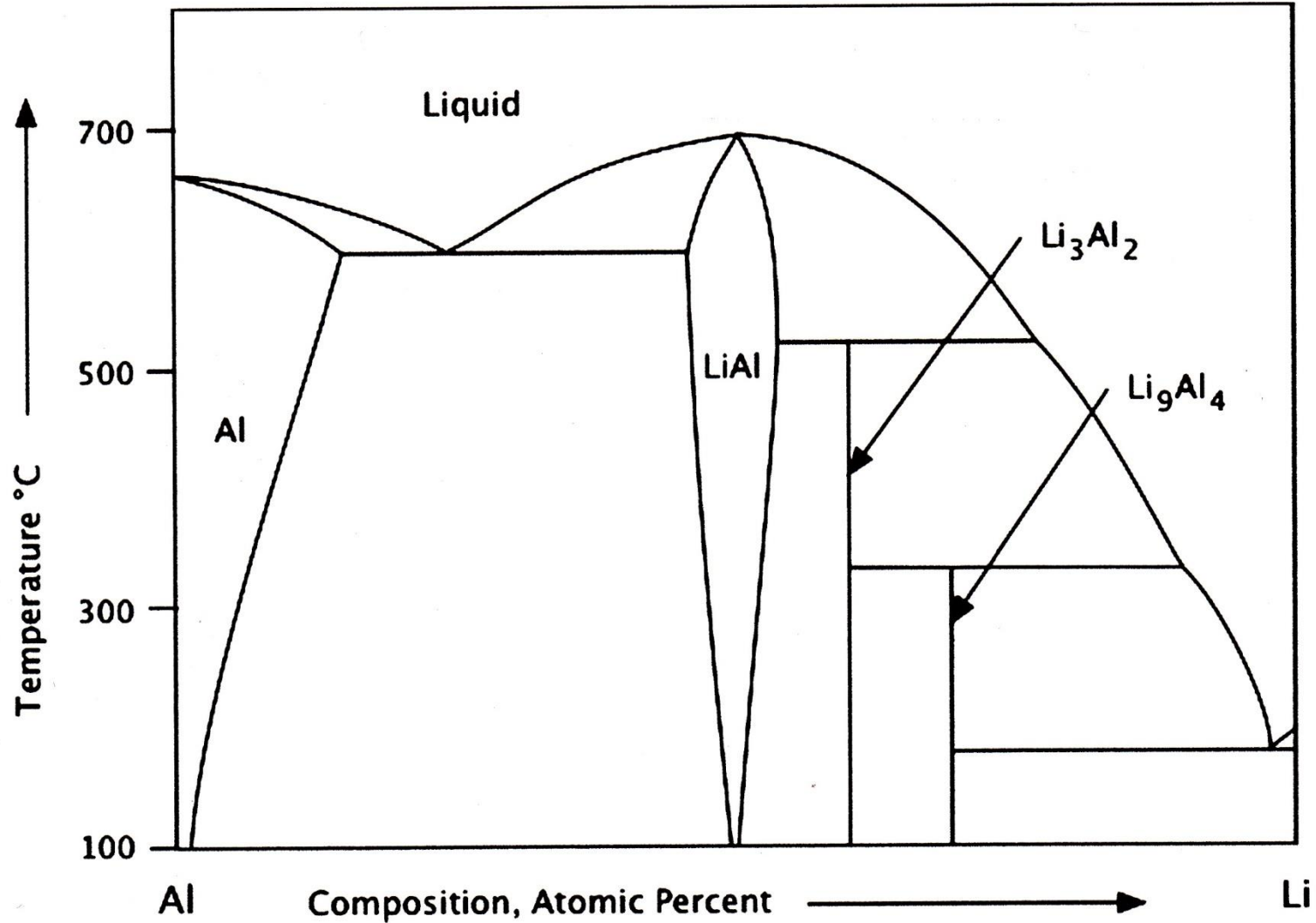
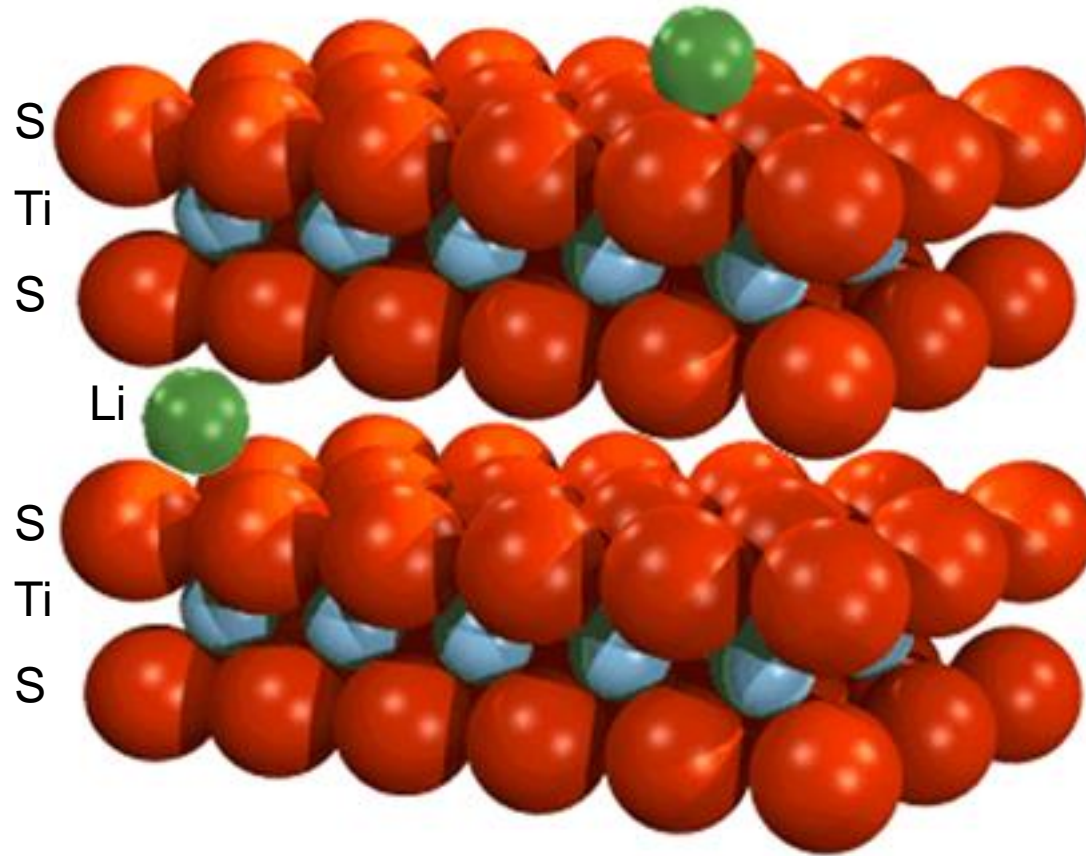


**Themen:**

- Reaktionstypen
- Ladekurven
- Pb-Akkumulator
- Ni-Cd und Ni-MH Akkumulator
- Li-Ionen-Akkumulator
- Aktuelle Entwicklungen

Li-Al Phasendiagramm





Van-der-Waals Gap  
(„Gallery“)

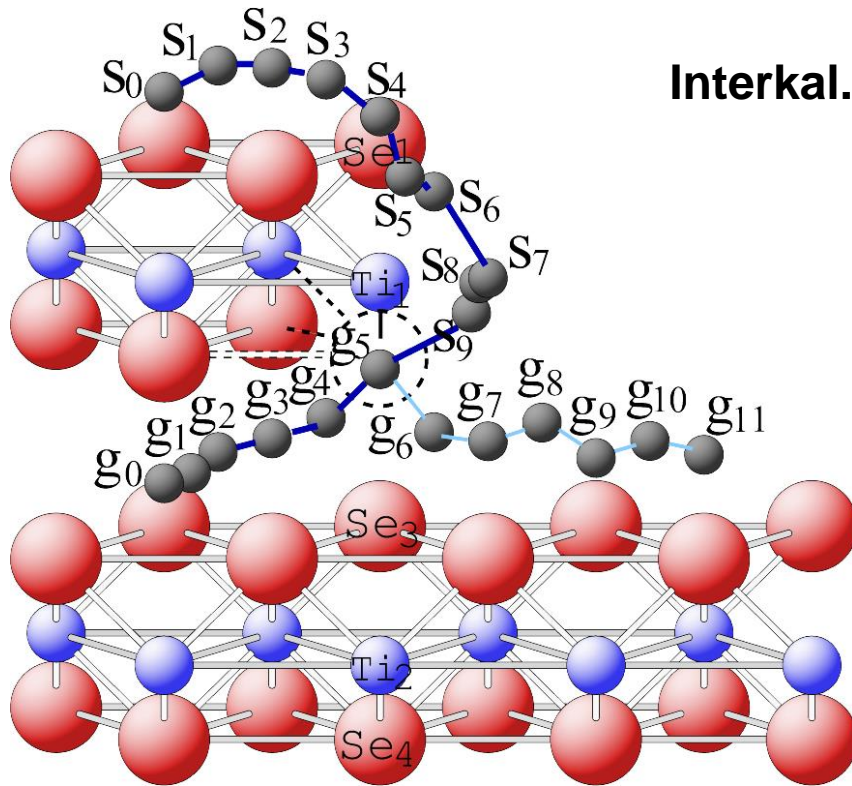
Li /  $\text{TiSe}_2$ :

Bridge 0.026 eV

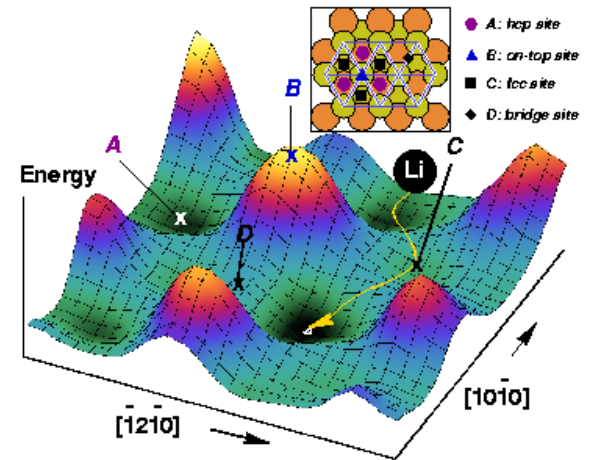
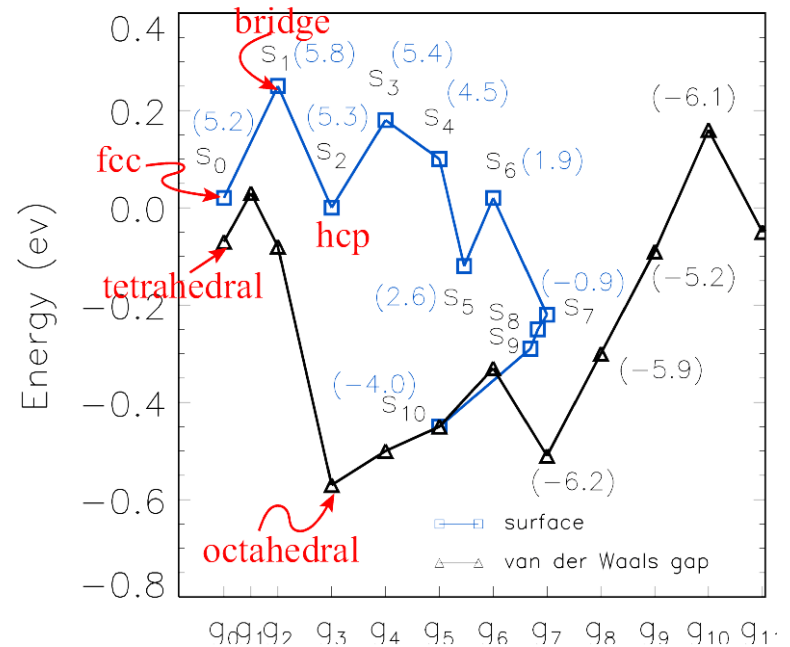
Fcc 0.04 eV

On-top 1.05 eV

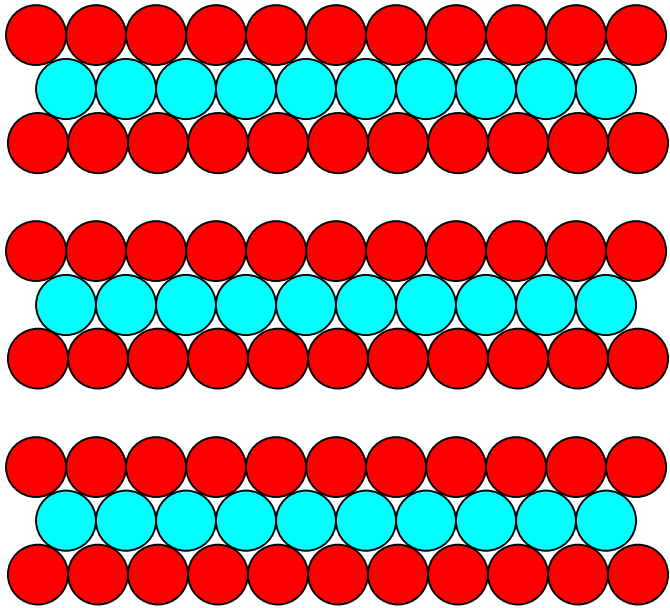
Interkal. 3.81 eV



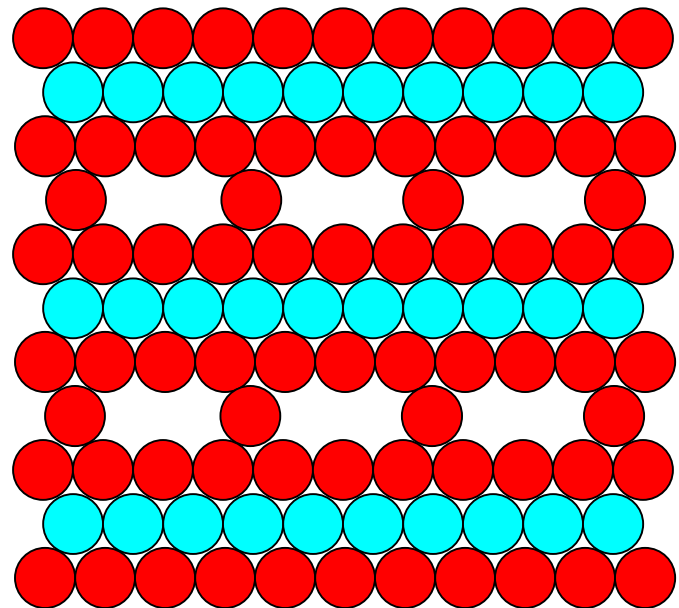
Surf.Sci. 482-484, 424 (2001)

Total Energy at  $\text{TiSe}_2$   $[10-10]$  step

Schichten

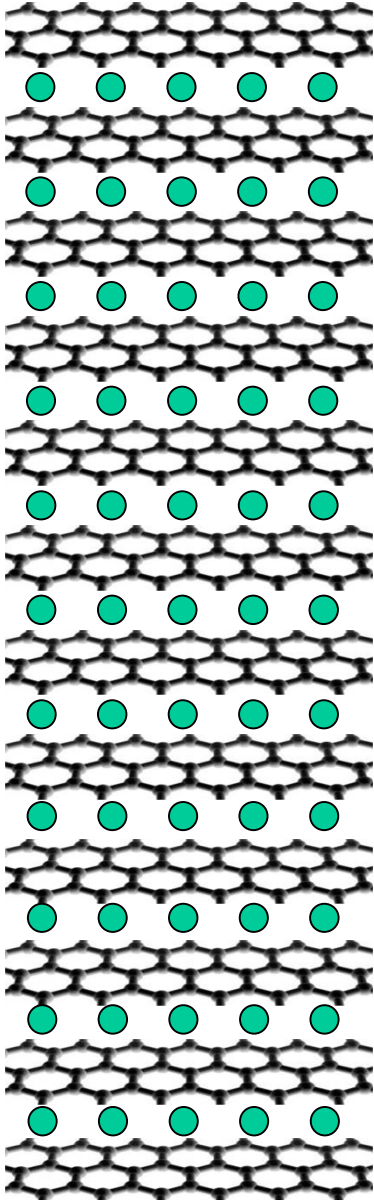


Tunnel

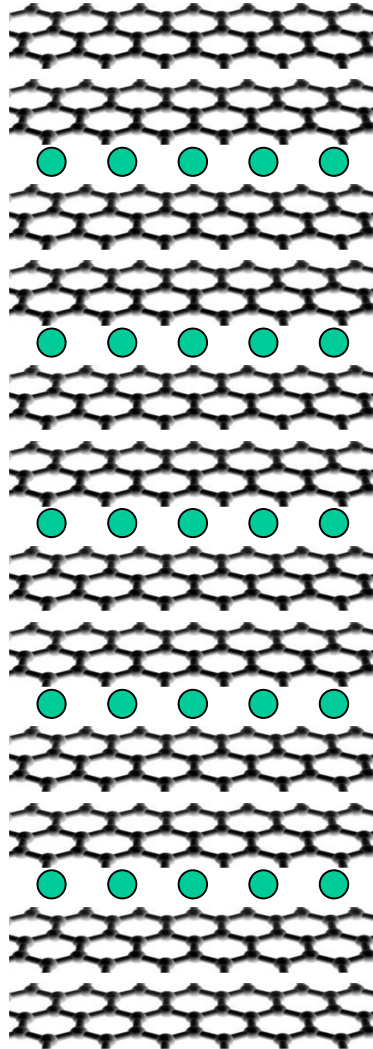


# 6 / 6 Interkalation

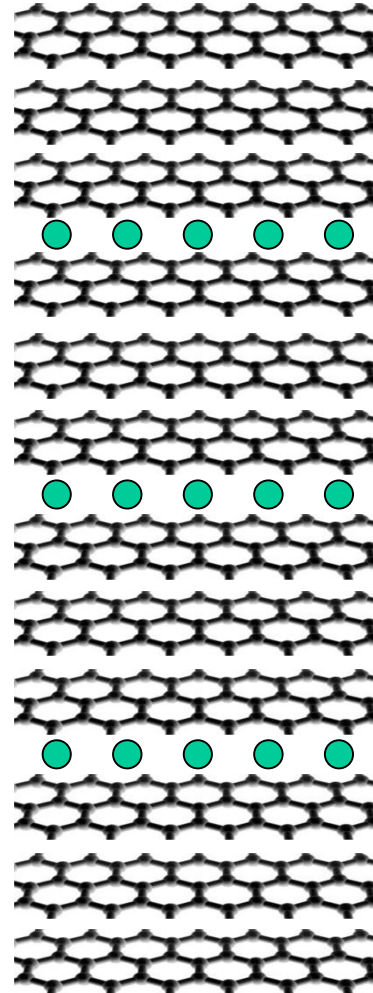
Stage 1



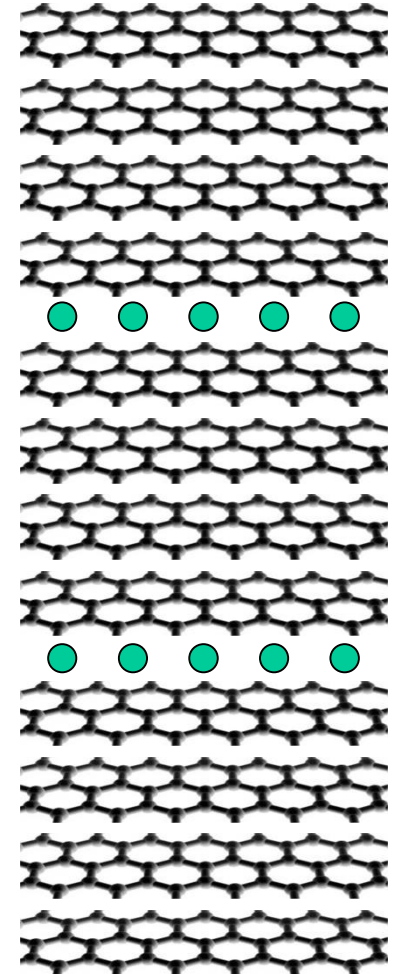
Stage 2



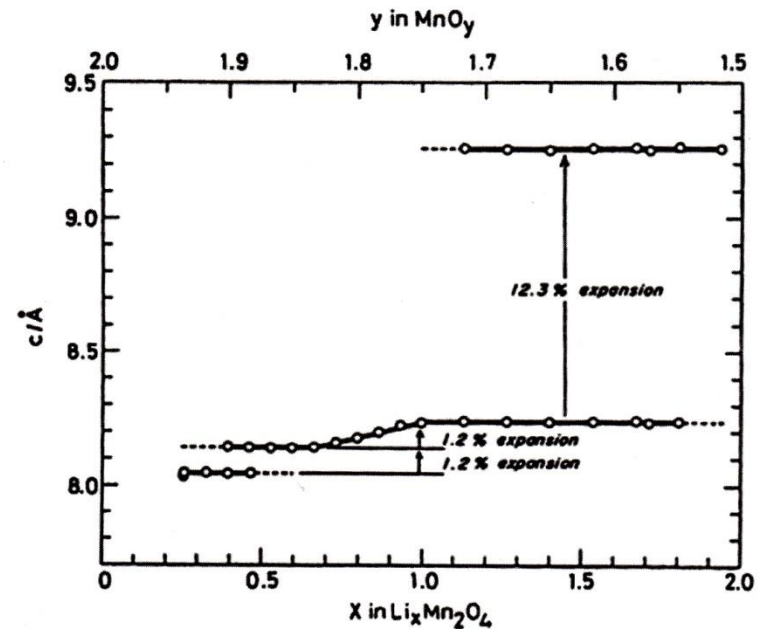
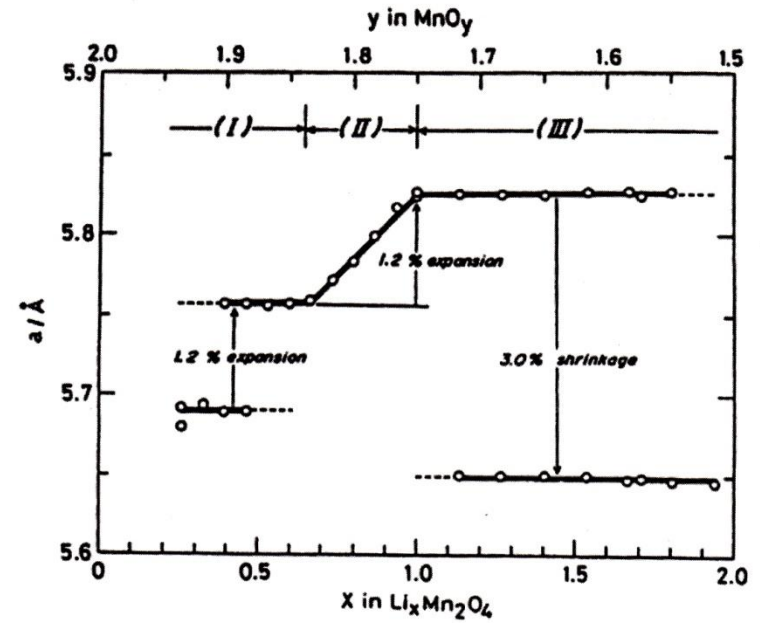
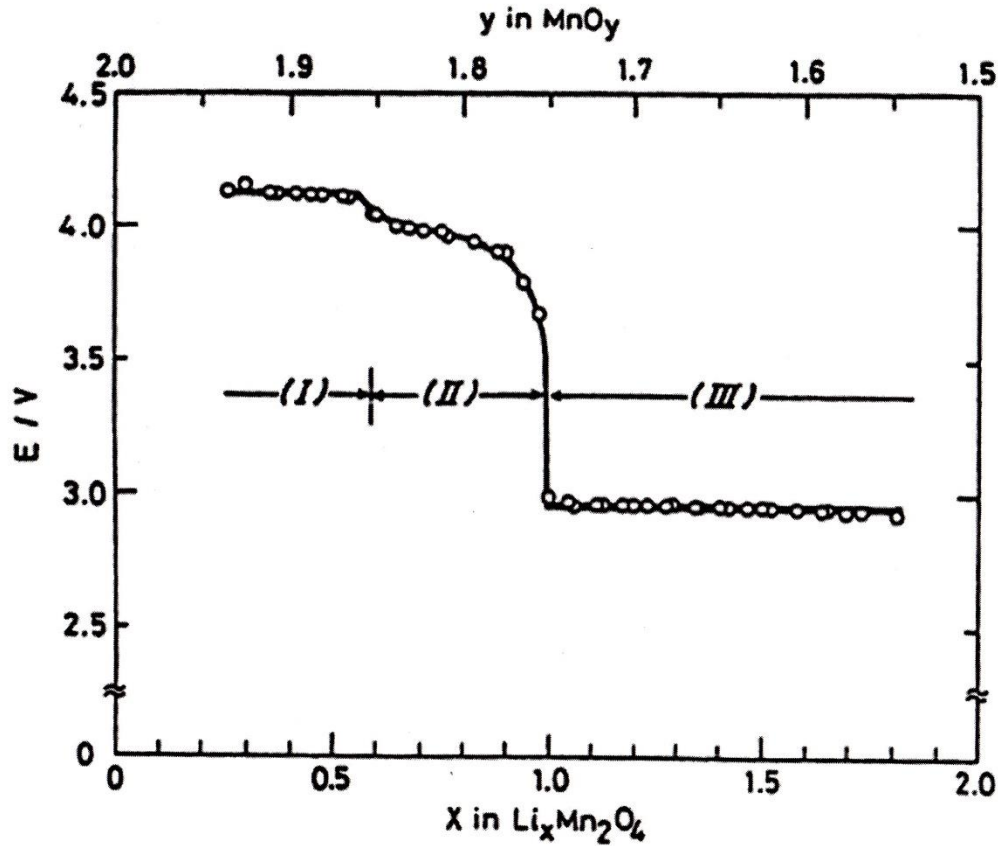
Stage 3



Stage 4



# 6 / 8 Phasenbildung



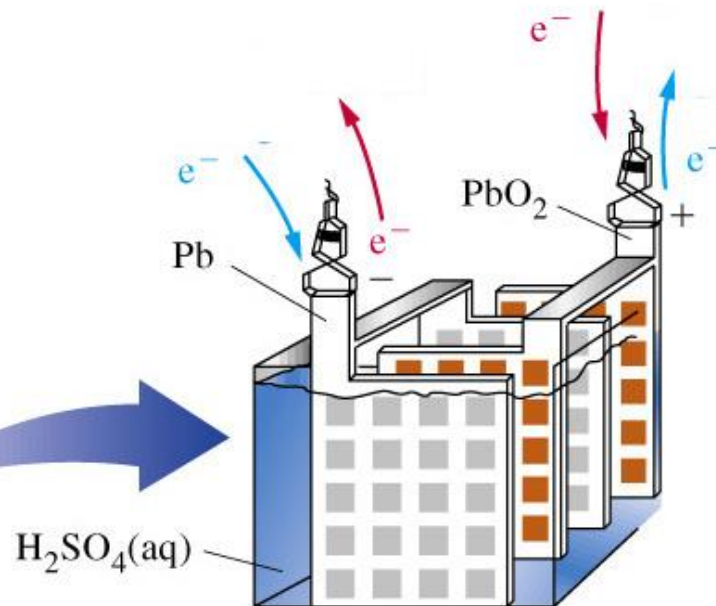
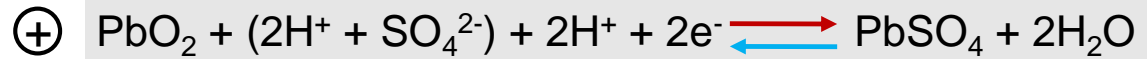
Ladepotential und Gitterparameter  
von  $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$

chemische Energie

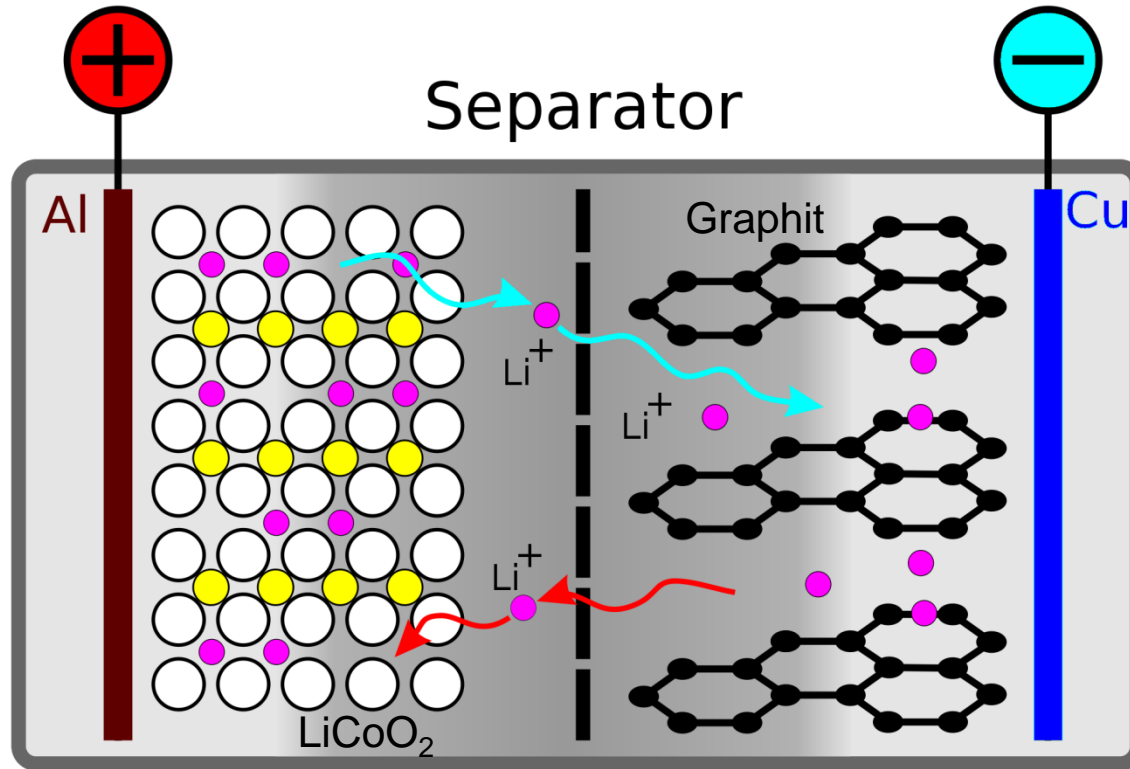
Entladung  
 $\xrightarrow{\text{red}} \xleftarrow{\text{blue}}$   
 Ladung

elektrische Energie

Elektrodenreaktionen:







## Legende

● Kohlenstoff (Graphit)

● Metall (Cobalt)

● Lithium

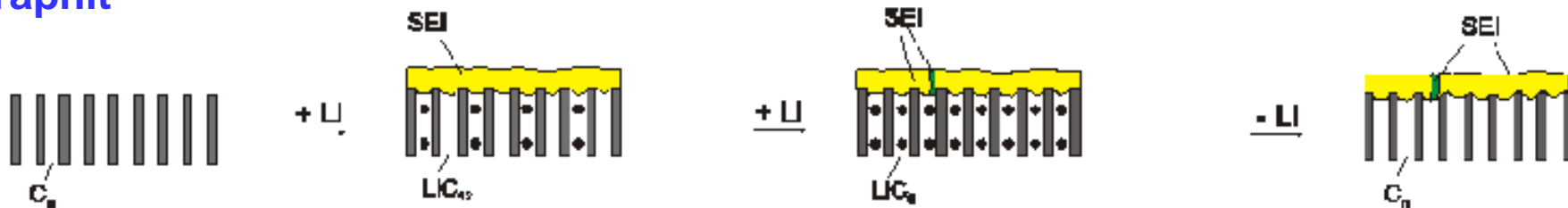
○ Sauerstoff

■ nicht-wässrige  
Elektrolytlösung

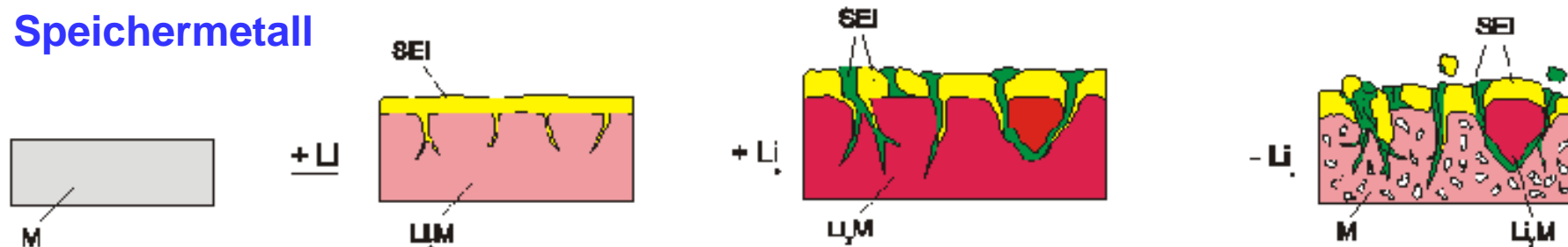
→ Ladevorgang

← Entladevorgang

## Anodenmaterialien Graphit



## Li Speichermetall

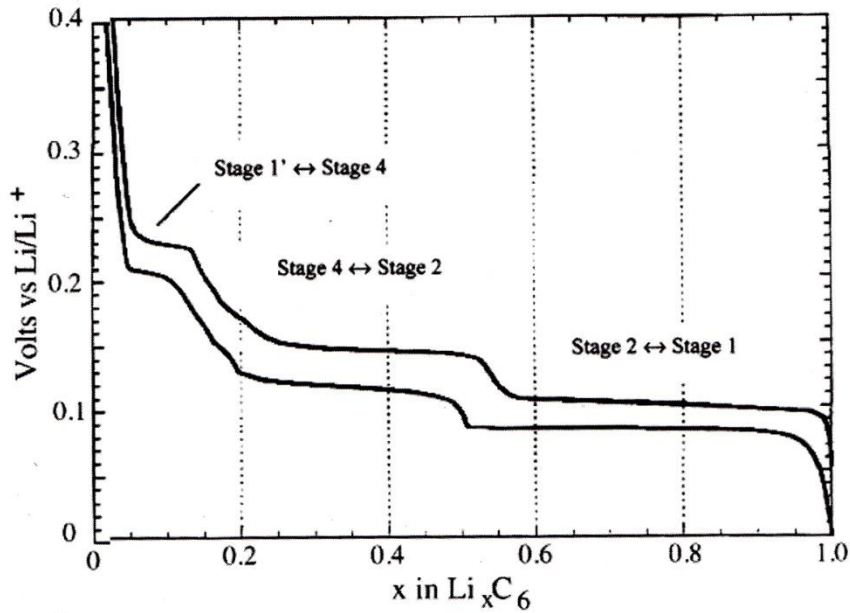


## metallisches Li



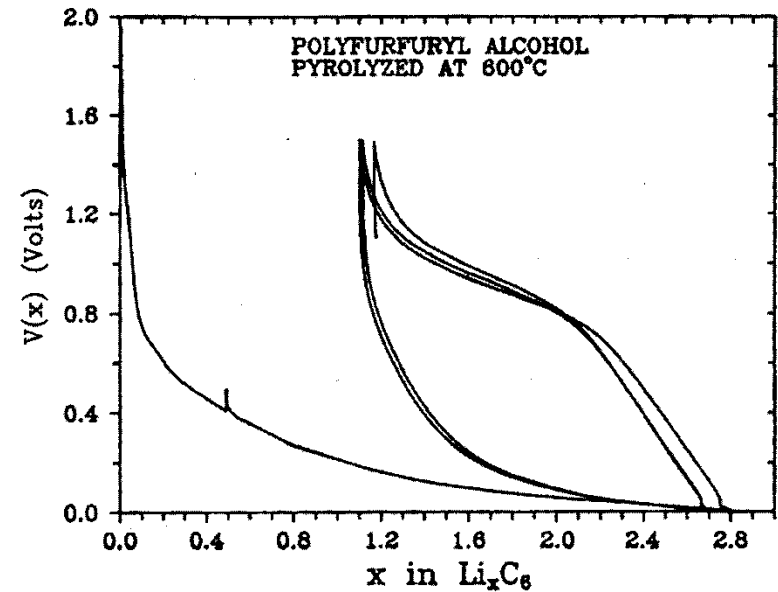
Li Aufnahme

Li Abgabe

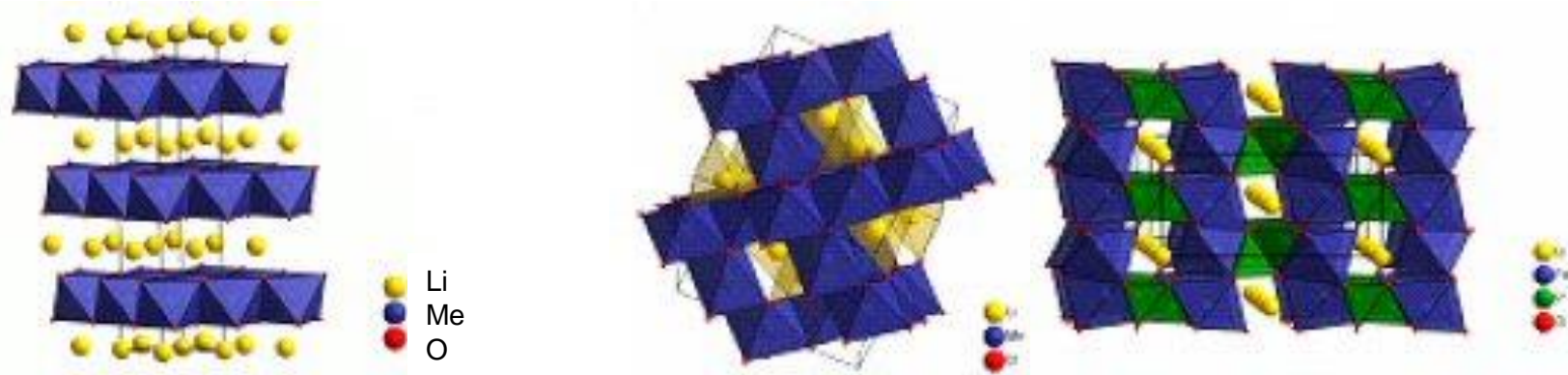


Li Interkalation/Deinterkalation  
in Graphit

H-haltiger Graphit

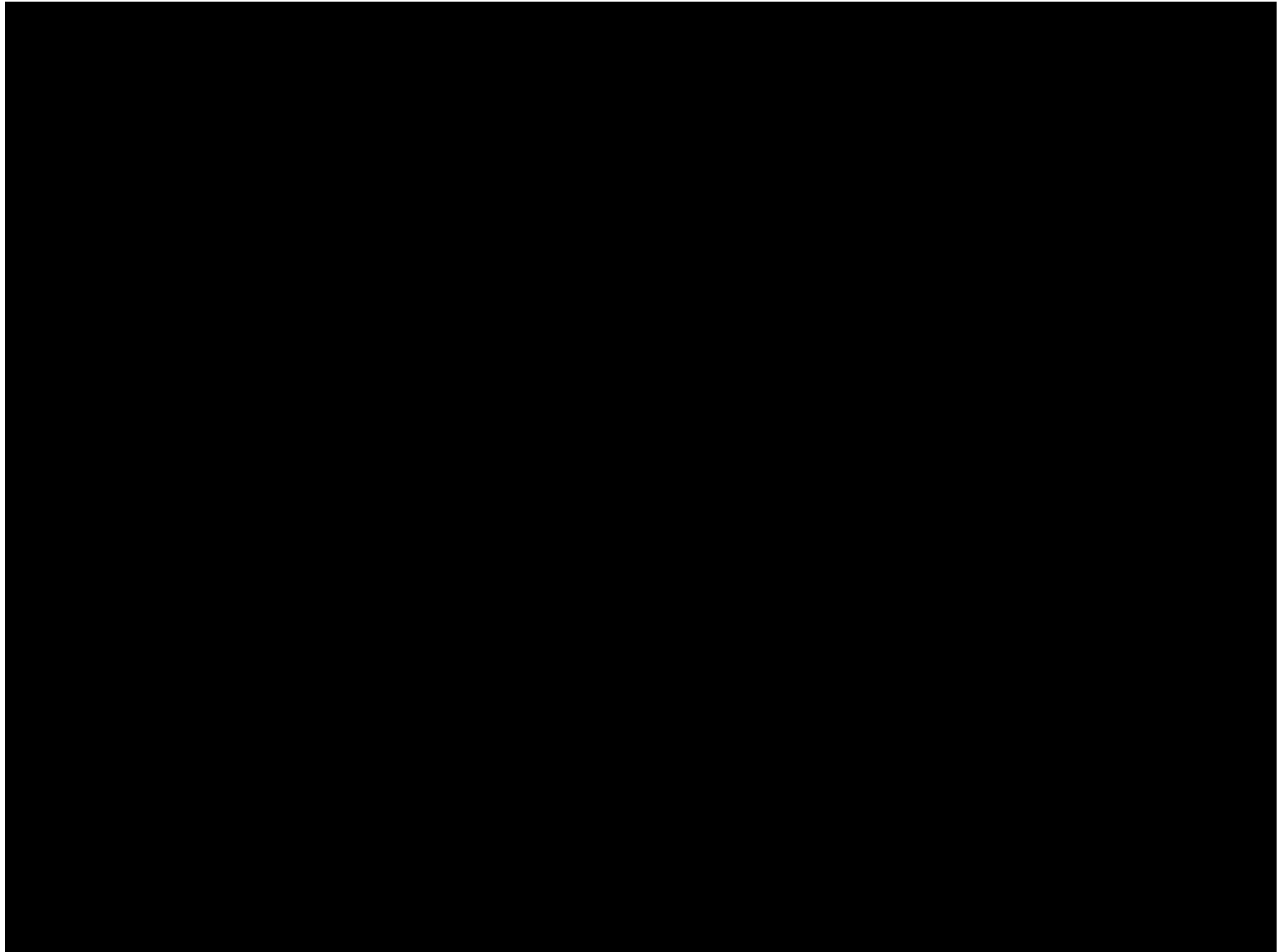


## Kathodenmaterialien



Schichtstruktur	Spinell	Olivin
Kobalt, $\text{LiCoO}_2$	Mangan $\text{LiMn}_2\text{O}_4$	Eisen $\text{LiFePO}_4$
$\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ $\text{LiNi}_{0,5-x}\text{Mn}_{0,5-x}\text{Co}_{2x}\text{O}_2$		
$U_N$ 3,6V 150-160 Ah/kg	$U_N$ 3,8V 110-120 Ah/kg	$U_N$ 3,6V 140-160 Ah/kg
Belastbar bis 1°C Überladeempfindlich Hohe Energiedichte Einsatz in portablen Geräten	Hohe Leistung und schnelle Ladung Geringere Energiedichte Höhere Stabilität Einsatz in Power Tools	Neues Material Hohe Leistung, höhere Ladeleistung Hohe Sicherheit Gute Lebensdauer Einsatz in Power Tools
	Hohe Kapazität und hohe Leistung Überladeempfindlich Geringe thermische Stabilität im geladenen Zustand Einsatz in Power Tools	

Explodierender Laptop



<http://youtu.be/pizFsY0yjss>

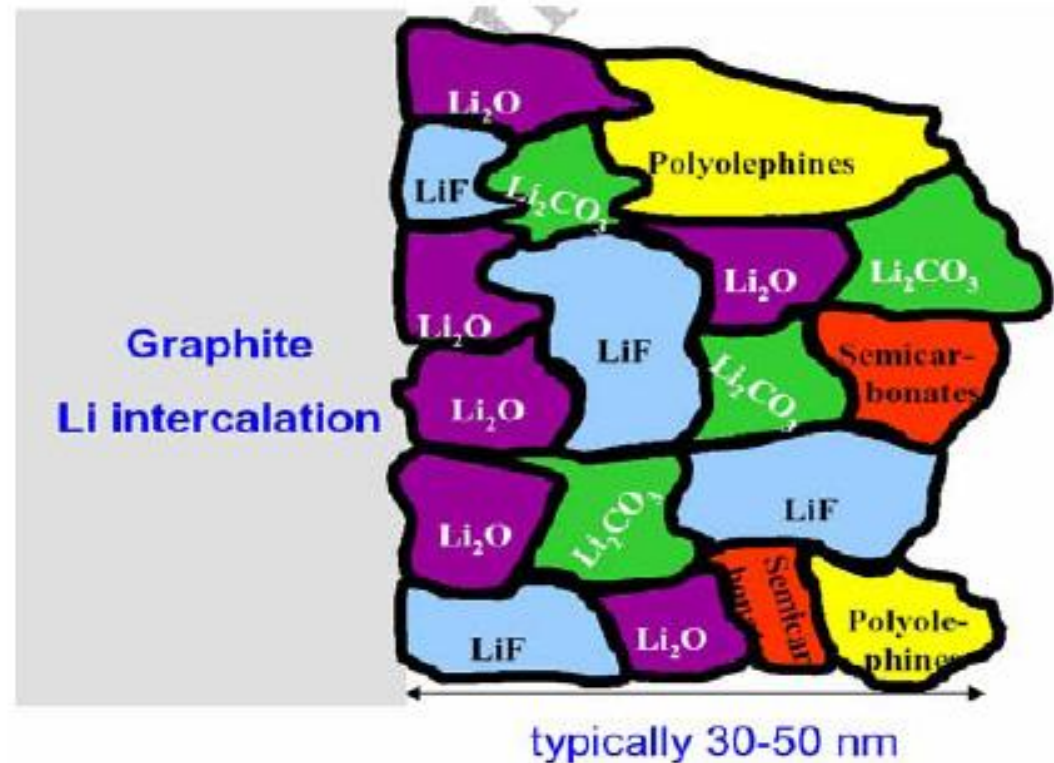
## Festkörper – Elektrolyt Grenzschicht

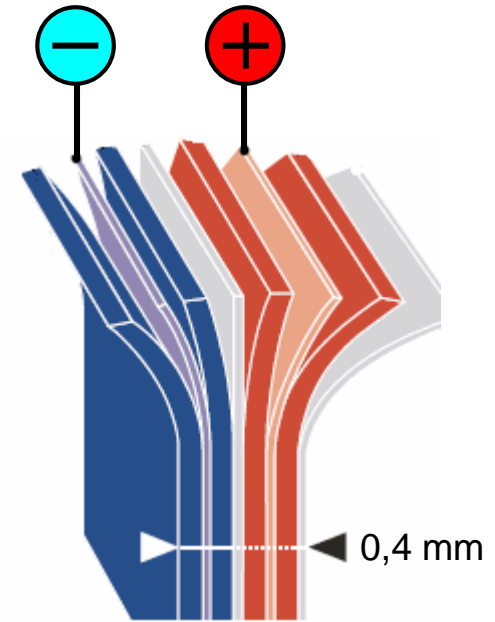
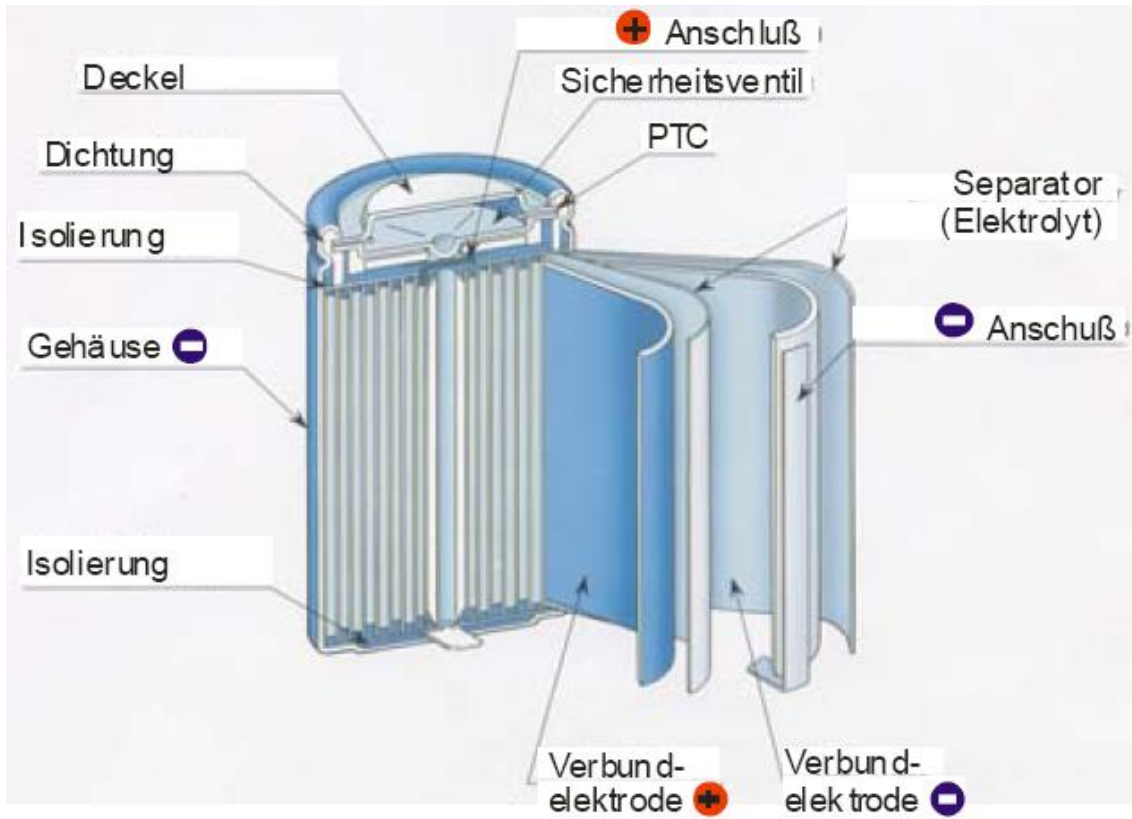
- **Schutzfunktion**

- Schutz des Elektrolyts vor Zersetzung
- Schutz der Elektrode vor Elektrolyteinlagerung

- **Bildung verursacht Verluste**

- in gespeicherter Energie
- in Elektrodenmaterial
- in Li Transport





Stromsammler

Stromsammler

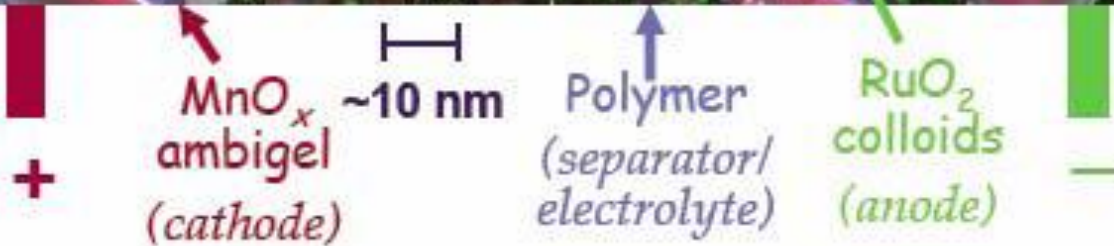
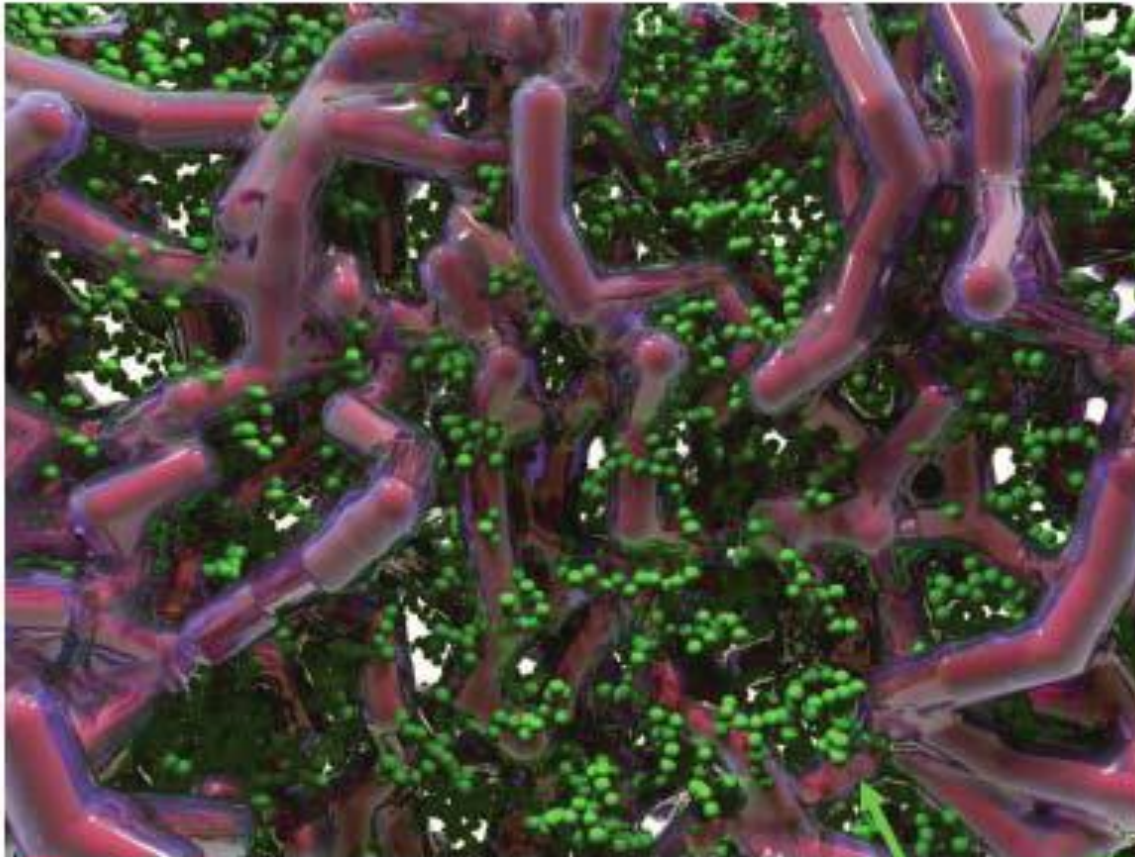
Verbundelektrode (Graphit)

Verbundelektrode (Li Metalloxyd z.B.  $\text{LiCoO}_2$ )

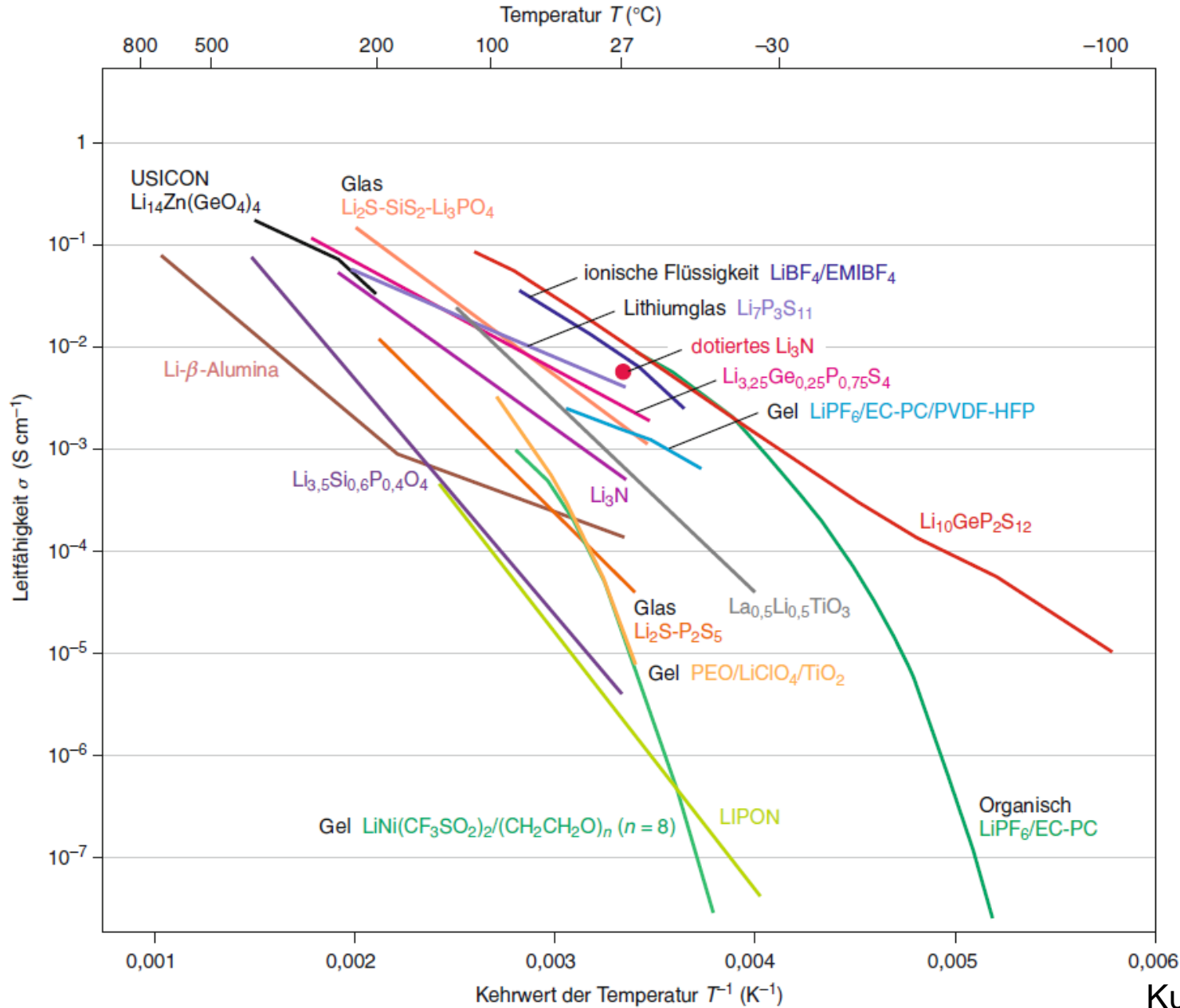
mikroporöser Separator mit Elektrolyt

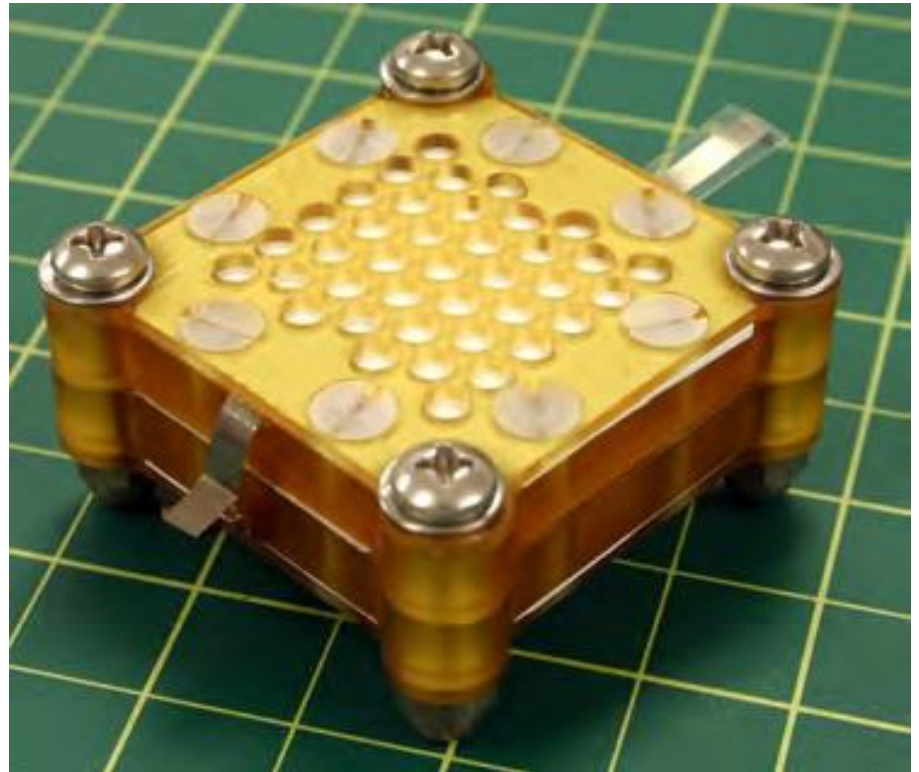
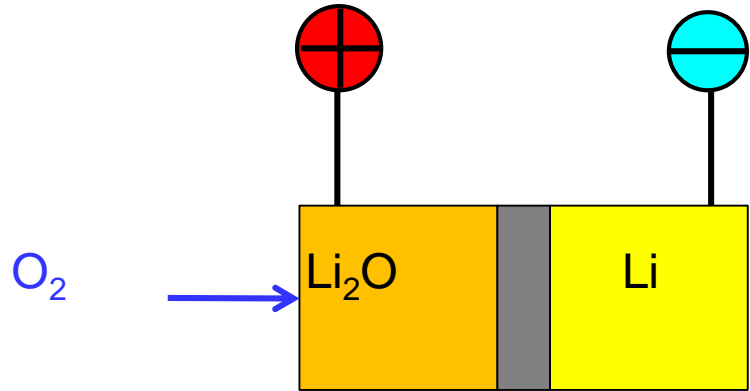


## nanostrukturierte Batterien

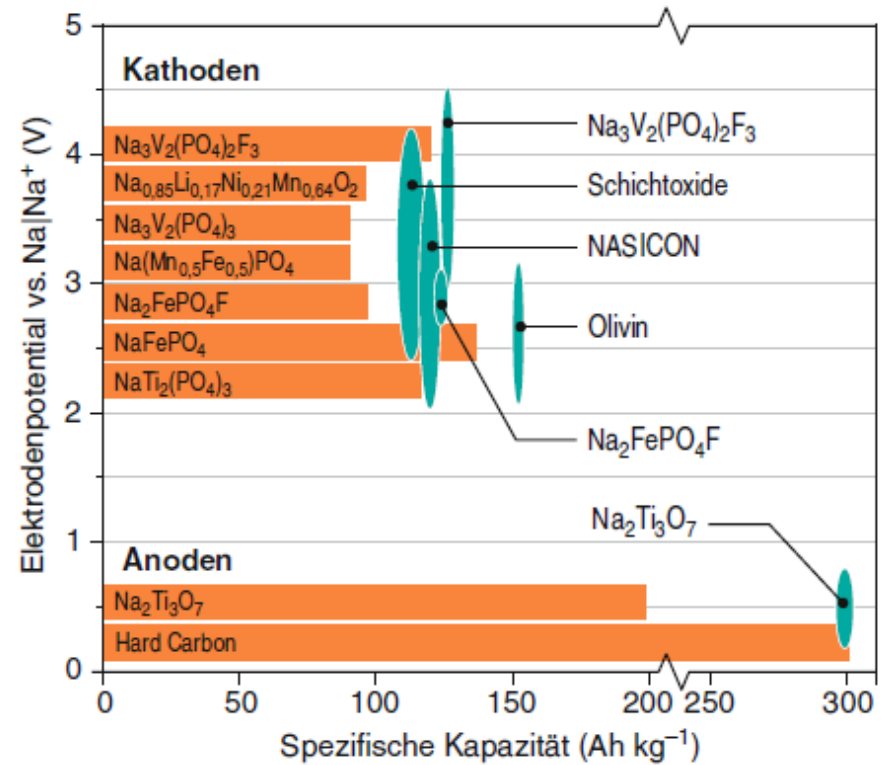
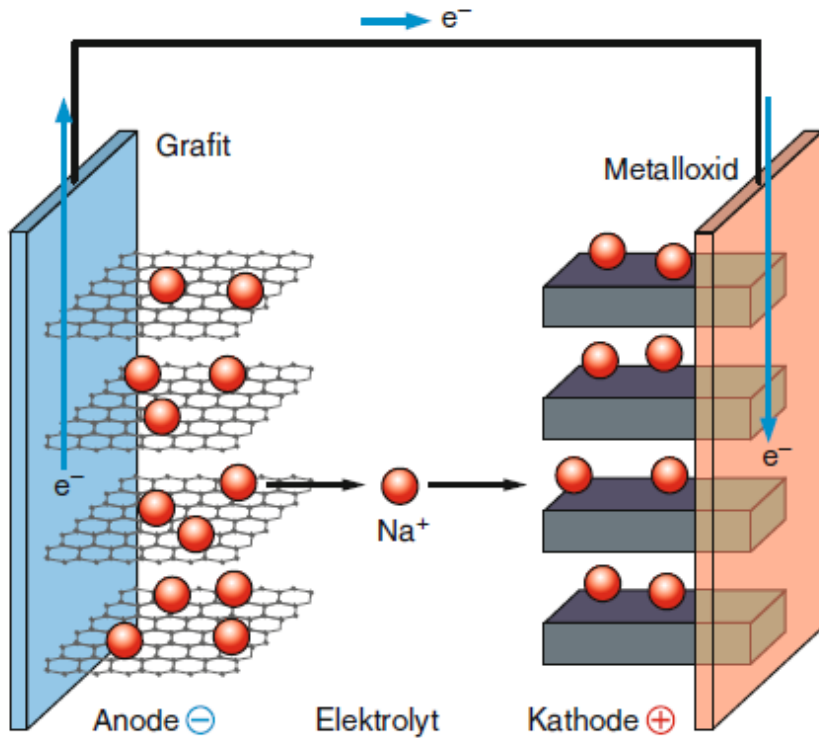








Anode (-)	Elektrolyt, Kathode und Zellreaktion	Leistungsdaten	Ref.
<i>Festkörper-Zelle:</i> Luft als Oxidationsmittel, keine Lithiumdendriten; geringe Li <sup>+</sup> -Leitfähigkeit, geringe Energiedichte			
Lithiummetall	2 Li + O <sub>2</sub> ⇌ Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , keramische Gläser (LiPON)		
<i>Nichtwässrig:</i> Hohe Energiedichte, wiederaufladbar; unlösliche Produkte, instabile Elektrolyte, ineffiziente Katalyse			
Lithiummetall	Li <sup>+</sup> -leitende Polymermembran, organischer Carbonatelektrolyt; trockener Sauerstoff, Cobaltphthalocyanin-Katalysator auf Kohlenstoff: 2 Li + O <sub>2</sub> ⇌ Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	U <sub>0</sub> ≈ 3 V	
Lithium: a) metallisch b) geschützt	2 Li + O <sub>2</sub> ⇌ Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (schwerlöslich und wenig reaktiv: Li <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + ½ O <sub>2</sub> )	Theoretisch: 2,96 V, 3 450 Wh kg <sup>-1</sup> , 8 000 Wh L <sup>-1</sup>	[24] [28]
<i>Wässrig:</i> Lösliche Produkte; minderleitende Membran und schlechtes Ladeverhalten, SEI-Bildung			
Lithium: a) metallisch b) geschützt	4 Li + O <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O ⇌ 4 LiOH	Theoretisch: 3.45 V, 3 850 Wh kg <sup>-1</sup> , 7 000 Wh L <sup>-1</sup>	[22]
Li/LATP geschützt: Li → Li <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	a) NH <sub>4</sub> Cl/LiCl und NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> /LiNO <sub>3</sub> : Nicht brauchbar für wiederaufladbare Zellen 2 Li + 2 NH <sub>4</sub> Cl + ½ O <sub>2</sub> → 2 NH <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O + 2 LiCl 2 Li + ½ O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → 2 LiOH  b) Zitronensäure/Imidazol, Malonsäure: 4 ROOH + O <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup> → 4 ROO <sup>-</sup> + 2 H <sub>2</sub> O	a) 0,1–0,5 mA cm <sup>-2</sup> , 0,2 Ah cm <sup>-2</sup> , 600–800 Wh kg <sup>-1</sup> . Instabilität von LATP in starken Säuren und Basen  b) 1 mA cm <sup>-2</sup> , 5 Ah cm <sup>-2</sup> , 2,4–4,2 V, ~75 Zyklen. Lufterlektrode: pH 1 (voll) → pH 12 (leer)	[24]



System	Normalpotential $E^0$ (V SHE)	Praktische Zellspannung im Luftbetrieb (V)	Theoretische Kapazität $q = zFM$ (Ah kg <sup>-1</sup> )	Spezifische Energie $w = q \cdot U_0$ (Wh kg <sup>-1</sup> )
Lithium-Luft	-3,04	2,4 (max. 3,0 V)	3 861	11 500
Magnesium-Luft	-2,37	1,4	2 205	5 200
Calcium-Luft	-2,87	2,0	1 337	
Aluminium-Luft	-1,66	1,6	2 980	5 000–8 000
Zink-Luft	-0,763	1,2	820	960
Eisen-Luft	-0,409	1,0 (max. 1,28)	960	764
Theoretische spezifische Energie (Wh kg <sup>-1</sup> ): Li > Al > Mg ≫ Na ≫ Zn > Fe > Cd ≫ Pb				
Theoretische Energiedichte (Wh L <sup>-1</sup> ): Al ≫ Fe > Zn > Mg, Cd > Pb > Li > Na				
Theoretische Zellspannung (V): Li ≫ Mg, Na > Al ≫ Zn > Cd, Fe > Pb				