

Elektrische Energiespeicherung Herausforderungen für Autos

Prof. Dr. Irmgard Buder

Erneuerbare Energie und Elektromobilität

Hochschule Rhein-Waal

Elektromobilität in Deutschland

ELEKTROMOBILITÄT

Einigung auf Kaufprämie für E-Autos

Der Bund will künftig den Kauf von Elektroautos fördern. Außerdem wird weiteres Geld in den Ausbau der Ladeinfrastruktur gesteckt. Insgesamt stellt die Bundesregierung rund eine Milliarde Euro zur Verfügung.



Elektroautos

Der Zuschuss ist ein Flop

Die Kaufprämie für Elektroautos sollte den Durchbruch für die E-Mobilität bringen. Die Bilanz nach einem halben Jahr ist allerdings ernüchternd.

Von **Hanne Schweitzer**

Zeit Online 2.1. 2017

Kaufprämie für Elektrofahrzeuge beschlossen: Bund und Ind bringen.

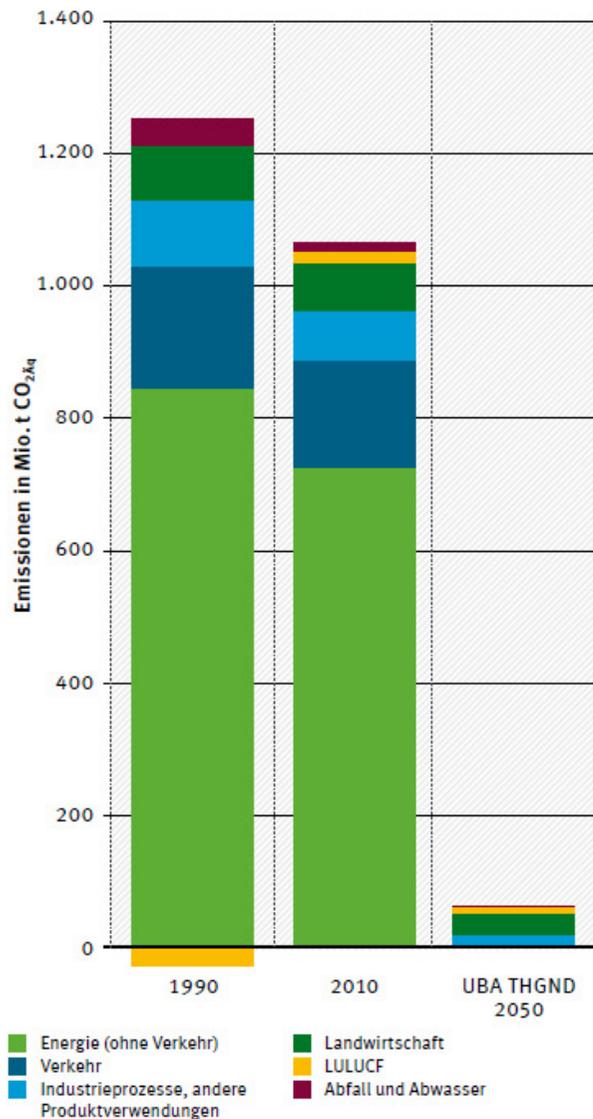
Foto: *picture alliance/dpa/Schmidt*

Bundesregierung 27. 4. 2016 von
<https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/fuer-elektroautos-beschlossen.html>

Warum Förderung von E-Autos?

Abbildung 1:

Treibhausgasemissionen^{1,2}



- Reduktion von CO₂-Emissionen/ Erreichen der Klimaschutzziele Deutschland und der EU
- Reduktion Schadstoffbelastung durch Autoverkehr (Feinstaub, Stickoxide u.a.)
- Entwicklung Leitmarkt Elektromobilität
- Verringerung Abhängigkeit von Importen?

Quelle: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Herausgeber: Umweltbundesamt, von www.uba.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050 (6.02.2017)

Herausforderungen für Elektroautos

ELEKTROMOBILITÄT

Die vier Herausforderungen für das E-Auto



Die vier Herausforderungen:

- Kosten
- Reichweite
- Ladeinfrastruktur
- Emotion
- **Sicherheit?**

Elektroautos verkaufen sich in Deutschland nach wie vor nur schleppend. Auf einigen Problemfeldern deuten sich jedoch Fortschritte an: Ab 2017 könnte das Elektro-Zeitalter tatsächlich beginnen.

09.03.2016 Annette Napp, Dirk Gulde

von <http://www.auto-motor-und-sport.de>

Herausforderungen an die Batterie

Von **fünf** Herausforderungen betreffen vier die Batterie als zentrales Element des E-Autos

- **Kosten**
 - **Anschaffung**
 - **Wie lange hält die Batterie**
- **Reichweite**
- Ladeinfrastruktur
- **Sicherheit**
- Emotion

Ladeinfrastruktur ist indirekt auch von Batterieentwicklung betroffen:

- Wenn Batterien schnell-ladefähig sind \Rightarrow höhere Kapazität Ladesäule
- Höhere Reichweiten \Rightarrow längere Wege zu Ladesäulen auf Langstrecken möglich

Benchmark Benzintank

Eigenschaften einer ideale Batterie für Elektroautos wären (vgl. mit Benzinauto)

- Ladezeiten unter 15 min, besser unter 5 min
- Energiedichte von ca. 12 kWh/kg, bzw. ca. 10 kWh/l
- ca. 90% Wirkungsgrad Elektromotor verglichen mit ca. 30 % Wirkungsgrad Ottomotor: Vielleicht reichen auch 4 kWh/kg bzw. 3.3 kWh/l?
- **Sicher**
- **Haltbar (150 000 km)**
- **Kein höherer Preis!**



Ziele für Fahrzeugbatterien

Angelehnt an USABC (2010)

Ziele für 2020

Verkaufspreis:	100 €/kWh (System), 77 €/kWh (Zelle)
Lebensdauer:	15 Jahre
Lade/Entladezyklen:	1000
Spez. Energiedichte:	235 Wh/kg (System), 350 Wh/kg (Zelle)
entspricht Reichweite:	128 kg Batterie: ca. 150 km 340 kg Batterie: ca. 400 km
Laderate:	80 % in 15 min Schnell-Ladung

Quelle: USABC 2010, http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articles_id=85

E-Autos auf dem Markt: Nissan Leaf

Nissan Leaf		
Energiespeicher	24 kWh	30 kWh
Preis		28060 € [1]
Preis Batterie		5900 €
		197 €/kWh
Garantie	8 Jahre/160 000 km	8 Jahre/160 000 km
Spez. Energiedichte System	110 Wh/kg	126 Wh/kg
Reichweite	110 – 140 km	140 - 170 km
Ladezeiten	30 min 80 % mit 50 kW DC 7 -9 h 240 V AC	30 min 80 % mit 50 kW D 7 -9 h 240 V AC



By IFCAR - Own work, Public Domain,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17238574>

E-Autos auf dem Markt: Tesla Model S

Tesla Model S	
Energiespeicher	60 kWh – 100 kWh
Preis	ab 69 000 € (60 kWh) ab 106 729 € (100 kWh) [2,3]
Preis Batterie	nach 8 Jahren für 1100 € Batteriewechsel
Garantie	8 Jahre/200 000 km
Spez. Energiedichte System (85 kWh)	160 Wh/kg
Reichweite (85 kWh)	354 – 386 km
Ladezeiten	40 min 80 % mit „Supercharger“ 20 h 110 V/ 240 V
Haltbarkeit	5 % / 50 000 km berichtet



By Jeremy from Sydney, Australia - Tesla Model S 60, CC BY 2.0, von <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=48007368>

Sicherheit von Lithium-Ionen Batterien

REUTERS

Tesla grapples with impact of battery fire in U.S.

Tesla grapples with impact of battery fire in U.S.



Brennendes E-Auto (Tesla Modell S)

<http://www.reuters.com/article/us-autos-tesla-fire-idUSBRE9920SX20131003>

Feuergefahr von Lithium-Ionen-Batterie größer als von Benzinautos?

Unfälle wegen Lithium-Ionen-Batterien



Abgebranntes Samsung Galaxy Note 7

http://www.chip.de/artikel/Samsung-Galaxy-Note-7-Akku-Gate-Grund-fuer-explodierende-Handys-jetzt-klar_100303390.html



Brennendes APU-System in Boeing 787-8

Credit: National Transportation Safety Board (NTSB)/Wikimedia Commons,

<https://www.scientificamerican.com/article/how-lithium-ion-batteries-grounded-the-dreamliner/>

Risiken der Lithium Ionen Technik

Thermal Runaway:

Überhitzung durch exotherme Reaktion eines sich selbst verstärkenden Prozesses.

In Li-Ionen-Batterien z. B. durch:

1. zu hohe Erwärmung (Boeing 787)
2. Kurzschluss durch Verunreinigung, Defekt etc. (Samsung)
3. Überladung/Tiefentladung



Lithium-Cobalt-Oxid
Batterie nach Brand

Von National Transportation Safety Board -
http://www.nts.gov/investigations/2013/boeing_787/photos/1-7-12_JAL787_APU_Battery_s.jpg
http://www.nts.gov/investigations/2013/boeing_787/boeing_787.html
(description), Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24524953>

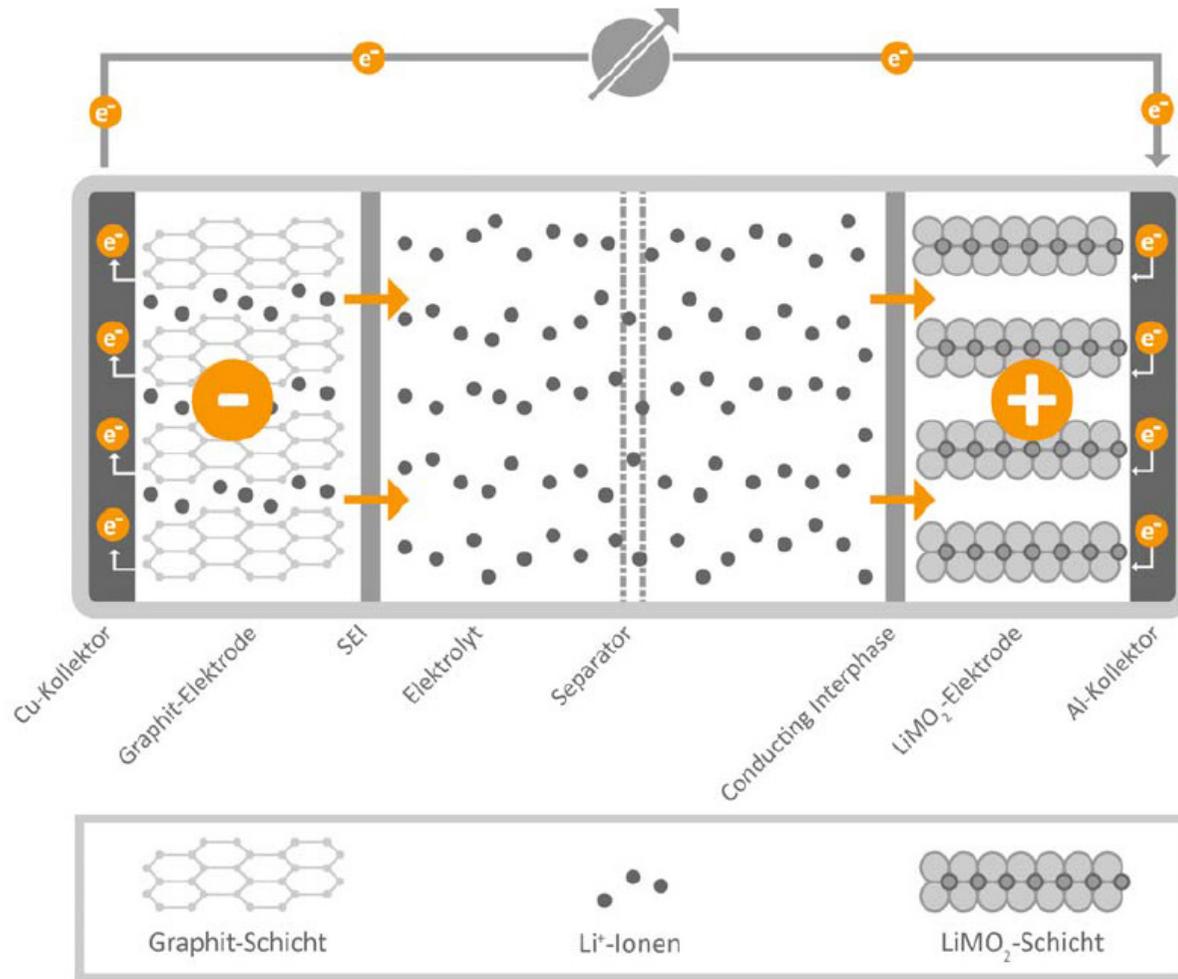
Sicherheitsmaßnahmen

1. Wahl von thermisch stabilen Elektrodenmaterialien
2. Zur Verhinderung von Kurzschlüssen:
 - a. Trennung von Anode und Kathode durch zusätzliche keramische Membran (Litarion)
 - b. Verwendung von Polymeren statt flüssigen Elektrolyten
 - c. Wahl von Elektrodenmaterialien, die Bildung von metallischem Lithium unterdrücken
 - d. Qualitätskontrolle der verwendeten Komponenten
3. Ladereglung, die Tiefentladung und Überladung verhindert

Allerdings: Sicherheitsmaßnahme gehen teilweise auf Kosten von:

- Reichweite/Energiekapazität
- Kosten
- Schnell-Ladefähigkeit

Aufbau Lithium-Ionen-Batterie



Ladevorgang

Anode:



Kathode:



Elektrolyt:

trennt Anode und Kathode
ermöglicht Lithiumionen-
transport

Stabil im Bereich 0 - 4.5 V

Schema Lithium-Ionen-Batterie

IKT für Elektromobilität „Kompendium Li-Ionen-Batterien Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen“ S. 3 2015

Lithium-Cobalt-Oxide als Kathodenmaterial



A 18650 Lithium-Ionen Batterie

Lead holder CC By-SA 3.0

Lithium-Cobalt-Oxide	Kathode [4]
Speicherkapazität	150 -200 Wh/kg
Kosten	Cobalt, strategisch relevant und teuer
Ladezeit	0.7 -1 C, Schnell-Ladung verkürzt Lebensdauer
Haltbarkeit	500 -1000 Zykl. Kapazitätsverlust bei hohen Entladeraten oder Tiefentladung
Sicherheit	ab 150 ° C thermal runaway möglich
Verwendung	Tesla Roadster, elektronische Geräte, APU System Boeing 787

LMO als Kathodenmaterial

Lithium-Mangan-Oxid	Kathode [4]
Speicherkapazität	100 -150 Wh/kg
Kosten	Manganvorkommen sehr groß und einfach zu erschließen
Ladezeit	bis 3C
Haltbarkeit	300 – 700 temperaturempfindlich
Sicherheit	ab 250 °C thermal runaway möglich
Verwendung	medizinische Anwendungen E-Autos (Nissan Leaf alt)

NMC als Kathodenmaterial

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt Oxid	Kathode [4]
Speicherkapazität	150 – 220 Wh/kg
Kosten	Nickel und Cobalt sind teuer
Ladezeit	1 – 2C
Haltbarkeit	1000 - 2000
Sicherheit	ab 210 °C thermal runaway möglich
Verwendung	Pedelec-Batterien, E-Autos, im neuen Nissan Leaf, Chevy Volt, BMW i3 in Kombination mit LMO

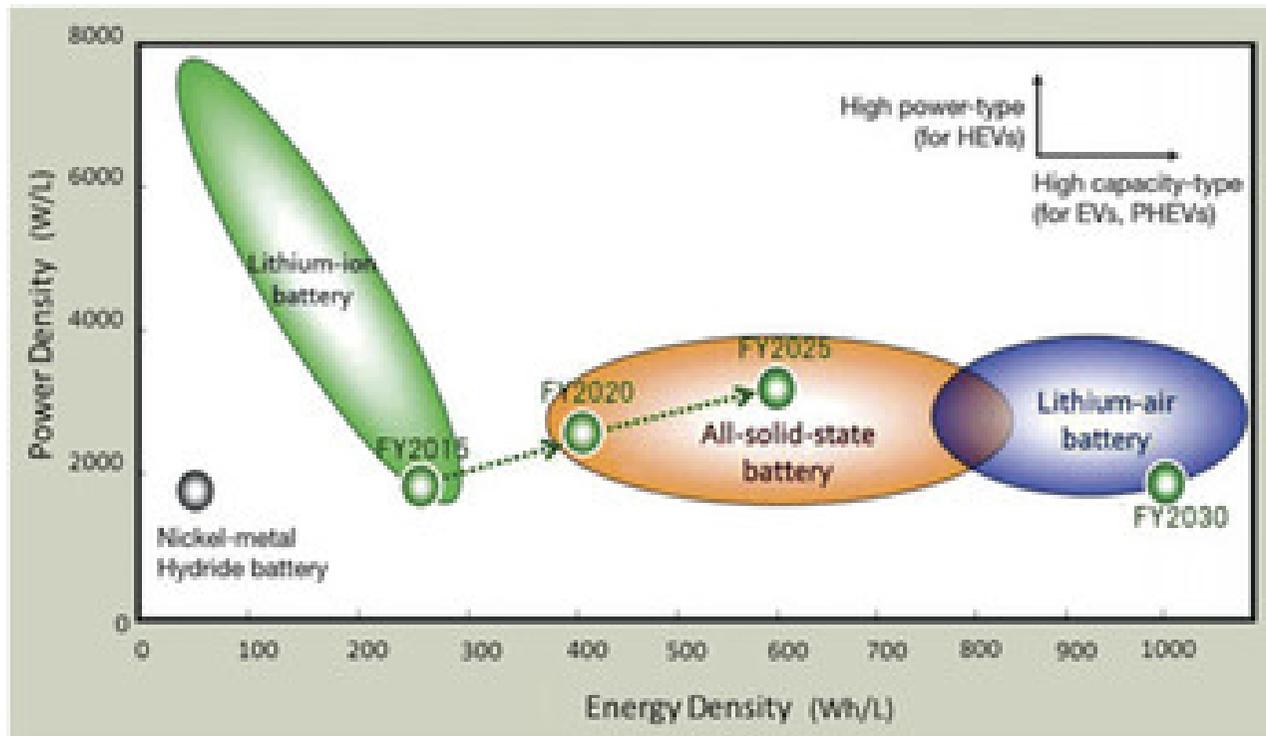
Zusammenfassung: Stand der Batterietechnik

	Ziele USABC	Erreicht wurde	Bemerkung
Reichweite/ Energiekapazität	235 Wh/kg 350 Wh/kg	200 -260 Wh/kg	300 Wh/kg vorausgesagt für NCA [5]
Verkaufspreis	100 €/kWh 77 €/kwh	100 \$/kWh	andere Batterietechnologie [6]
Laderate	80 % in 15 min	80 % in 30 min	Nissan Leaf 30 kWh
Lebensdauer	15 Jahre	8 Jahre Herstellergarantie	
Zyklenstabilität	1000	1000	

Verbesserungen bei einer Eigenschaft führt teilweise zu Verschlechterungen bei anderen Eigenschaften!

Bei Energiedichte und Lade-Rate nur moderate Verbesserungen!

Neue Entwicklungen der Batterietechnik

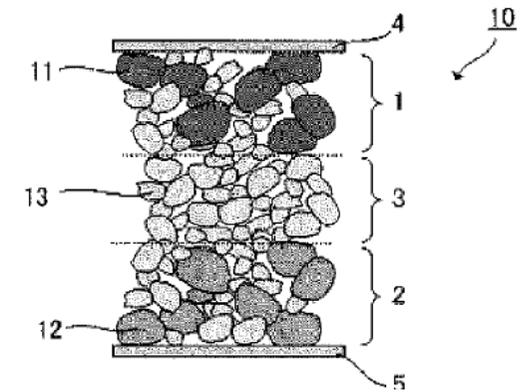


Solid-state batteries enter EV fray, <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/div-classtitlesolid-state-batteries-enter-ev-fraydiv/2BB77B2BBE24F20F4234C86537E77CEC/core-reader>

Elektrolyt: Verwendung von festen Elektrolyten

Idee: Verwendung von Fest-Elektrolyten ermöglicht:

- höhere Packungsdichte
- Verbesserte Sicherheit durch Verwendung nicht brennbarer Materialien
- Höhere Zyklenstabilität



Koichi SUGIURA et al. Pub. No.: US
2016/0248093 AI (43) 2016

Forschungsbedarf:

- Verbesserung Li-Ionenleitfähigkeit
- Verringerung Durchtrittswiderstände an Grenzflächen durch Optimierung der sich bildenden Zwischenschichten (SEI)

Durchbruch bei der Ionenleitfähigkeit?

2010: N. Kamaya et al. präsentieren neuen Festelektrolyt basierend auf $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ mit einer Ionenleitfähigkeit von 12 mS/cm [7]

2014: A. Kuhn et al. vom MPI in Stuttgart präsentieren neue Materialien basierend auf $\text{Li}_{11}\text{Si}_2\text{PS}_{12}$ mit noch höherer Leitfähigkeit als $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ [8]

Anode: Herausforderung metallisches Lithium

Verwendung von metallischem Lithium statt Lithiumionen interkaliert in

Graphite oder Titanat

(bekannt für primäre Lithiumbatterien)

Herausforderung:

Lithium neigt bei Abscheidung als Metall zu Dendritenbildung ⇒

Gefahr Kurzschluss

Idee: Feste Elektrolyte könnten Dendritenbildung unterdrücken

Metallisches Lithium als Anode

MIT: Ausgründung einer Batteriefabrik –Solid Energy- die metallisches Lithium als Anodenmaterial in Kombination mit einem neu entwickelten Elektrolyt in aufladbaren Batterien verwendet.



Rob Matthesen
„Doubling battery power of consumer electronics” 2016
<http://news.mit.edu/2016/lithium-metal-batteries-double-power-consumer-electronics-0817>

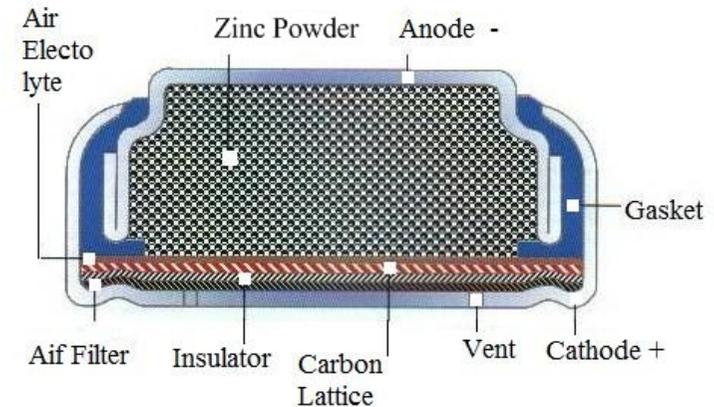
Grundlegende Verbesserungsmöglichkeiten: Kathode

Warum nicht Luft?

Schon bekannt: Zink-Luft-Batterien als primäre Batterien

Idee: reversible Lithium-Ionen-Luft Batterien

Allerdings: Bisher 1.2 V Differenz zwischen Lade- und Entladespannung
⇒ 30 % Energieverlust beim Laden



Aufbau einer Zink-Luft Batterie

Von Francis E Williams - Eigenes Werk, GFDL,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12193822>

Die Lösung: Sauerstoff in Kathode gebunden

Kathode: Li_2O_2 und LiO_2 in Co_3O_4



Energiedichte: 1500 Wh/kg bezogen auf LiO_2 , 1000 Wh/kg wenn Co_3O_4 -Gerüst berücksichtigt wird.

Batterietests mit Li-Titanate Anode

Weiter Vorteil: Keine Überladung möglich, da dann eine passivierende Nebenreaktion auftritt? [9, 10]

Zusammenfassung

Viele Entwicklungen im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien
aber: auf dem Markt verfügbare Lithium-Ionen-Batterien erfüllen trotz
einer Vielzahl von Entwicklungen noch nicht die gewünschten
Anforderungen bzgl.

- Reichweite
- Kosten
- Ladezeiten
- Zyklenstabilität

aber: Neuentwicklungen in der Lithium-Ionen-Batterietechnik könnten
Elektroautos bald wirklich konkurrenzfähig zum Auto mit
Verbrennungsmotor machen!

Konkurrenz von der anderen Seite

Toyota Mirai: Wasserstoff marsch!

Von Christian Frahm



Huch, sind die Aliens gelandet? Nein, es ist nur der Toyota Mirai, das erste Großserienfahrzeug mit Brennstoffzelle. Wer sich dafür interessiert, muss hart im Nehmen sein - das gilt nicht nur für die Optik.

Source: Christian Frahm „Toyota Mirai: Wasserstoff marsch!“ Spiegel online 30.10.2015, retrieved from <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/toyota-mirai-im-test-warten-auf-die-zukunft-a-1059127.html>, 19.11.15

Toyota Mirai:

Energiekapazität: 5 kg H₂

Preis: 78 540 €

Verbrauch: 0.76 kg/ 100 km

Reichweite: 656 km

Ladezeiten: 3 min. [10]

Wasserstoffautos gibt es schon!

Reichweiten von über 500 km kein Problem,

aber Verfügbarkeit von H₂-Tankstellen!

Literatur

- [1] Nissan: „Nissan Leaf 2016: Jetzt mit 30 kWh und 250 Kilometern Reichweite“ Pressemeldung 10.09.2015, <http://newsroom.nissan-europe.com/de/de-de/media/pressreleases/137066>
- [2] Tesla „Model S Performance und Sicherheit in jeder Situation“ https://www.tesla.com/de_DE/models
- [3] Ecomento, das Elektroauto Portal, „Neues Tesla Model S 100D mit 632 Kilometern Reichweite (Model X 100D mit 565 Kilometern)“ 20.1.2017, <https://ecomento.tv/2017/01/20/tesla-model-s-100d-632-kilometer-reichweite-model-x-100d-565-kilometer/>
- [4] N. Nitte et al. „Li-ion battery materials: present and future“ Materials Today 18 Vol. 5, S. 253 ff. 2015,
- [5] Batteryuniversity, BU-205: Types of Lithium-ion, http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [6] Sarah J. Gerssen-Gondelach, André P.C. Faaij “Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term” Journal of Power Sources 212, S. 111 ff, 2012
- [7] Noriaki Kamaya et al. “A lithium superionic conductor“ Nature Materials 10 S. 682 ff. 2011 doi:10.1038/nmat3066
- [8] Alexander Kuhn “ A new ultrafast superionic Li-conductor: ion dynamics in Li₁₁Si₂PS₁₂ and comparison with other tetragonal LGPS-type electrolytes”, Phys.Chem.Chem.Phys.. 16, S. 14669 ff 2014
- [9] Zhu Zhi et al. Nature Energy 2016 “Anion-redox nanolithia cathodes for Li-ion batteries”DOI: 10.1038/NENERGY.2016.111
- [10] D. L. Chandler “New lithium-oxygen battery greatly improves energy efficiency, longevity” MIT News 2017 <http://news.mit.edu/2016/new-lithium-oxygen-battery-greatly-improves-energy-efficiency-longevity-0725>
- [11] Christian Frahm „Toyota Mirai: Wasserstoff marsch!“ Spiegel online 30.10.2015

Weitere Literatur

V. Etachari et al. “Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review “Energy Environ. Sci., 2011,4, 3243-3262, DOI: 10.1039/C1EE01598B

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

