

# Batterien – von der Zelle zum System und zur Systemintegration

## 1 Motivation und Märkte für stationäre Batterien

Die Verfügbarkeit leistungsfähiger und kostengünstiger elektrischer Energiespeicher ist eine essenzielle Voraussetzung für eine Stromversorgung mit einem hohen Anteil an regenerativen Energien. Dies gilt vor allem auch für dezentrale Stromerzeuger, wie Photovoltaiksysteme und Windkraftanlagen, die aufgrund ihrer ungleichmäßigen Stromerzeugungsraten in großem Maßstab nur mit erhöhtem Aufwand in das bisherige Stromnetz zu integrieren sind. Eine Speicherung und damit bedarfsgerechte Abgabe der erzeugten elektrischen Energie in das Stromnetz ist Grundvoraussetzung für eine effiziente Integration dieser erneuerbaren Energiequellen.

Kleine dezentrale Batteriespeicher im Bereich von 2–6 kWh, die zusammen mit PV-Anlagen in Wohngebäude integriert werden, ermöglichen eine signifikante Steigerung des Eigenverbrauchs des selbst erzeugten PV-Stroms und reduzieren den Netzbezug und damit die Stromrechnung. Mitte 2016 waren in Deutschland bereits rund 40 000 derartiger Systeme im privaten Bereich installiert.

Größere Batteriesysteme mit einigen 100 kWh Kapazität bis in die MWh-Klasse werden als so genannte Quartierspeicher sowie im gewerblichen Bereich, in Kombination mit einer PV-Anlage ebenfalls zur Steigerung der Eigenverbrauchsquote, eingesetzt und können zusätzlich mit geeigneten Betriebsführungsstrategien zur Entlastung der Stromnetze beitragen. Ferner werden derartige Batteriespeicher in Inselnetzen genutzt, um beispielsweise die solare Deckungsrate deutlich zu steigern und damit die Dieselposten deutlich zu reduzieren.

Batteriespeicher im Multi-MW-Bereich werden mittlerweile zur Bereitstellung von Primärregelleistung erfolgreich eingesetzt, integriert in PV- und Windparks machen sie die Einspeisung von volatil erzeugtem Strom plan- sowie regelbar und tragen somit auch zur Vermeidung von Netzausbaukosten bei.

Weltweit nimmt die Bedeutung stationärer Batteriespeicher erheblich zu und dies für alle der oben beschriebenen Einsatzgebiete. Als Beispiel sei hierfür Kalifornien genannt, das sich als Ziel gesetzt hat, bis 2020 1,325 GW an Speicherleistung zu installieren. Die Aufteilung erfolgt dabei in ca. 700 MW auf Übertragungsnetzebene, ca. 425 MW auf Verteilnetzebene sowie ca. 200 MW auf der Verbraucherseite.

Mittlerweile hat die Lithium-Ionen-Technologie in allen diesen Einsatzgebieten eine dominante Rolle eingenommen. In diesem Beitrag sollen daher der Stand der Technik und die Optimierungspotenziale sowohl auf Zell- wie auch auf Systemebene beschrieben werden, die durch gezielte Forschung und Entwicklung erschlossen werden können. Ferner wird ein Einblick in neue, konkurrierende Systeme gegeben, die teils kurz vor der Markteinführung stehen, teils aber noch deutlichen F&E-Aufwand erfordern.

## 2 Lithium-Ionen Batteriezellen

### 2.1 Stand der Technik

Mittlerweile werden Lithium-Ionen Batteriezellen vielfach in Elektrofahrzeugen wie auch stationären Anwendungen eingesetzt. Den Stand der Technik hinsichtlich der für die Anwendung wichtigen Charakteristiken beschreibt *Tabelle 1* exemplarisch für ein



**Fraunhofer ISE**  
Dr. Matthias Vetter  
matthias.vetter@ise.fraunhofer.de

**DLR**  
Dr. Norbert Wagner  
norbert.wagner@dlr.de

**Fraunhofer IWES**  
Matthias Puchta  
matthias.puchta@iwes.fraunhofer.de

**FZ Jülich**  
Prof. Dr. Martin Winter  
m.winter@fz-juelich.de

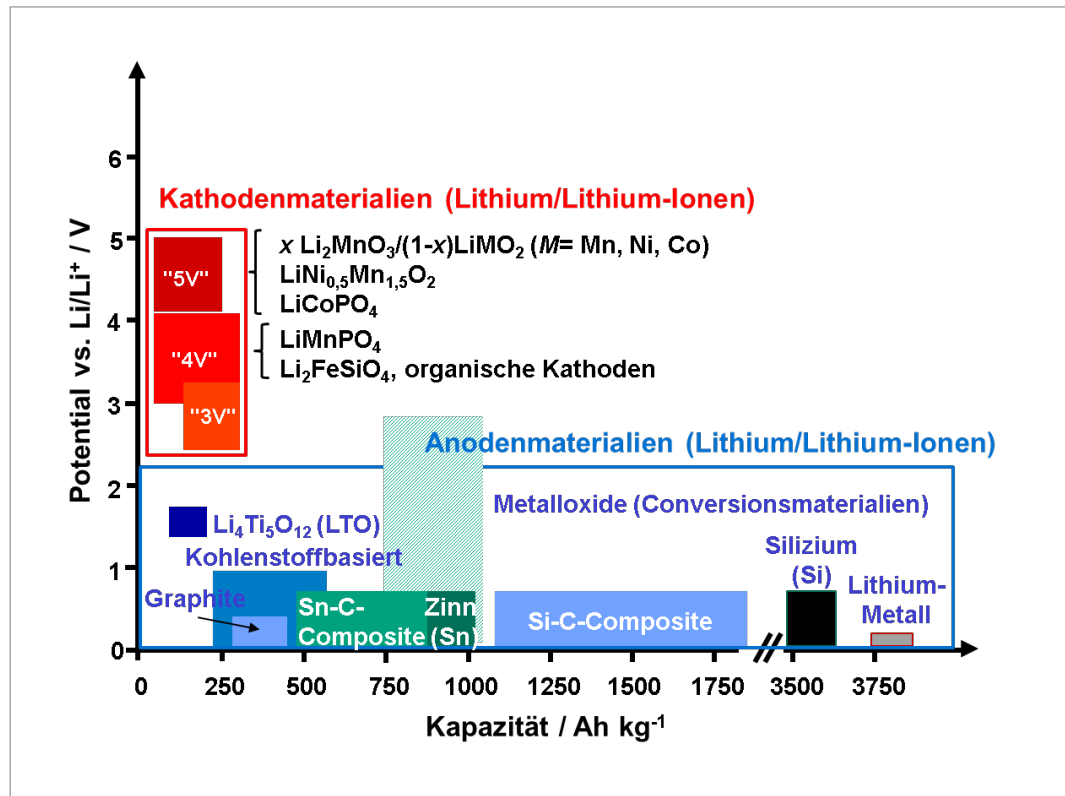
**ISFH**  
Dr. Marc Köntges  
m.koentges@isfh.de

**ZSW**  
Dr. Michael Danzer  
michael.danzer@zsw-bw.de

	LCO/Graphit	NMC/Graphit	LFP/Graphit	NCA/Graphit	Titanat/ (LCO, NMC, LMO)
Energiedichte [Wh/kg]	150-200	150-220	80-130	130-260	60-70
Leistungsdichte [W/kg]	300-4000 (je nach Aufbau und Hochstromfähigkeit der Zelle)				
Mittlere Zellspannung [V]	3,6	3,6/3,7	3,2/3,3	3,6	2/2,5
Zyklischer Lebensdauer	500-1000	500-8000	1000-6000	300-2000	3000-15000
Kalendarische Lebensdauer	8-20 Jahre				
Wirkungsgrad (Zellebene!)	90-98%				
Betriebstemperatur Laden [°C]	0 bis 45				-20 bis 55
Betriebstemperatur Entladen [°C]	-20 bis 55				
Selbstentladung	2-10%/Monat (typisch 3%)				

*Tabelle 1*  
**Vergleich verschiedener marktverfügbarer Lithium-Ionen-Zellen:**  
LCO = Lithium-Cobalt-Oxid  
NMC = Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid  
LFP = Lithium-Eisen-Phosphat  
LMO = Lithium-Mangan-Oxid

Abbildung 1  
**Lithium-Ionen-Batterien:**  
 etablierte und neue  
 Anoden- sowie  
 Kathodenmaterialien  
 (Quelle FZ Jülich)



paar gängige Anoden- und Kathodenkombinationen aus der Familie der Lithium-Ionen-Batterien. Hierbei ist zu erwähnen, dass im Bereich der gravimetrischen Energiedichte für gängige Lithium-Ionen-Batterien in den letzten Jahren eine Steigerung von ca. 4% pro Jahr erreicht werden konnte.

### 2.2 Entwicklungspotenziale

Obwohl Lithium-Ionen-Batterien nun schon seit einigen Jahren am Markt sind und nicht nur in Consumer-Anwendungen ihren Einsatz finden, bietet diese Familie von Batterien noch sehr großes Optimierungspotenzial. Getrieben durch die Reichweitenproblematik in der mobilen Anwendung, verbunden mit der Anforderung die Energiedichte signifikant zu steigern, werden aktuell Anodenmaterialien mit deutlich höheren spezifischen Kapazitäten als das gängige Graphit sowie Kathodenmaterialien, die als so genannte Hochvoltmaterialien/5 V-Materialien ein höheres Potenzial gegenüber der Referenzelektrode aus metallischem Lithium aufweisen, erforscht.

Abbildung 1 stellt die gängigen sowie die neuen Materialien hinsichtlich ihrer spezifischen Kapazität sowie ihrem Potenzial gegenüber metallischem Lithium dar.

Seitens der in der Erforschung befindlichen Hochvolt-Kathodenmaterialien stellen sich u.a. große Herausforderungen an die Oxidationsstabilität des Elektrolyten. Auf der Anodenseite wird u.a. Silizium

als eine interessante Alternative zur Steigerung der Energiedichte betrachtet, jedoch müssen für dieses Material Lösungen für die Problematik der Volumenausdehnung während des Ladevorganges gefunden werden.

### 2.3 Aktuelle Forschungsschwerpunkte und Ergebnisse

Im Folgenden sollen exemplarisch aktuelle Forschungen und Ergebnisse der FVEE-Institute vorgestellt werden. Umfangreichere Informationen hierzu sind entweder im zugehörigen Foliensatz des Konferenzvortrages beziehungsweise direkt bei den Ansprechpartnern der Institute erhältlich.

#### Formierung von Lithium-Ionen-Zellen

Die Formierung ist neben dem so genannten Aging ein wesentlicher Bestandteil des Finishing, dem letzten Produktionsschritt in der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien. Vereinfacht gesprochen, handelt es sich um die erste gezielte elektrische Inbetriebnahme der Zellen. Die Formierung beeinflusst maßgeblich die Performance und die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen. Gleichzeitig stellt die Formierung einen sehr kostenintensiven Teil in der Herstellung dar, da für die Massenproduktion enorm viele Zyklisierereinrichtungen vorgehalten werden müssen, die folglich entsprechend viel Investitionskapital binden. Eines der Ziele ist es folglich, die Formierzeiten zu verkürzen ohne dass die Qualität darunter leidet.

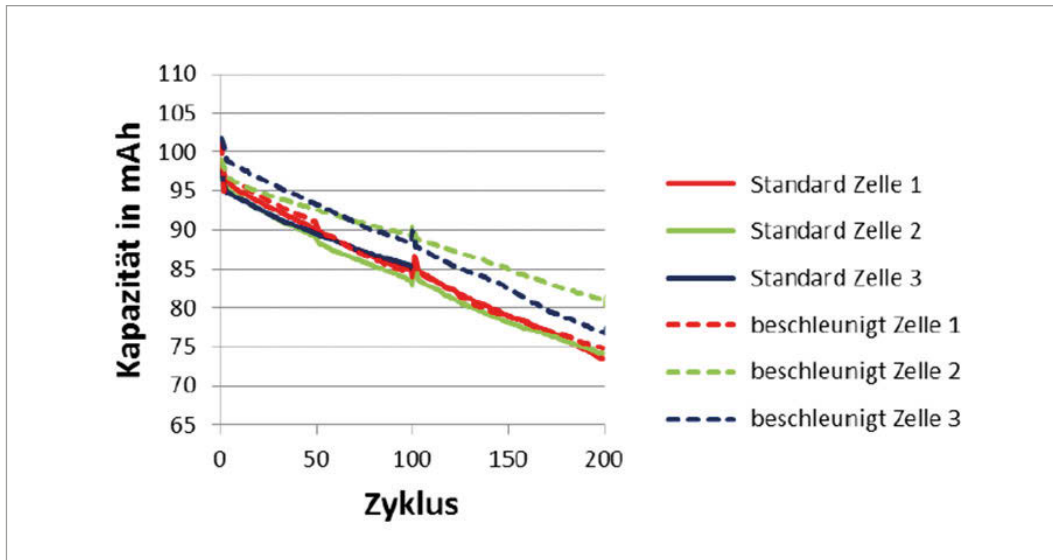


Abbildung 2  
**Vergleich eines Standardformierverfahrens mit beschleunigter Formierung, ohne negative Beeinflussung der Alterung**  
 (Quelle Fraunhofer ISE)

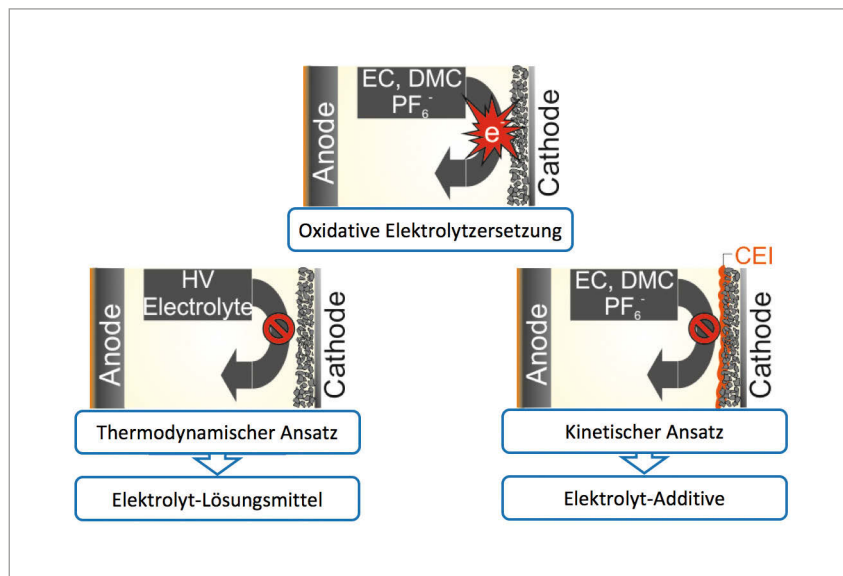


Abbildung 3  
**Zwei Ansätze zur Stabilisierung des Elektrolyten für den Einsatz in Lithium-Ionen Batterien mit Hochvolt-Kathoden**  
 (Quelle: FZ Jülich)

In *Abbildung 2* sind beispielhaft die Ergebnisse eines solchen Verfahrens dargestellt, das eine Beschleunigung von 81 Stunden auf rund 10 Stunden ermöglicht.

### Hochvolt-Kathoden

Die Stabilität des Elektrolyten in Lithium-Ionen-Zellen mit Hochvolt-Kathoden ist eine der zentralen Fragestellungen. Hierzu werden zwei Ansätze verfolgt, die in *Abbildung 3* dargestellt sind.

### Silizium als Anodenmaterial

Aufgrund hoher spezifischer Kapazitäten (realisierbar sind Werte über 1000 mAh/g) stellen siliziumbasierte Anoden eine sehr interessante Alternative dar. Zentrale Herausforderungen sind dabei die Erreichung von hohen Zyklenzahlen, die Volumenausdehnung sowie die Steigerung der flächenbezogenen Kapazität, ohne die Stabilität negativ zu beeinflussen.

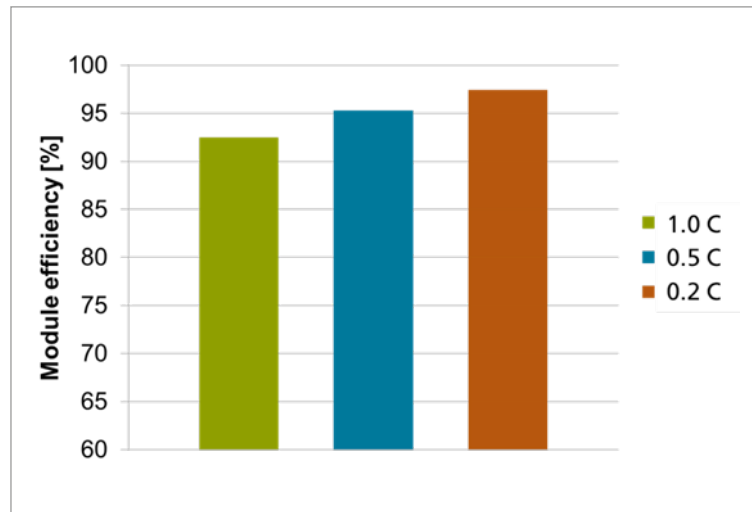
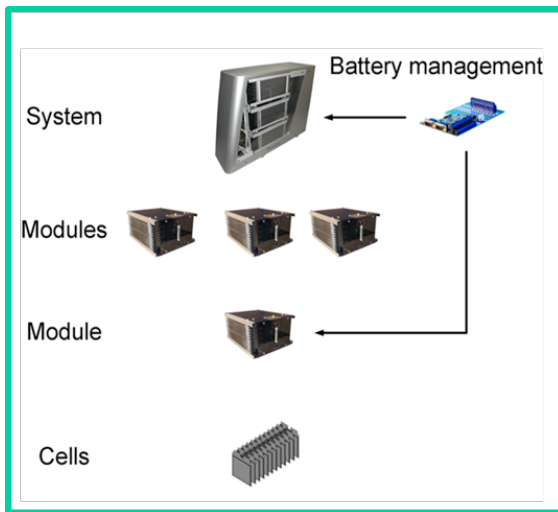


Abbildung 4a

**Aufbau eines Lithium-Ionen-Batteriesystems zum Einsatz als PV-Heimspeicher**  
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Abbildung 4b

**Modulwirkungsgrade in Abhängigkeit der C-Rate**  
(Lade- oder Entladestrom eines Akkus, bezogen auf seine Kapazität =C)  
(Quelle: Fraunhofer ISE)

### 3 Lithium-Ionen-Batteriesysteme

#### 3.1 Stand der Technik

Lithium-Ionen-Batteriesysteme werden mittlerweile vielfach als PV-Heimspeicher aber auch als Multi-MW-Speicher beispielsweise zur Erbringung von Netzdienstleistungen eingesetzt. In [Abbildung 4](#) ist exemplarisch der Aufbau eines solchen Lithium-Ionen-Batteriesystems dargestellt.

#### 3.2 Entwicklungspotenziale

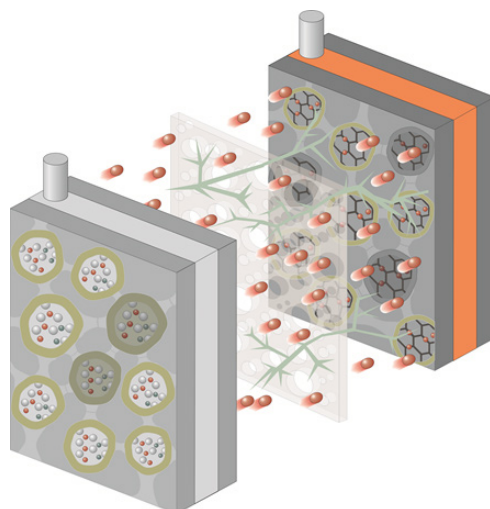
Insbesondere im Bereich der mittleren und großen Batteriespeicher besteht noch erhebliches Optimierungspotenzial hinsichtlich Kostensenkung, Lebensdauer und Effizienzsteigerung. Wichtig sind hierbei die Effektivität des Kühlsystems, eine weitestgehend homogene Temperaturverteilung in den Batteriemodulen und ein intelligentes Batteriemangement mit präzisen Algorithmen für die Zustandsbestimmung sowie optimierte Lade- und Betriebsführungsstrategien.

#### 3.3 Aktuelle Forschungsschwerpunkte und Ergebnisse

Wichtig ist ein genaues Verständnis der Zusammenhänge zwischen Alterung, Temperatur und Temperaturverteilung sowie der Betriebsführung für die verschiedenen Lithium-Ionen Zellchemien. Auf Basis dieses Wissens können sowohl der Aufbau wie auch der Einsatz von Batteriespeichern optimiert, die Lebensdauer verlängert und somit die Gesamtkosten reduziert werden. Hierbei sind der Einsatz von Modellen und die Simulation auf verschiedenen Skalen von der orts aufgelösten Betrachtung bis hin zur Systemsimulation eine zentrale F&E-Aufgabe. In [Abbildung 5](#) ist exemplarisch ein solches Modell dargestellt. Modelle werden auch genutzt, um den aktuellen Zustand einer Batterie zu ermitteln und Lebensdauerprognosen in Abhängigkeit der Betriebsweise zu erstellen. Diese Modelle müssen derart entwickelt werden, dass sie auf Hardware-Plattformen von Batteriemagementsystemen implementierbar sind. In [Abbildung 6](#) ist ein solcher Ansatz dargestellt.

Abbildung 5

**Alterungsprozesse in Lithium-Ionen-Batterien**  
(Fraunhofer IWES)



### 4 Systemintegration

Für die Qualität, die Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie die Effizienz eines Batteriespeichers sind neben dem eigentlichen Batteriesystem auch die peripheren Komponenten wie Batteriewechselrichter und Energiemanagementsystem von großer Bedeutung. Wichtige Aspekte sind hierbei ein Energiemanagement mit optimierten Betriebsführungsstrategien im Zusammenspiel mit einem intelligenten Batteriemangement, die Standardisierung auf Feldebene für die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten des Batteriespeichers sowie möglichst hohe Wirkungsgrade des Batteriewechselrichters über einen weiten Last- beziehungsweise Teillastbereich.

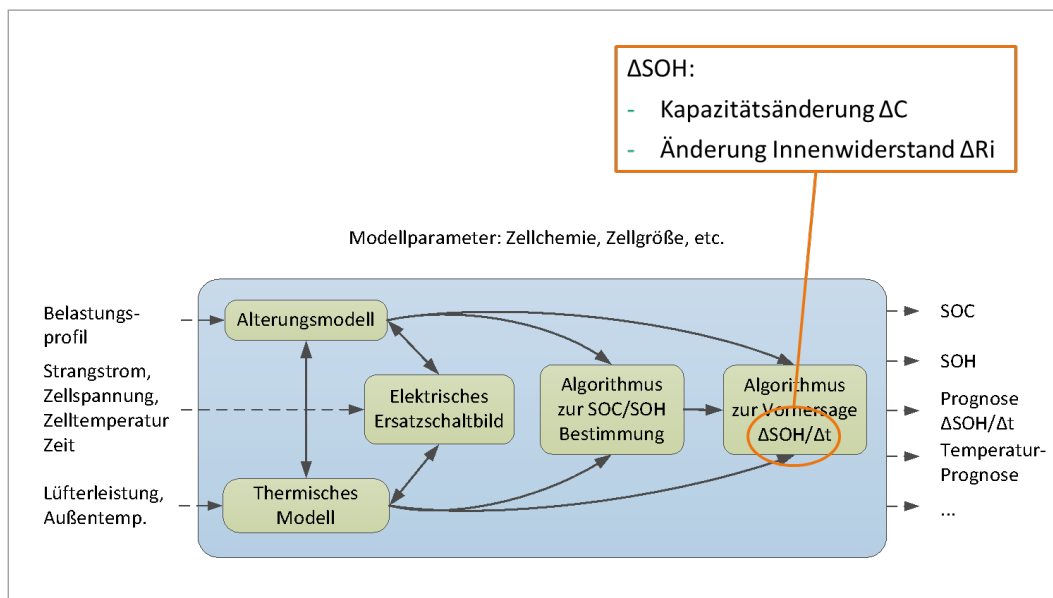


Abbildung 6  
**Intelligentes Batterie-management**  
für Lithium-Ionen-Batteriespeicher zur Optimierung des Speicherbetriebs mit Hilfe von Modellen und optimierten Verfahren zur Ladezustands- und Alterungsbestimmung sowie eines Algorithmus zur Prognose der Alterungsgeschwindigkeit (Quelle Fraunhofer ISE)

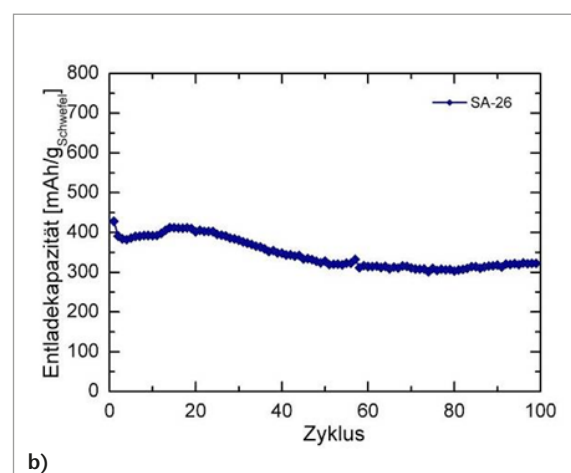
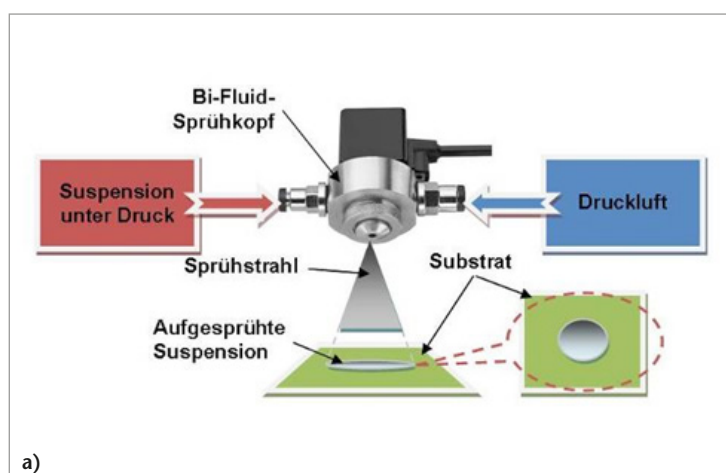


Abbildung 7  
**Lithium-Schwefel-Batterien:**

- Herstelltechnik von Schwefelkathoden durch Suspensions-sprühen
- Änderung der Entladekapazität einer Lithium-Schwefelbatterie mit der Zyklenzahl

(Quelle DLR)

## 5 Neue Batterietechnologien

Neben der Familie der Lithium-Ionen-Batterien werden aktuell eine ganze Reihe von neuen Technologien erforscht und entwickelt. Exemplarisch genannt seien hierzu:

- Lithium-Schwefel-Batterie
- Lithium-Luft-Batterie
- Natrium-Ionen-Batterie

In **Abbildung 7** werden aktuelle Arbeiten zu Lithium-Schwefel-Batterien gezeigt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Rolle von Batteriespeichern wird mit der Einführung der Elektromobilität und dem Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien für die Stromversorgung immer zentraler. Die Lithium-Ionen-Technologie gewinnt hierbei zunehmend Marktanteile und ist dabei, sich jenseits der Consumer-Produkte zu etablieren. Dennoch stecken in ihr noch enorme Optimierungspotenziale sowohl auf Zell- wie auch Systemebene, die durch enge Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft erschlossen werden können. Neue Technologien, auch als „beyond lithium-ion“ bezeichnet gilt es intensiv zu erforschen, neben grundsätzlichen Materialfragen sind hier ebenfalls Aspekte auf der Systemebene frühzeitig zu berücksichtigen.