

Modul WS 2014/2015 Neue Antriebe

Formelsammlung Energiespeicher

- Stromstärke i [A]
- Spannung U [V]
- Ladung $Q = i \times t$ [Ah]
- Energie $W = U \times Q$ [Wh]
- Leistung $P = W / t$ [W]

- **C-Rate – Normierung des Stromes auf die Speicherkapazität:**

Kapazität = Strom x Zeit

C [Ah] = i [A] x t [h]

$\rightarrow i$ [A] = C [Ah] / t [h]

0,1 C-Rate: Ladung bzw. Entladung in 10 Stunden

0,5 C-Rate: Ladung bzw. Entladung in 2 Stunden

1 C-Rate: Ladung bzw. Entladung in 1 Stunde

2 C-Rate: Ladung bzw. Entladung in 0,5 Stunden

5 C-Rate: Ladung bzw. Entladung in 0,2 Stunden

- **Übersicht Energieeinheiten**

Umrechnungsfaktoren verschiedener Energieeinheiten						
	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	m ³ Erdgas
1 kJ	1	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	0,000032
1 kcal	4,1868	1	0,001163	0,000143	0,0001	0,00013
1 kWh	3.600	860	1	0,123	0,086	0,113
1 kg SKE	29.308	7.000	8,14	1	0,7	0,923
1 kg RÖE	41.868	10.000	11,63	1,428	1	1,319
1 m ³ Erdgas	31.736	7.580	8,816	1,083	0,758	1

- Umrechnung Energieeinheiten

Übersicht über Energieeinheiten		
Einheit	Bezeichnung, Erläuterung	Umrechnung in kJ bzw. kWh
J	Joule	1.000 J = 1.000 Ws = 1 kJ
cal	Calorie	1.000 cal = 1 kcal = 4,186 kJ
Wh	Wattstunde	1 Wh = 3,6 kJ
(kg) SKE	(Kilogramm) Steinkohleeinheit	1 kg SKE = 29.308 kJ
(kg) RÖE	(Kilogramm) Rohöleinheit	1 kg RÖE = 41.868 kJ
oe oder OE	Oil Equivalent	1 oe = 1 RÖE = 41.868 kJ
m ³ Erdgas	Kubikmeter Erdgas	1 m ³ Erdgas = 31.736 kJ
BTU	British Thermal Unit	1 BTU = 0,000293071 kWh = 1,05506 kJ
kpm	Kilopondmeter	1 kpm = 2,72e-6 kWh = 0,00980665 kJ
erg	erg	1 erg = 2,78e-14 kWh = 1e-10 kJ
eV	Elektronenvolt	1 eV = 1,60217733e-19 J = 1,60217733e-22 kJ

© 11/2002 by Volker Quaschnig

- Definitionen bei der Speicherung elektrischer Energie

Nennspannung, Nominal Voltage	Mittlere Klemmenspannung bei 50 % SOC	[V]
Nennkapazität	unter Standardbedingungen entnehmbare Ladung	[Ah]
Spezifische Energie, gravimetrische Energiedichte	auf das Gewicht bezogener Energieinhalt	[Wh/kg]
Energiedichte, volumetrische Energiedichte	auf das Volumen bezogener Energieinhalt	[Wh/l]
Spezifische Leistung	auf das Gewicht bezogene Leistung	[W/kg]
Leistungsdichte	auf das Volumen bezogene Leistung	[W/l]
Selbstentladung	Ladungsverlust pro Zeit, ausgehend vom Volladezustand	[%/Monat]

Ladefaktor: $Q_{\text{Ladung}} / Q_{\text{Entladung}}$

Ladewirkungsgrad: $Q_{\text{Entladung}} / Q_{\text{Ladung}}$

Wirkungsgrad, Effizienz: $W_{\text{Entladung}} / W_{\text{Ladung}}$

SOC: State of Charge

DOD: Depth of Discharge

SOH: State of Health

- **Wichtige Betriebsspannungen von Li-Ionen Zellen:**

Kathode / Anode	Ladeschlußspannung	Entladeschlußspannung
LiCoO ₂ / Graphit	4,20 V	3,00 V
NCM, NCA / Graphit	4,20 V	3,00 V
LiFePO ₄ / Graphit	3,60 V	2,40 V
LiFePO ₄ / Titanat	2,40 V	1,40 V
LiCoO ₂ , NCM, NCA / Titanat	2,80 V	1,80 V

- **Klassifizierung Hazard-Levels gem. EU-Car**

Hazard Level	Classification Criteria, Effect
0	No effect
1	Passive Protection activated
2	Defect Damage
3	Leakage > 50%
4	Venting > 50%
5	Fire or Flame
6	Rupture
7	Explosion

- **Irreversible Energiefreisetzung beim Thermal Runaway**

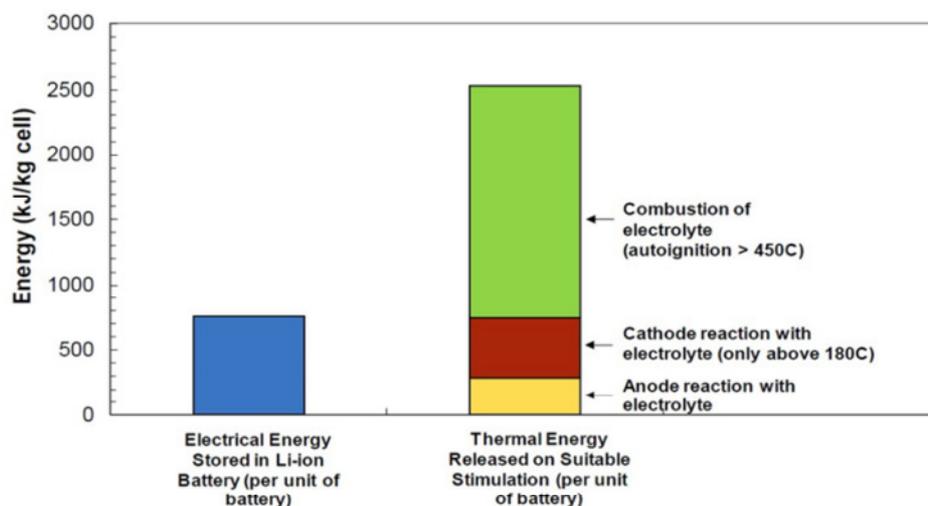
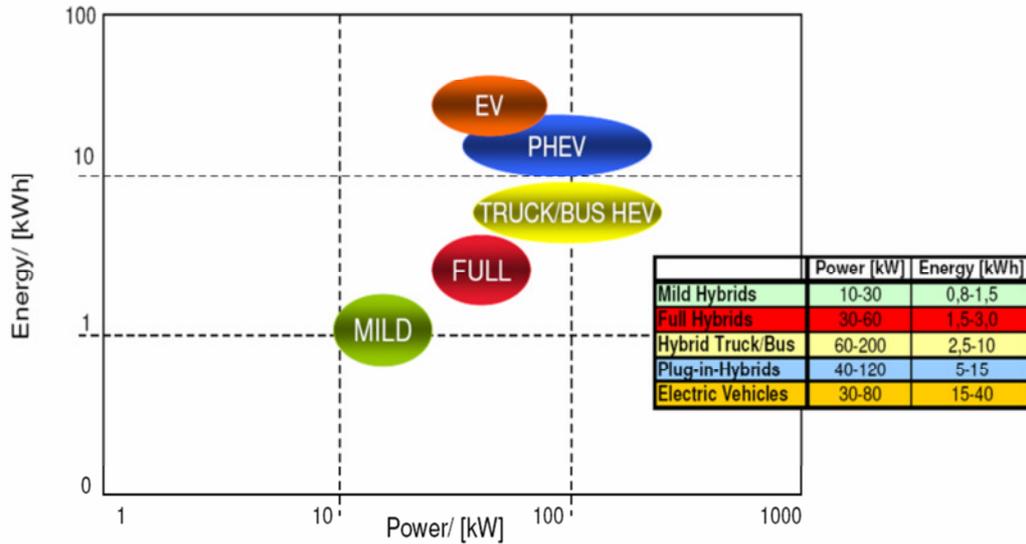


Figure 22. Comparison of stored electrical energy and energy released from decomposition reactions.⁷

- Hybridisierung von Antrieben: Anforderungen augetragen im Ragone-Plot



- Elektrochemische Zellen für Mobilität:

Eigenschaft	Ziel NPE 2020	PbA	NiCd	NiMH	NaNiCl	Li-Ion	Li-Poly	Li-S	Li-Luft
Energiedichte [Wh/kg]	150	-- 20-35	-- 30-50	- 50-80	o 80-100	+ 90-200	+ 180	++ 400	++ 850
Leistungsdichte [W/kg]	600	-- 100	o 600	+ 1.000	-- 170	++ 300-4.000	++	++	--
K. Lebensdauer [Jahre]	10	- 3-5	o 5-15	- < 5	o 8-10	o 5-15	+ +	o	+ +
Zyklusfestigkeit [Zyklenzahl]	2.500	- 1.200	- 2.000	-- 1.000	- 1.500	+ 500-4.000	++	o	+ +
Kosten [€/kWh]	250	++ 100-250	o 250-500	++ 180-220	- 500	-- 300-1.800	--	+ +	o
Sicherheit [EUCAR ⁵ Level]	3	+ +	+ +	+ +	o	- -	-- --	-- --	-- --
Umweltverträglichkeit	k. A.	o	-	o	+	o	o	+ +	+ +
Potenzial		☹	☹	☹	☹	☺	☺	☺☺	☺☺

Bewertungsschema: ++ = sehr gut, + = gut, o = befriedigend, - = ausreichend, -- = nicht ausreichend

- Geometrie Zylindrischer Zelltypen gem. DIN Spec. 91252

	D/ mm	L/ mm	V/ mLiter
14500	14	50	7,7
18650	18	65	16,5
26650	26	65	34,5
26700	26	70	37,2

- Geometrie Prismatischer Zelltypen gem. DIN Spec. 91252

	L/ mm	H/ mm	D/ mm	V/ Liter
HEV	120	85	12,5	0,128
PHEV1	173	85	21	0,309
PHEV2	148	91	26,5	0,357
EV1	173	115	32	0,637
EV2	173	115	45	0,896
MCV1*	173	125	32	0,692
MCV2*	173	125	45	0,973

- **Kenndaten ausgewählter Kraftstoffe**

Kraftstoff	Diesel	Biodiesel	Pflanzenöl	Ottokraftstoff
Energiedichte	11,8 kWh/kg 9,8 kWh/l	10,2 kWh/kg 9,0 kWh/l	10 kWh/kg 9,2 kWh/l	12 kWh/kg 8,9 kWh/l
Preis (04/2008)	0,14€/kWh (1,35€/l)	0,14€/kWh (1,22€/l)	0,09€/kWh (0,85€/l)	0,16€/kWh (1,42€/l)
Vorteile	höchste volumetrische Energiedichte der üblichen Flüssigkraftstoffe	bessere Gesamt-Energiebilanz als Diesel (je nach Betrachtungs-weise)	kein Gefahrgut, ungiftig, (noch) nicht an Ölpreis gekoppelt	handelsüblicher Ottomotor ist auf Benzinbetrieb ausgelegt
Nachteile	Rußbildung, Filter notwendig	Abgase insgesamt ebenso schädlich wie bei Diesel, problematisch bei Temperaturen <-20°C	Kraftstoffbeheizung + meist Motorumrüstung notwendig (aggressiv)	Katalysator notwendig
Verbrennungsmotor	Dieselprinzip, Turbine	Dieselprinzip, Turbine	Dieselprinzip	Otto, Turbine
Anwendung/Verfügbarkeit	Flächendeckend	Flächendeckend, sonst auch mineralischer Diesel tankbar	viele Fahrzeuge im Alltagsbetrieb/ Überall im Einzelhandel und teilweise an Tankstellen	Flächendeckend

Methanol	Ethanol	Wasserstoff (flüssig)	Autogas (LPG)	Erdgas (CNG)
5,47 kWh/kg 4,4 kWh/l	7,44 kWh/kg 5,9 kWh/l	33,3 kWh/kg 2,36 kWh/l	12,8 kWh/kg 6,9 kWh/l	13,0 kWh/kg 2,1 kWh/l
0,22€/kWh (1,00€/l)	0,17€/kWh (1,00€/l)	0,24€/kWh (8,00€/kg)	0,10€/kWh (0,70€/l)	0,07€/kWh (0,95€/kg)
in modifiziertem Ottomotor höherer Wirkungsgrad als Benzin, biologisch leicht abbaubar	in modifiziertem Ottomotor höherer Wirkungsgrad als Benzin, biologisch leicht abbaubar	kein Schadstoffausstoß bei Verbrennung	geringerer Schadstoffausstoß als Ottokraftstoff, besserer Wirkungsgrad als Benzin bei erhöhter Verdichtung	geringerer Schadstoffausstoß als Ottokraftstoff, besserer Wirkungsgrad als Benzin bei erhöhter Verdichtung
geringe Energiedichte	geringe Energiedichte	Verfügbarkeit, hoher Energiebedarf zur Herstellung nötig, sehr geringe volumetrische Energiedichte, Drucktank nötig, niedrige Leistung im Verbrennungsmotor, insgesamt teure Technologie	Drucktank nötig, Verfügbarkeit – daher Motoren meist bivalent ausgelegt (Steigerung der Verdichtung dann nicht möglich)	Drucktank nötig, Verfügbarkeit – daher Motoren meist bivalent ausgelegt (Steigerung der Verdichtung dann nicht möglich)
Otto (rein oder als Gemisch), Diesel (Methanol/Diesel-Gemisch) dichter werdendes Tankstellennetz	Otto (rein oder als Gemisch), im Dieselmotor nur in geringen Mengen beigemischt	spezieller Ottomotor mit hoher Verdichtung, Keramik-beschichtet	Otto (erhöhte Verdichtung sinnvoll) Turbine	Otto (erhöhte Verdichtung sinnvoll) Turbine
dichter werdendes Tankstellennetz	dichter werdendes Tankstellennetz	Versuchsfahrzeuge (zB BMW, Mazda)/ nur wenige Tankstellen	dichter werdendes Tankstellennetz	dichter werdendes Tankstellennetz

(Quelle: Prof. Prexler, HAW Landshut)