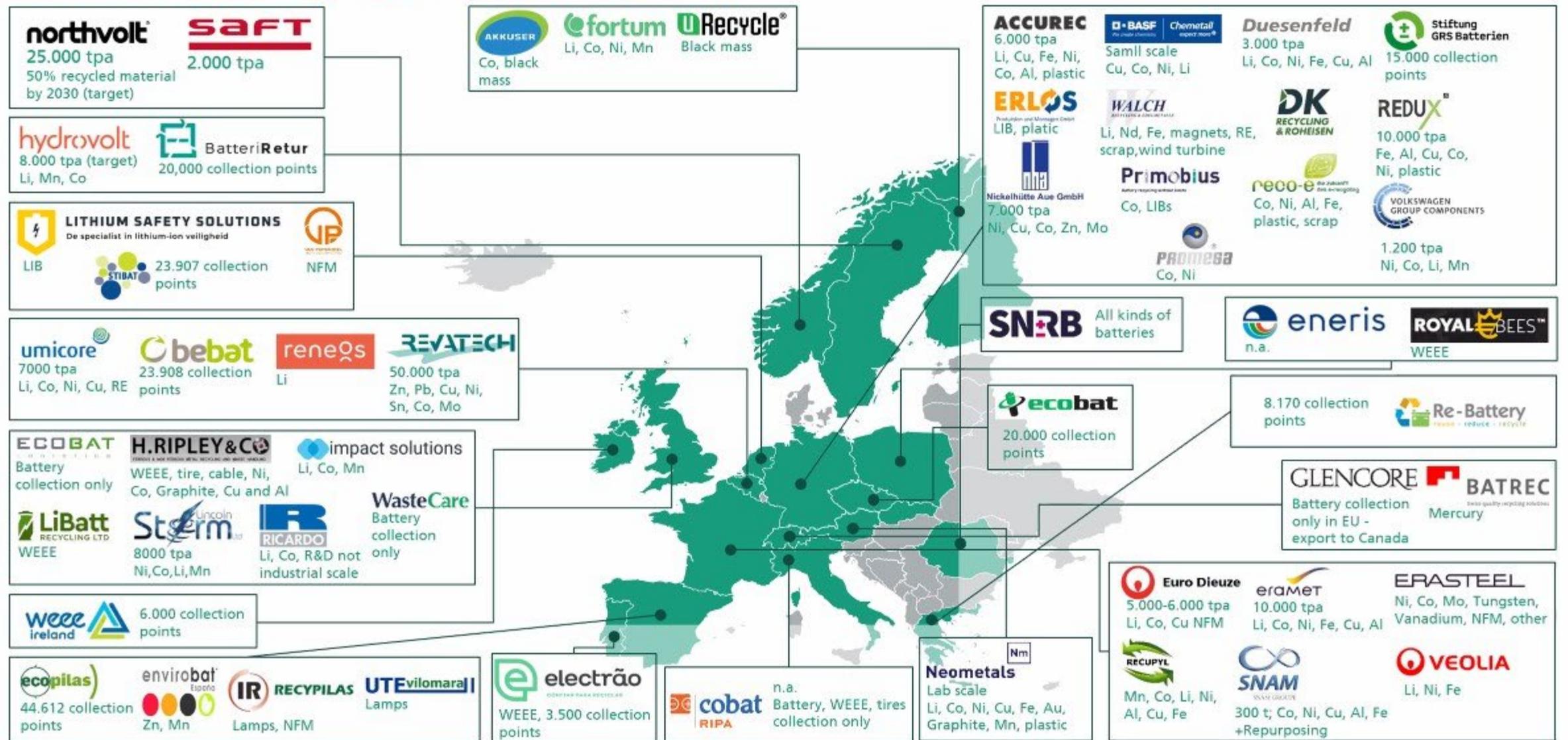
**250** Mio m<sup>3</sup>/a für Hotels (= Verbrauch)

Grundwasser sinkt seit den 1960er Jahren

8x höherer Wasserverbrauch  
für die Kupferproduktion am  
Salar

# Batterierecyclingskapazitäten in Europa

with reference to Tom Tsogt 2021  
and Raphael Danino-PERRAUD 2020



Preise für grünen Wasserstoff und Methan voraussichtlich

→ **über 100 Euro** je MWh im Jahre 2030

→ **knapp unter 100 Euro** je MWh im Jahre 2050.

Aktuell beträgt der Preis für Methan am europäischen Rohstoffmarkt **rund 30 Euro** je MWh.

»Die hohen Kosten zeigen, dass der Import von E-Fuels nach Europa kein billiges Patentrezept ist, um Engpässe beim Ausbau der erneuerbaren Energien zu umgehen oder eine Transformation auf der Angebotsseite zu erreichen«

(FhG-IEG, KIT-DVGW (2022))

<https://www.ieg.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2022/energieimporte-gruener-wasserstoff.html>



(creative commons, Wikipedia)