



# LOEWE

ABSCHLUSSBERICHT



**LOEWE-Schwerpunkt  
STORE-E – Stoffspeicherung in Grenz-  
schichten**

# Inhalt

- 2 Statement des Koordinators
- 3 Projektinhalte
- 3 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
- 4 Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen
- 5 Erreichte Strukturentwicklung
- 6 Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld
- 7 Wichtigste Meilensteine des Projekts
- 9 Weitere Informationsmöglichkeiten
- 9 Zahlen und Fakten
- 10 Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute
- 11 Impressum

Der Bedarf an effizienten Technologien der Energiewandlung, -speicherung und -einsparung nimmt angesichts der weltweit kontinuierlich wachsenden Energienutzung rasant zu. Vor diesem Hintergrund wurden im LOEWE-Schwerpunkt STORE-E physikalisch-chemische Grenzflächenphänomene elektrochemischer und verwandter Systeme untersucht, die eine entscheidende Rolle für neue Energietechnologien in diesen Bereichen spielen.

Als aktuell und fruchtbar haben sich die Arbeiten an Feststoffbatterien erwiesen, die als stabile und sichere Energiespeicher möglicherweise die derzeit führenden Lithiumionenbatterien ergänzen können. Die in STORE-E durchgeführten Arbeiten haben das schnell wachsende Forschungsgebiet der Feststoffbatterien maßgeblich mitgestaltet und sind die Basis für umfangreiche Folgeprojekte. Als ebenso spannend und weiterführend haben sich auch die Arbeiten an Sauerstoffspeicherkatalysatoren erwiesen. Diese spezielle Form von heterogenen Katalysatoren spielt in der Abgaskatalyse eine zentrale Rolle, und die in STORE-E durchgeführten Forschungsprojekte haben ebenfalls eine Reihe von Folgeprojekten ausgelöst. Auch der Projektbereich der Superkondensatoren hat eine Reihe von hochwertigen und anregenden Ergebnissen erzielt, die für die praktische Umsetzung große Bedeutung besitzen.

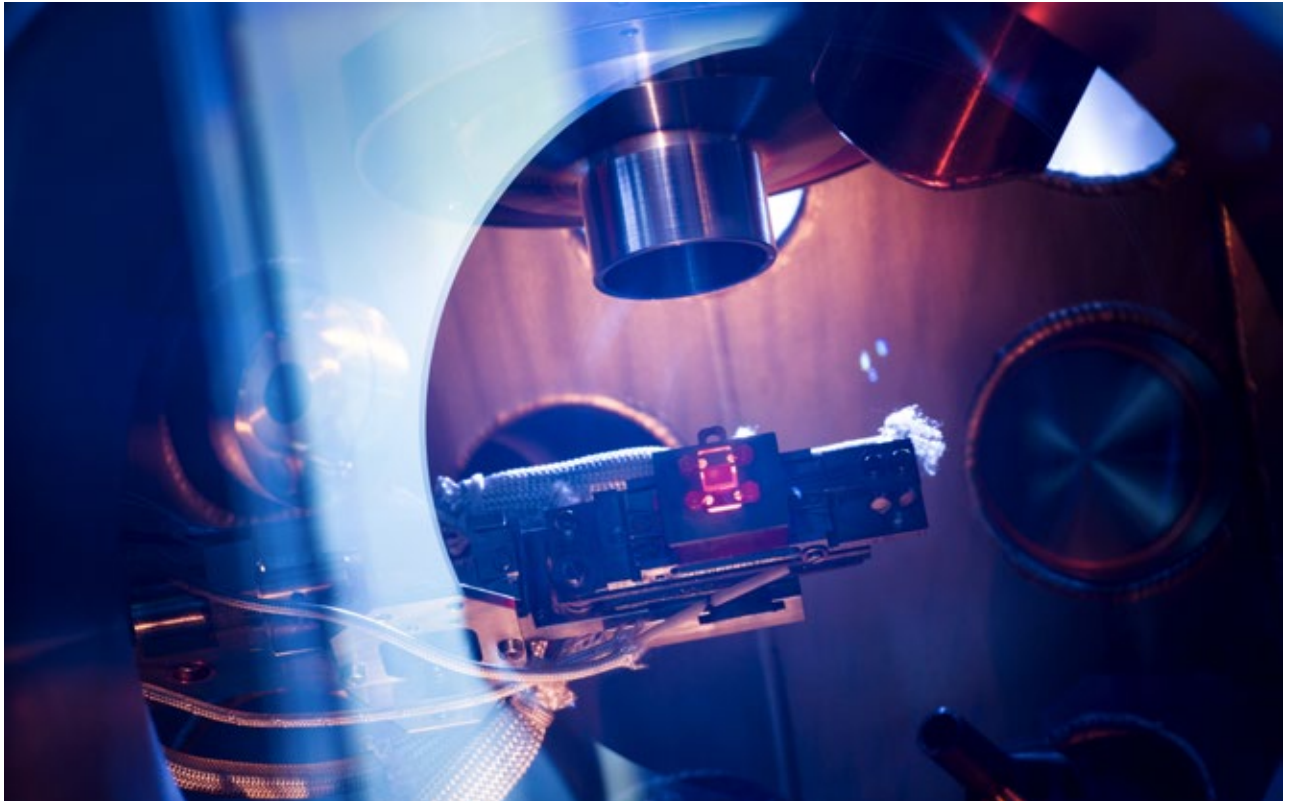
Eine besondere Wirkung hat STORE-E für den strukturellen Ausbau der Materialforschung an der JLU. Gefördert durch STORE-E konnte eine Professur für Theoretische Chemie eingerichtet werden, und gleichzeitig wurde das interdisziplinäre Zentrum für Materialforschung gegründet, das die in STORE-E begonnene Vernetzung intensiviert und in Richtung weiterer kooperativer Forschungsprojekte weiterführen wird.

Für die elektrochemische Materialforschung in Gießen und Marburg ist STORE-E ein entscheidender Erfolgsfaktor gewesen, der eine Vielzahl von Folgeprojekten und wertvolle strukturelle Impulse geliefert hat. Die in STORE-E sehr erfolgreich aufgegriffenen Forschungsthemen haben sich nicht nur als aktuell, sondern vielmehr als höchst zukunftssträftig für die nächsten Jahre herausgestellt.



Prof. Dr. Jürgen Janek  
Koordinator des LOEWE-Schwerpunkts STORE-E  
Justus-Liebig-Universität Gießen



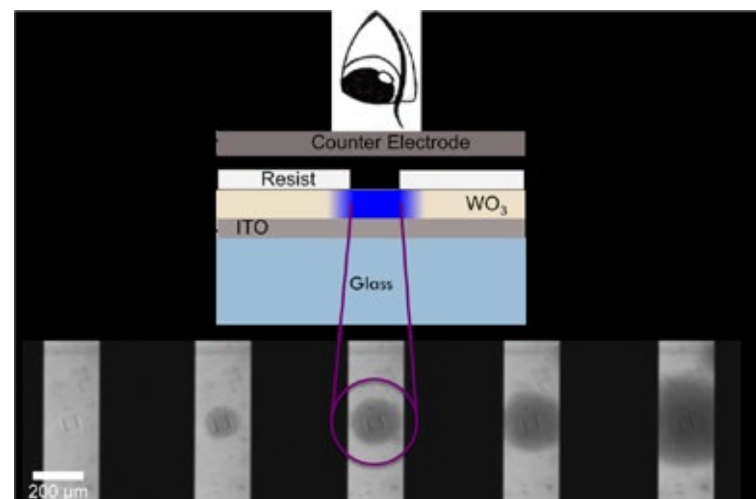


## Projekthinhalte

### Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

Speichereffekte stellen allgemein eines der vielfältigsten Forschungsgebiete im Bereich von Physik, Chemie und Materialwissenschaft dar, dessen Themen von der Informationsspeicherung, der Energie- und Wärmespeicherung bis zur Stoffspeicherung reichen und heute die Basis für unverzichtbare Technologien bilden. Die **wissenschaftliche Leitidee** des LOEWE-Schwerpunktes war es, die physikalisch-chemischen Aspekte der Rolle von Grenzflächen für die (elektrochemische) Stoffspeicherung im Detail zu untersuchen, um auf diese Weise die Grundlagen für neue und verbesserte elektrochemische Speichersysteme und -katalysatoren zu vertiefen.

**Drei verschiedene Typen von Grenzflächen** standen im Zentrum der Untersuchungen: In den **inneren Grenzflächen von Anoden und Kathoden für Lithiumionenbatterien** spielen der Einbau und der Transport von Lithium mittels Ionen und Elektronen die zentrale Rolle, in den Elektroden von **elektrochemischen Kondensatoren** wird die Speicherung von Ionen und Elektronen in zweidimensionalen Doppelschichten genutzt und in **Speicherkatalysatoren** wird eine Stoffkomponente reversibel in den Katalysator ein- bzw. ausgebaut (z. B. Sauerstoff oder Wasserstoff).



Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur ortsaufgelösten Untersuchung lateraler Transportprozesse. Unten: Optische Mikroskopbilder der Probenoberfläche, eine rechteckige Aussparung ist erkennbar, durch die Ionen lokal in die Schicht eingebracht werden. Von links nach rechts zeigt sich die sukzessive Einfärbung der Schicht aufgrund seitlicher Ionenwanderung.

Das Ziel des Schwerpunktes war es, das Verständnis dieser verschiedenen Grenzflächen zu vertiefen und somit die Grundlagen für zukünftige bessere Speichersysteme zu schaffen.

## Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen

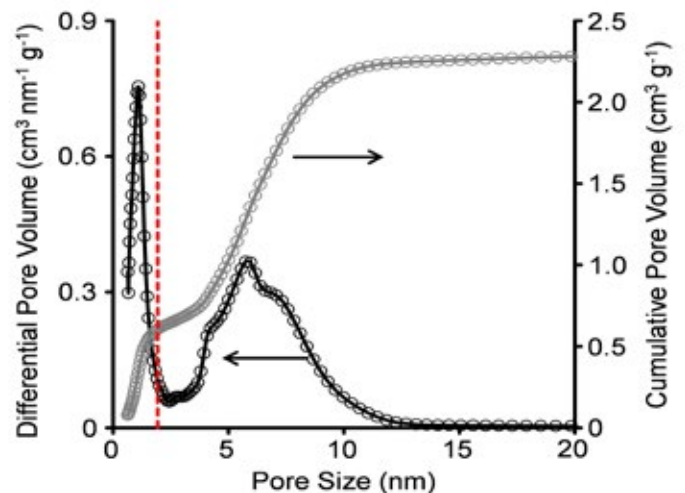
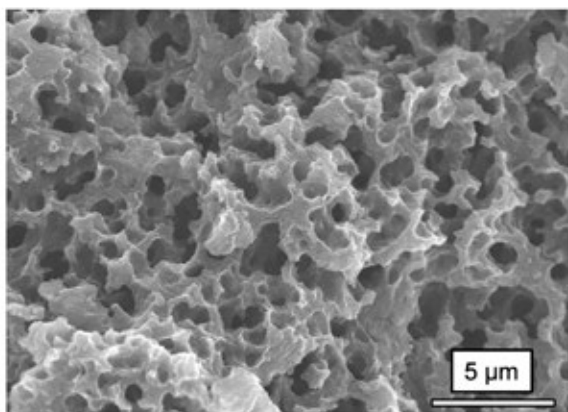
Der LOEWE-Schwerpunkt STORE-E hat insbesondere an der Justus-Liebig-Universität Gießen zu einer starken Quervernetzung der beteiligten Arbeitsgruppen im Themenfeld der Stoffspeicherung in Grenzflächen geführt, die in diesem Maße zu Beginn des Schwerpunkts nicht vorhanden war. Dazu kommen neu geschaffene starke Verbindungen zu Arbeitsgruppen an der Philipps-Universität Marburg sowie der Technischen Hochschule Mittelhessen. Da nahezu alle untersuchten Grenzflächenphänomene an sogenannten „Energiermaterialien“ bearbeitet wurden, ist aus dem Schwerpunkt eine hervorragende Basis für die elektrochemisch orientierte Materialforschung an den Standorten Gießen und Marburg entstanden.

Im Einzelnen hat sich insbesondere der **Projektbereich Batterieelektroden/elektrochrome Zellen** sehr erfolgreich entwickelt; hier konnten wichtige Fortschritte für ein besseres Verständnis von inneren Grenzflächen erzielt werden. Besonders hervorzuheben sind die Untersuchungen zur Stabilität von festen Batterieelektrolyten gegenüber den Elektrodenmaterialien. Die Stabilität der Grenzflächen ist eine entscheidende Hürde auf dem Weg zu kommerziellen Feststoffsystemen, welche bei Sicherheit, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit neue Maßstäbe setzen können. STORE-E hat hierzu ein komplexes analyti-

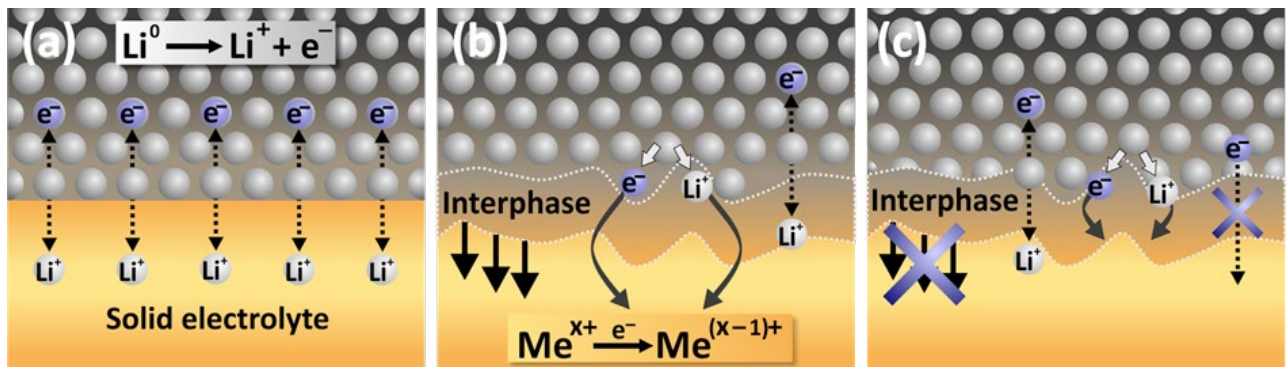
sches Testverfahren entwickelt, mit dem die Stabilität neuartiger Materialien erforscht sowie die unverstandenen Eigenschaften bekannter Systeme aufgeklärt werden können. Es wurden große Fortschritte bei der Entwicklung verschiedenster Modellsysteme erzielt, die es ermöglichen, die Verzahnung von Experiment und Theorie zu intensivieren.

Der **Projektbereich Speicherkatalysatoren** fällt durch eine besonders enge Verzahnung von Präparation, physikalisch-chemischem Experiment und Theorie auf. Besonders hervorzuheben sind hier sicherlich die Untersuchungen zur  $\kappa$ -Phase des  $\text{Ce}_2\text{Zr}_2\text{O}_8$ , die neue Potenziale des bereits in großen Mengen in der Abgasreinigung eingesetzten Sauerstoffspeichermaterials Cer-Zirkoniumdioxid aufzeigen, da die hohen katalytischen Aktivitäten es ermöglichen können, teure und seltene Katalysatormaterialien zu substituieren. Weitere nachhaltige Effekte sind durch die Etablierung von  $\text{RuO}_2$ -Hydraten als kommerzielle Katalysatoren für die oxidative Dehydrierung von Alkoholen zu erwarten.

Der **Projektbereich Superkondensatoren** zeichnet sich durch hochwertige Ergebnisse zur Mikro- und Nanostruktur von Elektroden und deren Grenzflächen aus, die das Verständnis der Stoffspeicherung in Grenzflächen entscheidend verbessert haben. Die Charakterisierung von Kohlenstoffen mit hierarchischem Meso- und Makroporen-System mittels des detaillier-



Meso-makroporöse Kohlenstoffe. Linkes Bild: SEM-Aufnahme; rechtes Bild: Porengrößenverteilung basierend auf  $\text{N}_2$ -Physisorption.



Schematische Darstellung der drei möglichen Fälle von Grenzflächen zwischen Lithiummetall (Anode) und Festelektrolyt:

- a) Thermodynamisch stabile Grenzfläche mit reinem Ionentransfer,  
 b) thermodynamisch instabile Grenzfläche mit instabiler Interphase, die kontinuierlich wächst und  
 c) thermodynamisch instabile Grenzfläche mit blockierender Interphase.

ten WAXS-Verfahrens hat zu einem vertieften, grundlegenden Verständnis der atomaren Struktur dieser Kohlenstoffe beigetragen und erlaubt nun, die besonderen elektrochemischen Eigenschaften zu verstehen. Auch die Arbeiten zur Interkalation von Natrium in Graphit haben eine neue Stoßrichtung im Bereich der Elektrochemie und Batterieforschung initiiert. Diese Untersuchungen führen zu einem besseren Verständnis der elektrochemischen Analytik solcher Materialien und sind daher wichtig im Bereich der Entwicklung von Batterie-Materialien. Ein weiteres sehr wichtiges Ergebnis war die korrekte Beschreibung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Pseudokapazitäten, welches ein wichtiger Beitrag zur Analyse von Zyklovoltammetrie-Messungen an nanoskaligen, elektrochemisch aktiven Materialien darstellt.

Auf methodischer Seite wurde mit der elektrochemischen Quarzmikrowaage und den neu etablierten Rasterkraft-Methoden in flüssigen Elektrolyten die experimentelle Basis für grundlegende Studien zur Ladungs-Speicherung in Kohlenstoffen gelegt.

Im **Projektbereich Modellsysteme** konnten wichtige methodische Entwicklungen erreicht werden, welche insbesondere die übrigen Projektbereiche des Schwerpunkts nachhaltig positiv beeinflussen. So wurde die Atomlagenabscheidung (ALD) in den Projektbereichen Batterieelektroden sowie Speicherkatalysatoren für die gleichmäßige Abscheidung ultradünner Grenzflächen eingesetzt. Darüber hinaus stellen die hier intensiv genutzten optischen Methoden durchaus Alleinstellungsmerkmale des Standorts dar

und werden für die weitere Entwicklung des Schwerpunkts in zukünftigen Projekten sehr wichtig sein.

Der **Projektbereich Theorie und Modellierung** hat insbesondere neue theoretische Methoden entwickelt, die es ermöglichen, in Folgeprojekten Theorie und Experiment zu kombinieren. So werden die in der theoretischen Festkörperphysik entwickelten Methoden zur Beschreibung von Phononen und von Ramanspektren noch über Jahre hinweg in den verschiedensten Projekten Anwendungen finden. Dazu zeigen die ersten Ergebnisse der neu geschaffenen Professur für theoretische Chemie, dass die Modellierung des Ionentransports durch Grenzflächen eine ideale Ergänzung zu den experimentell arbeitenden Gruppen darstellt.

## Erreichte Strukturentwicklung

Mit der Einrichtung einer neuen Professur für Theoretische Chemie wurde an der JLU eine für die Zukunft immer wichtiger werdende Disziplin hinzugefügt, deren Fehlen bisher eine Schwäche im Fachgebiet war und die daher besondere Nachhaltigkeit erzeugt. Die Einrichtung des Zentrums für Materialforschung als ein interdisziplinäres wissenschaftliches Zentrum der JLU mit zwei Vollzeitkoordinatoren für Wissenschaft und Graduiertenbildung wird die wissenschaftliche Profilierung weiter vorantreiben und gemeinsame Lehre und gemeinsame Forschungsvorhaben zwischen Chemie und Physik befördern. Die seit langer Zeit strategisch betriebene enge Zusam-

menarbeit der Fachgebiete Chemie und Physik unter dem Dach der Materialwissenschaft hat sich damit bewährt und wurde weiter vertieft. Dazu trägt auch die neu geschaffene Plattform zur „Promotion in den Materialwissenschaften“ (PriMa) bei, die als Graduiertenschule die Vernetzung von Doktorandinnen und Doktoranden der beteiligten Gruppen fördert. Zudem ist es gelungen, aus STORE-E heraus – durch Weiterentwicklung des Schwerpunktthemas – eine tragfähige Thematik für einen SFB-Antrag zu entwickeln. Die hierbei angestrebte intensivere Zusammenarbeit mit der Philipps-Universität Marburg wird zu einer weiteren Stärkung der Forschung im Bereich der Grenzflächenchemie und Elektrochemie führen.

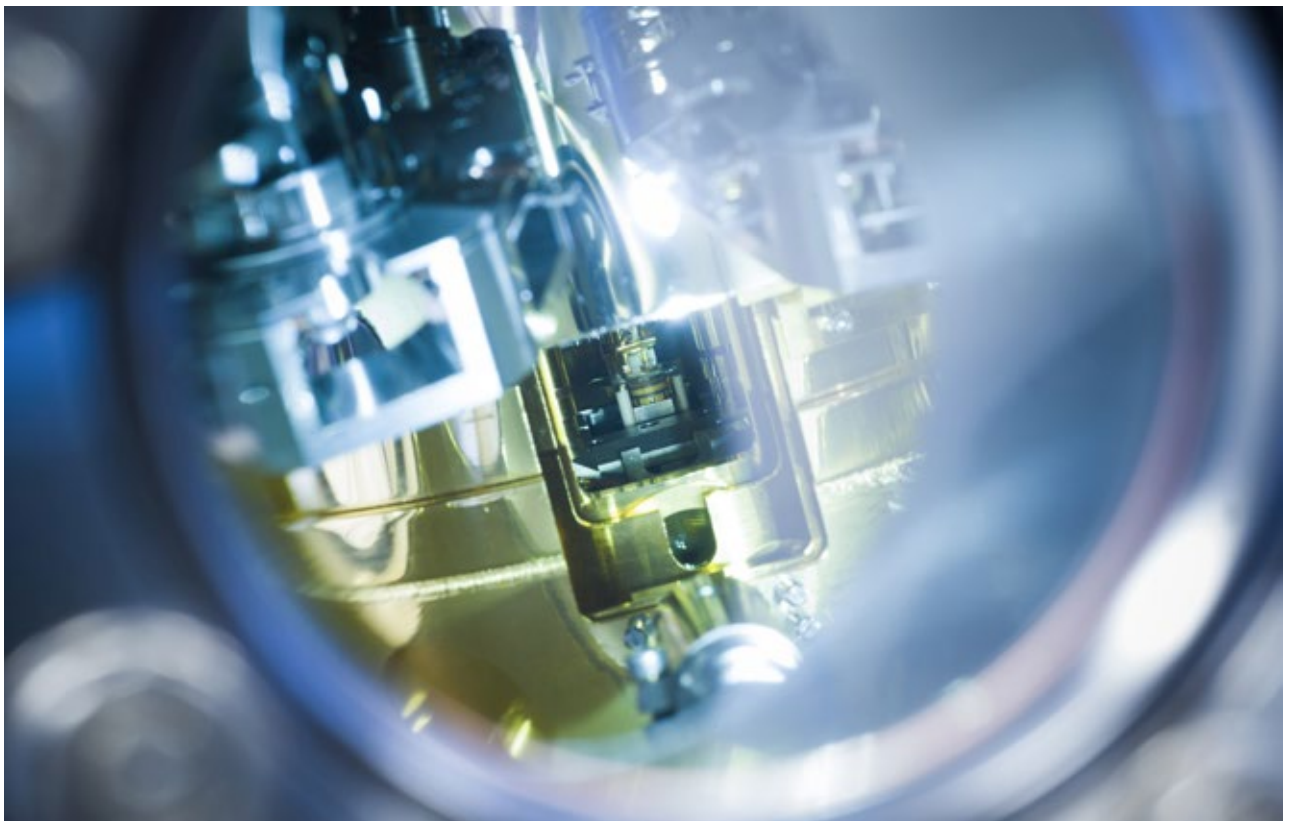
### Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld

Der Schwerpunkt konnte sich durch die Organisation von Tagungen mit internationaler Ausstrahlung und durch zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen und Vorträge auf internationalen Tagungen er-

folgreich profilieren. Die von STORE-E ausgerichtete erste Tagung über Festkörperbatterien in 2014 mit 125 Teilnehmerinnen und Teilnehmern im House of Logistics and Mobility (HOLM), Frankfurt sowie die Wiederholung der Tagung in 2016 wurde national wie international sehr gut angenommen und ist zu einer regelmäßig stattfindenden Tagungsreihe mit hochrangigen internationalen Vortragenden geworden.

Auch die Tagung über Cerdioxid-basierte Speicher-materialien im Juli 2015 ist in der Forschungsgemeinschaft sehr gut angenommen worden, so dass über eine Wiederholung nachgedacht wird.

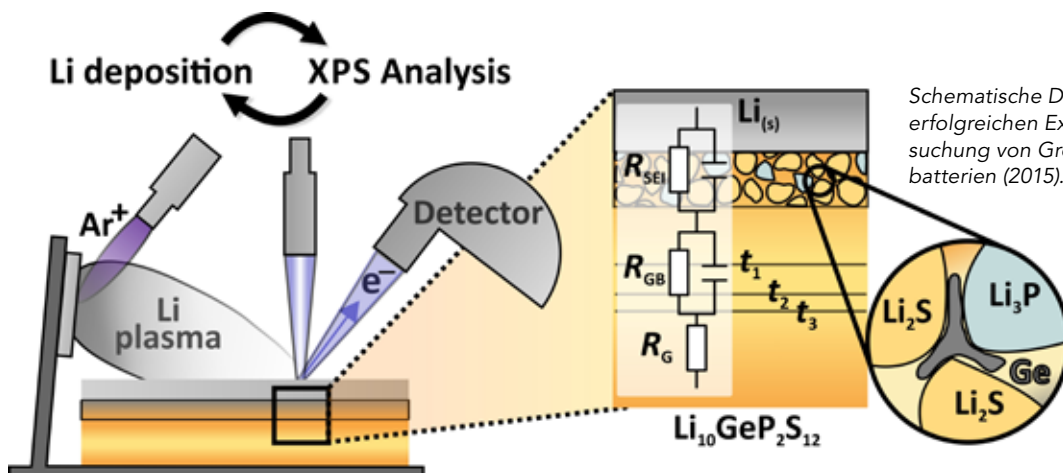
Insbesondere im Bereich der Forschung an Feststoffbatterien und deren Grenzflächen wird der Standort mittlerweile als national wie international führend wahrgenommen. Dabei wird die Leistungsfähigkeit des Verbunds und seiner Mitglieder, aber auch die Attraktivität der Themen des Schwerpunktes, vor allem auch durch die Einwerbung umfangreicher Drittmittelprojekte und erfolgreiche Nachwuchsarbeit belegt.



## Wichtigste Meilensteine des Projekts



Erste Messung der Eigenschaften eines neu entdeckten Sauerstoffspeicher-materials (2014).



Schematische Darstellung des sehr erfolgreichen Experiments zur Untersuchung von Grenzflächen in Feststoff-batterien (2015).



Messung einer Elektrodenoberfläche mit atomarer Auflösung in ionischer Flüssigkeit (2015).





Die Mitarbeitenden von STORE-E stellen von 2013 bis 2016 jedes Jahr mit Begeisterung ihren Schwerpunkt am Stand von Hessen schafft Wissen dem interessierten Publikum vor.



Teilnehmerinnen und Teilnehmer auf dem von STORE-E ausgerichteten II. internationalen Bunsenkolloquium zu Feststoffbatterien im House of Logistics and Mobility (HOLM), Frankfurt (2016).

## Weitere Informationsmöglichkeiten

- <https://www.uni-giessen.de/fbz/store-e>  
Projektseite des LOEWE-Schwerpunkts STORE-E an der Justus-Liebig-Universität Gießen
- <http://www.proloewe.de/storee>  
Darstellung des Schwerpunkts bei ProLOEWE

## Zahlen und Fakten

Förderzeitraum	01.01.2013 – 31.12.2016	Bemerkungen
bis Ende des Förderzeitraums verausgabte LOEWE-Mittel	4.278.536 Euro	
bis Ende des Förderzeitraums verausgabte Drittmittel	3.578.848 Euro	
eingeworbene Drittmittel	17.882.927 Euro	längste Laufzeit 2021
Anzahl der beteiligten Personen	ProfessorInnen: 14 wiss. MitarbeiterInnen: 56 techn.-admin. Mitarbeiter: 1	
Anzahl an innerhalb des Förderzeitraums abgeschlossenen Promotionen	6	
Anzahl an Veröffentlichungen in Fachzeitschriften innerhalb des Förderzeitraums	71	
Anzahl an Konferenzbeiträgen innerhalb des Förderzeitraums	50	
Anzahl an innerhalb des Förderzeitraums zugeteilten Patenten	0	

## Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute

### Justus-Liebig-Universität Gießen

<http://www.uni-giessen.de>

Die Universität Gießen ist eine moderne Hochschule mit über 400-jähriger Geschichte. Sie hat rund 28.000 Studierende und ist für die Zukunft bestens aufgestellt. Neben einem breiten Lehrangebot – von den klassischen Naturwissenschaften über Rechts- und Wirtschaftswissenschaften, Gesellschafts- und Erziehungswissenschaften bis hin zu Sprach- und Kulturwissenschaften – bietet sie ein lebenswissenschaftliches Fächerspektrum, das nicht nur in Hessen einmalig ist: Human- und Veterinärmedizin, Agrar-, Umwelt- und Ernährungswissenschaften sowie Lebensmittelchemie. Unter den großen Persönlichkeiten, die an der JLU geforscht und gelehrt haben, befindet sich eine Reihe von Nobelpreisträgern, unter anderem Wilhelm Conrad Röntgen (Nobelpreis für Physik 1901) und Wangari Maathai (Friedensnobelpreis 2004).

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT  
GIESSEN

### Technische Hochschule Mittelhessen

<http://www.thm.de>

Die THM gehört mit über 15.000 Studierenden zu den größten Fachhochschulen Deutschlands. In Gießen, Friedberg und Wetzlar bietet sie ein breites Spektrum an Studienangeboten mit ingenieurwissenschaftlichem Schwerpunkt. Das Forschungsprofil der THM spiegeln ihre evaluierten Kompetenzzentren wider: Biotechnologie und Biomedizinische Physik, Energie- und Umweltsystemtechnik, Informationstechnologie, Nanotechnik und Photonik, Optische Technologien und Systeme, Verkehr – Mobilität – Automotive, Werkstoffwissenschaften und Materialprüfung. Das „Zentrum für den wissenschaftlichen Nachwuchs der THM“ unterstützt kooperative Promotionen mit Promotionsprogrammen, Qualifizierungen, Förderungen u. a..



### Philipps-Universität Marburg

<http://www.uni-marburg.de>

Die Philipps-Universität versteht sich als klassische Volluniversität mit breitem Fächerspektrum. Inzwischen sind nahezu alle großen Wissenschaftsbereiche der Philipps-Universität – von den Sozialwissenschaften bis zur Medizin – in Forschungsnetzwerke eingebunden, die DFG-Sonderforschungsbereiche, Forschergruppen, Graduiertenkollegs, Förderungen im LOEWE-Programm und 8. Rahmenprogramm der EU sowie Akademienvorhaben u. a. umfassen und von im Rahmen der Personalförderung mit Preisen ausgezeichnete Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler (Leibniz, ERC Grants) einschließen.

Philipps



Universität  
Marburg

HESSEN



Das Forschungsförderungsprogramm LOEWE ist eine Förderinitiative des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst.

## Impressum

### Herausgeber:

Hessisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst  
Rheinstraße 23 – 25  
65185 Wiesbaden

### Inhalt:

LOEWE-Schwerpunkt STORE-E –  
Stoffspeicherung in Grenzschichten

### Redaktion:

LOEWE-Geschäftsstelle im  
Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst

### Layout:

Christiane Freitag, Idstein

### Fotos:

LOEWE-Schwerpunkt STORE-E – Stoffspeicherung in Grenzschichten  
Titel, S. 3 Abb. 1, S. 6, S. 7 Abb. 1 und Abb. 3: © Jan Michael Hosan/Hessen schafft  
Wissen; S. 7 Abb. 2: © Sebastian Wenzel/JLU Gießen; S. 8 Abb. 1: © Sascha Vogel/  
Goethe-Universität Frankfurt am Main; S. 8 Abb. 2: © Thomas Leichtweiß/JLU Gießen