

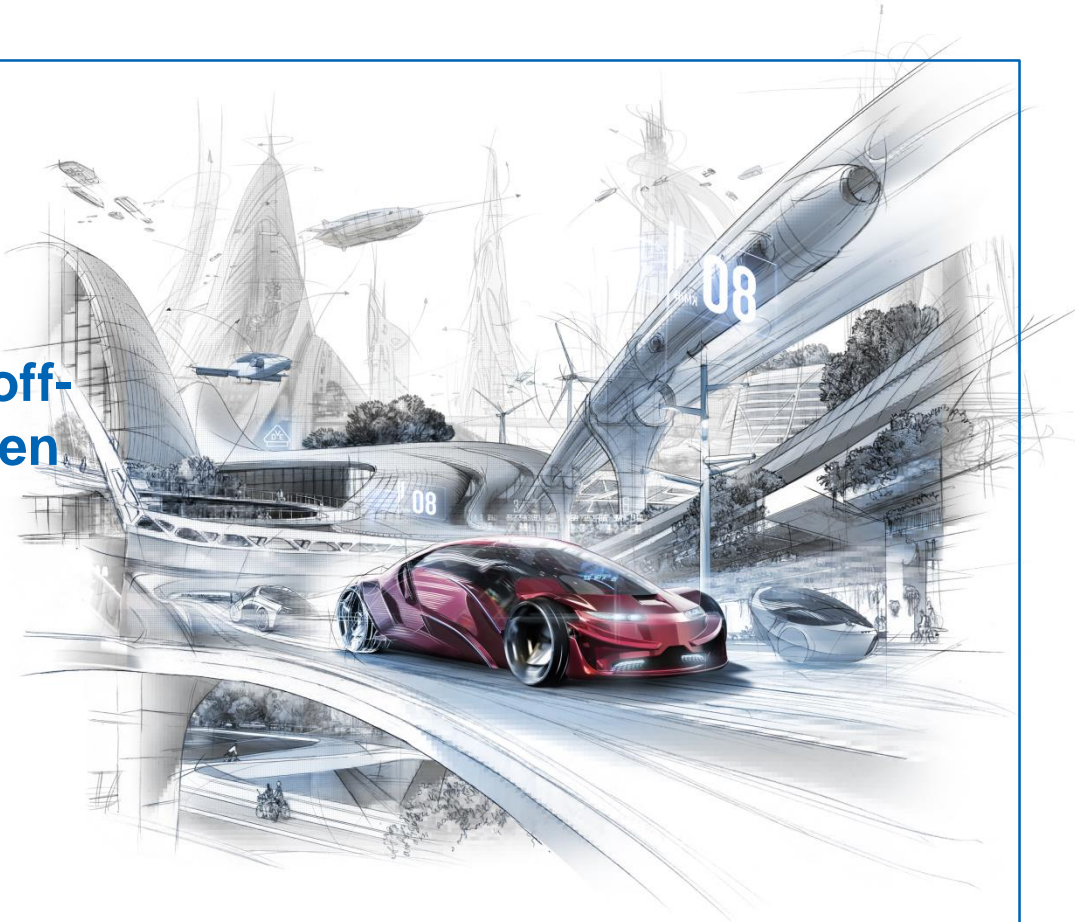
# VDI/VDE-Studie\*

## Die Bedeutung von Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen für die Elektromobilität

Martin Pokojski  
Hannover, 04.04.2019



\*Die Studie ist das Arbeitsergebnis einer interdisziplinären Arbeitsgruppe von VDE|ETG, VDI-GEU und VDI-FVT



# VDE

- **Grundsätzliches Verständnis zur Elektromobilität vorhanden!**

- Wichtiger Beitrag zum Umweltschutz (lokal emissionsfrei)
- Geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor bei Verwendung erneuerbarer Energien

**aber**

- Keine ausgewogene Diskussion in Bezug auf die verschiedenen Systemeigenschaften
- Favorisierung von Batteriefahrzeugen trotz großer Potenziale von Brennstoffzellenfahrzeugen zur Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen

- **Schlussfolgerung**

- Sachgerechte Diskussion mit Berücksichtigung aller Einflussgrößen
- Neben fahrzeugbezogenen Aspekten Beachtung von Nutzerinteressen, systemtechnischen Aspekten, Rohstoffreserven und -ressourcen sowie ökologische Konsequenzen

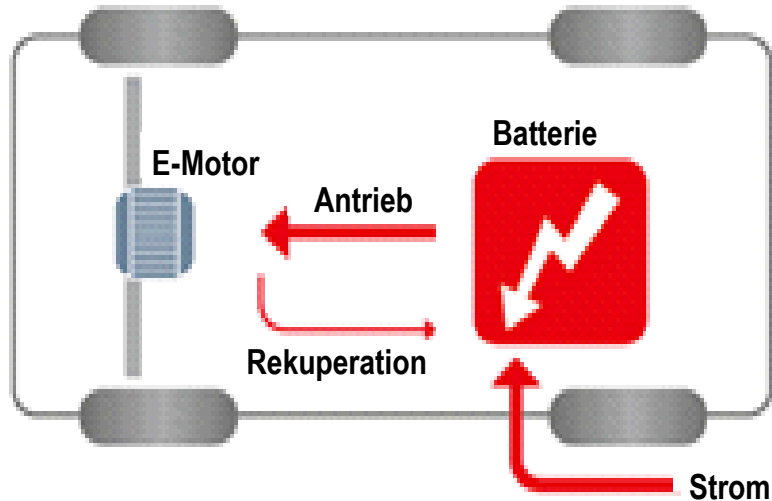
- **Bewertung des Entwicklungsstands im Rahmen einer Arbeitsgruppe von VDE|ETG, VDI-GEU, VDI-FVT**
- **Präsentation der wesentlichen Ergebnisse im Rahmen des Vortrages**

# Technischer Vergleich der Systeme (1)

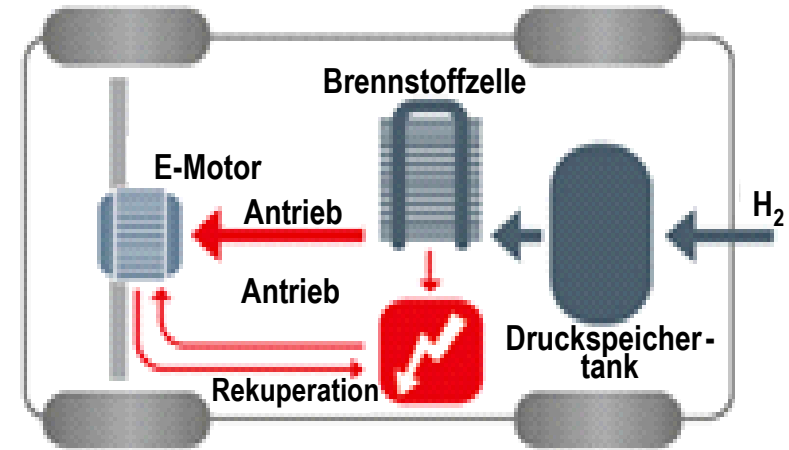
## Konzeption



### Batteriefahrzeug (BEV)



### Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)



# Technischer Vergleich der Systeme (2)

## Technik



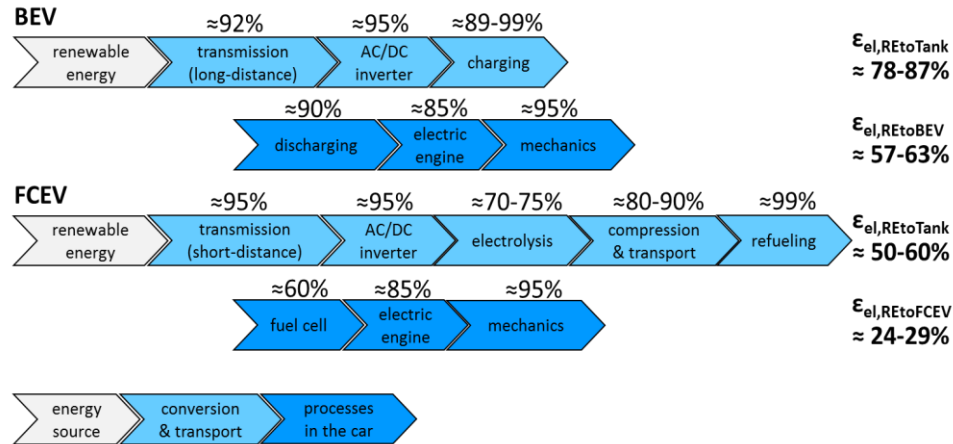
	FCEV	BEV
	<b>Antrieb über Zentralmotor, alternativ Nabenmotoren denkbar</b>	
<b>Antrieb</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stromversorgung aus Brennstoffzelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stromversorgung direkt aus Batterie</li> </ul>
<b>Speicherung an Bord</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wasserstoff: 700 bar gasförmig bei Pkw, 350 bar bei Zügen, LKW und Bussen.</li> <li>Flüssig-H<sub>2</sub> bei Schiffen, Flugzeugen, Zügen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien</li> <li>Kapazitätssteigerung verbunden mit erheblicher Gewichtszunahme</li> </ul>
<b>Rekuperation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rückgewinnung der Bremsenergie: zusätzliche Batterie erforderlich (Potenzial abhängig von deren Größe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rückgewinnung fast der gesamten Bremsenergie möglich</li> </ul>
<b>Alterung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mind. 4.000 h/Stack, Ziel 7.000 h.</li> <li>Geringerer Wirkungsgrad zum Ende der Betriebszeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beschleunigte Alterung bei hohen und niedrigen Temperaturen, hohen Ladezuständen sowie Lade- und Entladeraten</li> </ul>

# Technischer Vergleich der Systeme (3)

## Effizienz



	Brennstoffzelle	Batterie
Effizienz	<ul style="list-style-type: none"> <li>25 - 31 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>61 - 72 % (mind. Faktor 2 besser)</li> </ul>
Ladeprozess	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wirkungsgrad bei gegebener Technologie konstant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximaler Wirkungsgrad bei langsam laden</li> <li>Bei Schnellladeprozessen deutliche Abnahme des Ladewirkungsgrades</li> </ul>



# Technischer Vergleich der Systeme (4)

## Tanken/Laden



	FCEV	BEV
Tanken/Laden	<ul style="list-style-type: none"> <li>H2-Tankzeit 3 min bis 5 min, vergleichbar mit heutigen Fahrzeugen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mehrere Stunden bei Leistungen bis 11 kW, 20 Minuten bei DC-Schnellladung (bis 80 % SOC)</li> </ul>
Tank-/Lade-einrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nachweis der Alterstauglichkeit der Füll-einrichtungen (Dispenser) vorhanden</li> <li>Weltweit einheitlicher Dispenser-Standard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Derzeit weltweit kein einheitlicher Standard</li> </ul>

Dispenser



Ladestecker

	Typ 1 / USA	Typ 2 / Europa	GB / T / China
Wechselstrom (AC)	 SAE J1772 / IEC 62196-2	 IEC 62196-2	 GB/T 20234.2
Gleichstrom (DC)	 IEC 62196-3	 IEC 62196-3	 GB/T 20234.3
„Combined AC/DC Charging System“	 SAE J1772 / IEC 62196-3	 IEC 62196-3	

DC-Schnellladestation

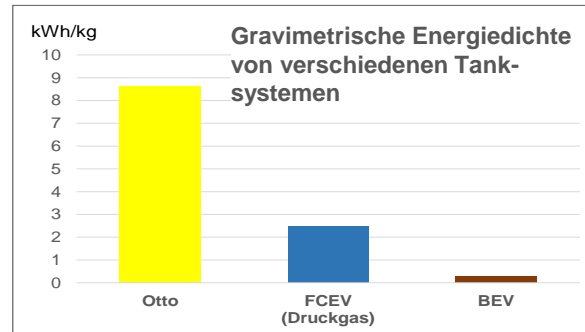


# Technischer Vergleich der Systeme (5)

## Reichweite



	Brennstoffzelle	Batterie
Reichweite/ Nutzlast	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reichweite abhängig vom Tankvolumen</li> <li>Geringer Einfluss des Tanks auf das Fahrzeuggewicht</li> <li>Große Reichweiten (bis 800 km) bei gleichzeitig hoher Nutzlast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abhängig von der Größe der Batterie</li> <li>Zunahme des Fahrzeuggewichtes mit der Größe der Batterie</li> <li>Einschränkung der Nutzlast durch Gewicht der Batterie</li> </ul>
Einfluss des Fahrzeugtyps	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reichweite unabhängig von Fahrzeugtyp</li> <li>In Bezug auf die Reichweite vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kleinwagen mit kleinerer Batterie (100 km)</li> <li>Fahrzeuge der Oberklasse mit 85 kWh, Distanzen von 390 km möglich</li> </ul>



# Technischer Vergleich der Systeme (6)

## Betriebseigenschaften



	Brennstoffzelle	Batterie
Heizen/Kühlen	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Abwärme der Brennstoffzelle zum Heizen; bei Bedarf Zusatzheizung</li><li>▪ Versorgung der Kälteanlage aus der Brennstoffzelle – Fahreinschränkungen vergleichbar mit Verbrennungsmotoren</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Energiebereitstellung zum Heizen und Kühlen aus der Batterie</li><li>▪ Reichweitenbeschränkung durch Heizen und Kühlen</li><li>▪ Thermische Vorkonditionierung beim Laden möglich (Energie aus dem Netz)</li></ul>
Umweltbedingungen	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Nur geringe Auswirkungen durch niedrige oder hohe Temperaturen</li><li>▪ Längere Aufheizzeiten bei niedrigen Temperaturen</li><li>▪ Im Winter Mehrverbrauch von 10 %, im Sommer Minderverbrauch von 10 %</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Sensible Reaktion auf niedrige (&lt; 10 °C) und höhere Temperaturen (&gt; 40 °C)</li><li>▪ Abnahme der nutzbaren Kapazität bei beschleunigtem Alterungsverhalten</li></ul>

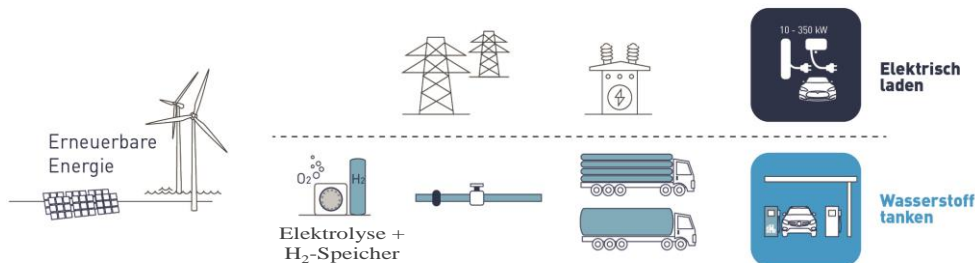


# Infrastruktur (1)

## Infrastrukturentwicklung



	FCEV	BEV
Tank-/Ladeeinrichtungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bevorratung von H<sub>2</sub> an Tankstellen bei Drücken von 900 bar bis zu 1000 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Je Ladestandort eine größere Zahl an Stellplätzen mit Ladeeinrichtungen</li> </ul>
Nachfragespitzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durch Vor-Ort-Speicherung von großen Mengen Wasserstoff, Nachfragespitzen unkritisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deckung von Nachfragespitzen durch viele Ladepunkte je Station, ggf. zusätzliche stationäre Batterie am Ladepunkt</li> </ul>
Aufbau der Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schnelle Anpassung der Struktur durch Nutzung von großtechnisch produziertem H<sub>2</sub></li> <li>Erweiterung bestehender Tankstellen</li> <li>Umrüstung bestehender Erdgasleitungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sukzessiver Aufbau der Ladeinfrastruktur für BEV</li> <li>Nutzen von Smart Grids für die Versorgung von Ladestationen</li> </ul>

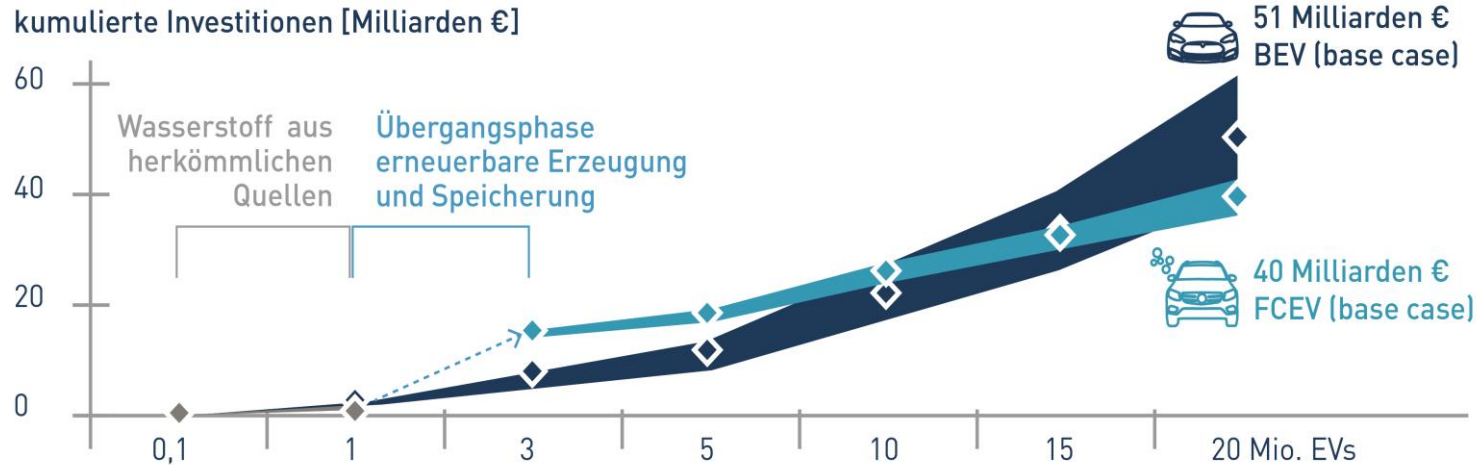


# Infrastruktur (2)

## Aufbau der Infrastruktur / Kosten



	FCEV	BEV
Infrastrukturkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei hoher Marktdurchdringung geringere Kosten für H<sub>2</sub>-Infrastruktur erwartet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorteile bei Infrastrukturinvestitionen bei geringer Marktdurchdringung</li> </ul>



# Energiebeschaffung (1)

## Strombedarf von BEV und FCEV



Stromverbrauch Fahrzeug kWh/100km	Fahrleistung pro Jahr	Jahresverbrauch in kWh	BEV in Millionen	Strombedarf in TWh	Erf. zus. Jahresstromerzeugung in TWh
15	15.000	2.250	23	51,75	56,25
20	15.000	3.000	23	69,00	75,00
25	15.000	3.750	23	86,25	93,75
30	15.000	4.500	23	103,50	112,50

### Strombedarf für ZEV

- Bei 50 % BEV-Anteil in Deutschland (derzeit ca. 46,5 Mio. Pkw): Strombedarf von ca. 52 bis 104 TWh, entsprechend einer Erzeugung von 56 bis 113 TWh
- Bei Einsatz von FCEV und gleicher Marktdurchdringung: Strombedarf von 120 bis 240 TWh bzw. Stromerzeugung von ca. 130 bis 260 TWh

### Stromaufkommen

- Im Vergleich zur Stromerzeugung von 2017 (550 TWh) eine um 21 % größere Erzeugung bei BEV, bei FCEV eine um rund 50 % größere Erzeugung
- Strombedarf für die Wasserstoffherstellung entspricht bei 80 % Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung dem zu erwartenden Stromüberschuss von 220 bis 270 TWh

# Energiebeschaffung (2)

## Strombeschaffung / H<sub>2</sub>-Bereitstellung



### Strombeschaffung

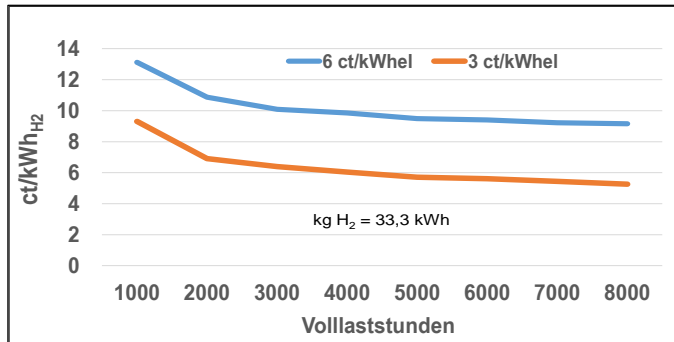
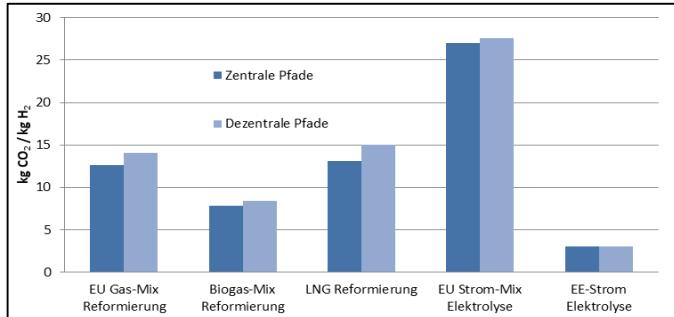
- Ausbau der Erneuerbaren Energien
- Verstärkung und Ausbau des Übertragungsnetzes
- Realisierung von Smart Grids

### Wasserstoffbeschaffung

- Ist-Situation
  - Verfügbarkeit und Kosten: Von der Markteinführung über den Markthochlauf bis hin zum Massenmarkt unkritisch
  - Menge und Preis: Derzeit unzureichende Versorgung mit Tankstellen für grünen Wasserstoff
- Zukünftig
  - Entwicklung des Wasserstoffs zu einem globalen Handelsgut
  - Verringerung der H<sub>2</sub>-Beschaffungskosten durch Bezug aus Ländern mit günstigen Stromkosten

# Energiebeschaffung (3)

## CO<sub>2</sub>-Emissionen / Kosten von H<sub>2</sub>



### Wasserstoffbereitstellung konventionell

- Ca. 90 % des jährlichen Wasserstoffbedarfs (40-60 Mio. t) für industrielle Anwendungen
- H<sub>2</sub>-Produktion derzeit vorrangig per Dampfreformierung, Kohlevergasung und partieller Oxidation (ca. 10-15 kg CO<sub>2</sub> pro kg H<sub>2</sub> – teilweise weiterverwertet)

### Wasserstoffbereitstellung per Elektrolyse

- Technologie mit dem höchsten CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential (Power2Hydrogen)
- Nutzung von regenerativem Strom, der nicht für den konventionellen Bedarf benötigt wird
- H<sub>2</sub>-Gestehungskosten von Vergasungsprozessen bei 2 €/kg ± 30 €ct (ca. 6ct/kWh<sub>H<sub>2</sub></sub>) wird für Elektrolyseure angestrebt

# Energiebeschaffung (4)

## Energiespeicherung/Netzoptimierung



	FCEV	BEV
Netz-/Systemdienlicher Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flexible Betriebsweise von Elektrolyseuren zur Integration Erneuerbarer Energien</li> <li>▪ Einsparpotenzial durch Elektrolyse beim Redispatch-/Einspeisemanagement</li> <li>▪ Vermeidung von Abregelungen</li> <li>▪ Optionen für Regelenergiemarkt durch gezieltes Steuern der Elektrolyseure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Netzlastoptimierung in Verteilnetzen durch Einsatz von Fahrzeugbatterien</li> <li>▪ Bessere Netzauslastung und Vermeiden von Ortsnetzüberlastungen durch gesteuertes Laden</li> <li>▪ Ausgleich von Netzengpässen durch Einspeisung aus der Batterie (Vehicle-to-Grid)</li> <li>▪ Batterien zur Optimierung der Netzführung, u.a. Bereitstellung von Blindleistung</li> </ul>
Energiespeicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ H<sub>2</sub> als Energiespeicher für den mittelfristigen und saisonalen Energieausgleich</li> <li>▪ H<sub>2</sub>-Speicherung in Salz-Kavernen, Untertage-Porenspeicher oder Trägerflüssigkeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Batterien für mittelfristigen und saisonalen Energieausgleich nicht geeignet</li> </ul>
Zusätzliche Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ H<sub>2</sub> in unterschiedlichen Bereichen (Strom, Wärme, Verkehr und Industrie) verwendbar - Potenzial für die Sektorenkopplung.</li> </ul>	

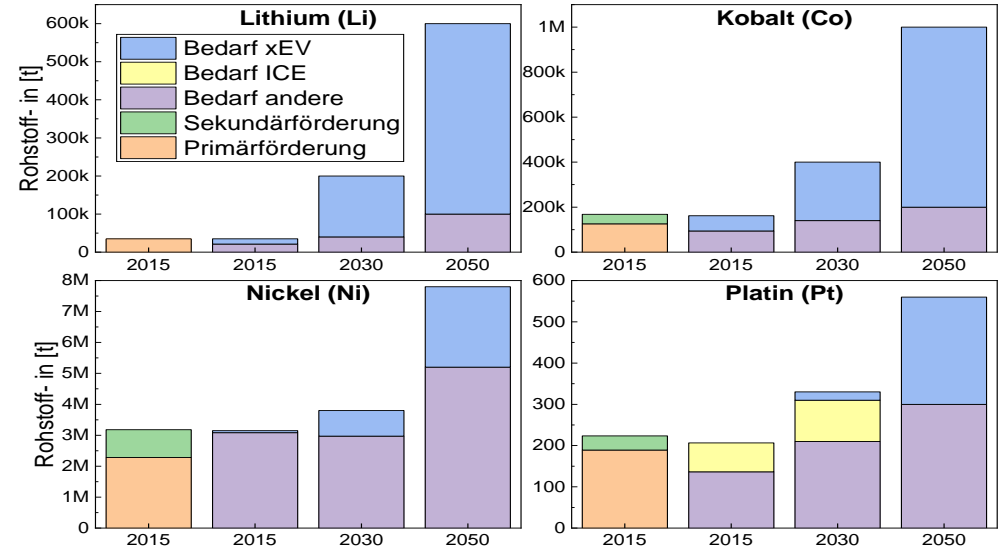
# Kosten (1)

## Kritische Rohstoffe

	Reserven	Ressourcen
Lithium	14 Mt	48 Mt
Nickel	80 Mt	135 Mt
Kobalt	8 Mt	26 Mt
Platin	20 kt	30 kt

### Kritische Rohstoffe

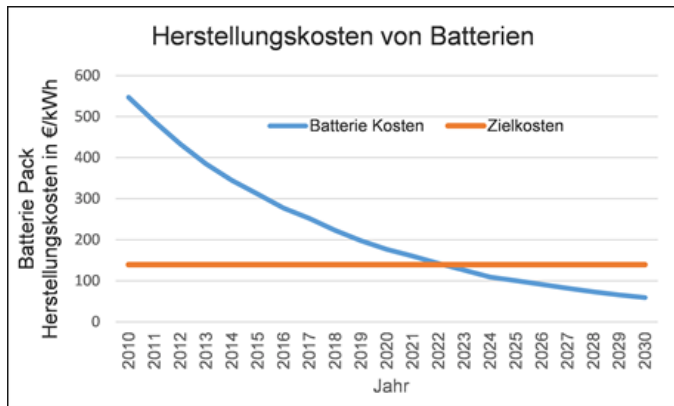
- Batterien: Lithium, Nickel und Kobalt
- Brennstoffzellen: Platin, mit abnehmender Tendenz



**Ausbau der Förderkapazitäten, bevorzugt durch Steigerung der Recyclingrate**

# Kosten (2)

## Kostenentwicklungen



### Kostenentwicklung bei BEV

- Kostenreduktion aktuell deutlich ausgeprägter als bei Brennstoffzellensystemen, da Serienfertigung für Batteriesysteme weiter fortgeschritten als bei Brennstoffzellen

### Kostenentwicklung bei FCEV

- Sinkende Kosten für Brennstoffzellensysteme erwartet (bis 2020 auf 47 US\$/kW bei Aggregatgröße von 80 kW und Produktionsvolumen von 100.000 Einheiten pro Jahr)
- Kosten für Wasserstofftank 700 bar mit einer Kapazität von 5,6 kg (etwa 185 kWh): Weniger als 16 US\$/kWh (also etwa 3.000 US\$ für diesen Wasserstofftank) erwartet
- **Kosten für die Nutzung von BEV und FCEV derzeit dominiert von Anschaffungskosten**
- **Bei Serienfertigung und höheren Transportgewichten bzw. Reichweitenanforderungen Kostenvorteile für das FCEV gegenüber BEV**



- Beitrag von Brennstoffzellen- und Batterietechnologien zum Erreichen der politischen Ziele im Verkehrssektor
- Nachhaltiger Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung bei Einsatz Erneuerbarer Energien
- Potenzial für mittel- bis langfristige Minderung der volkswirtschaftlichen Kosten der Mobilität im Vergleich zum Status quo
- Derzeit Reichweitenvorteile für Brennstoffzellen-Fahrzeugen bei gleichzeitig größerer Nutzlast
- Mindestens um etwa den Faktor 2 größere Effizienz von Batteriefahrzeugen im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen
- Kleinere Infrastrukturinvestitionen für BEV bei geringer Marktdurchdringung, bei hoher Marktdurchdringung Kostenvorteile für H<sub>2</sub>-Infrastrukturem erwartet
- Kostenvorteile für Brennstoffzellenfahrzeuge bei höheren Nutzlast- und Reichweitenanforderungen
- Vorteile durch den netz- bzw. systemdienlichen Betrieb von Elektrolyseuren sowie H<sub>2</sub> als Langzeitspeicher
- Unterschiedliche Einsatzpräferenzen für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge; sie können sich jedoch sinnvoll ergänzen
- Unterstützung des Markthochlaufs durch Umstellung von Fahrzeugflotten auf Elektrofahrzeuge im privaten wie öffentlichen Bereich

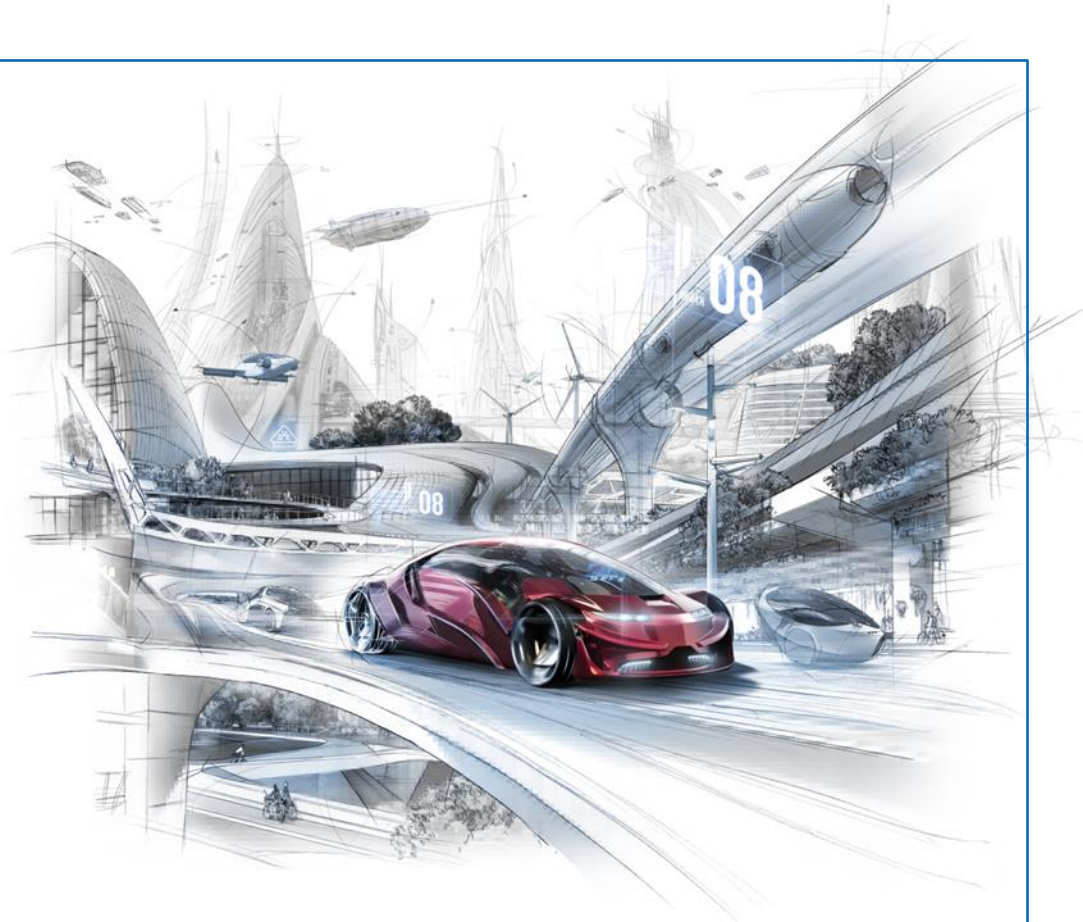
# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Wir gestalten die e-diale Zukunft.  
Machen Sie mit.

## Ihr Ansprechpartner:

Energietechnische Gesellschaft  
im VDE (ETG)

Tel. +49 69 6308-346  
[etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)



# VDE