Elektrochemie und Energie

Materialien | Modellierung | Komponenten | Systeme
Testzentrum | Produktionstechnologie | Sicherheit

Batterien

Brennstoffzellen

Elektrolyse

Wasserstoff

Superkondensatoren

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

ZSW

Standort Ulm

// ZSW Ulm
Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

// ZSW Ulm eLaB
Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

Inhalt

4 Interview mit Prof. Dr. Werner Tillmetz

6 // **Batterien**

10 Materialforschung und Zellchemie

12 Zell-Alterung und Post-Mortem-Analysen

14 Elektroden- und Zelltechnologie

16 Produktions- und Prozessforschung

18 Batterie- und Sicherheitstestzentrum

20 Systemtechnik, Modellierung und Simulation

22 // **Brennstoffzellen + Wasserstoff**

26 Brennstoffzellen-Komponenten

28 Design und Fertigungstechnologien

30 Modellierung und Simulation

32 Brennstoffzellen-Testzentrum

34 Systeme und Reformer

36 Neue Elektrolyse-Technologien

38 Wasserstoff als Kraftstoff

Elektrochemie und Energie

Interview mit Prof. Dr. Werner Tillmetz, Mitglied des Vorstands

Energie mit Zukunft – das ist das Motto des ZSW schon seit fast drei Jahrzehnten. Die Entwicklung neuer elektrochemischer Energietechnologien, in enger Kooperation mit Partnern aus Industrie, Wissenschaft und Politik, hat enorm an Fahrt aufgenommen. Unter einem Dach bietet das ZSW in Ulm das ganze Kompetenzspektrum zur Erforschung und Entwicklung von innovativen Energiespeichern und -wandlern.

Wie beurteilen Sie die weltweite Energieversorgung und die Entwicklung der erneuerbaren Energien?

Trotz jahrelanger Anstrengungen basiert die Energieversorgung bis heute, sowohl weltweit als auch in Deutschland, konstant zu rund 80 % auf fossilen Brennstoffen. Moderne erneuerbare Energien besetzen bislang nur eine Nische. Beispielsweise kommen im weltweit schnell wachsenden Fahrzeugmarkt fast ausschließlich mineralölbasierte Kraftstoffe zum Einsatz.

Und die Folgen sind absehbar?

Fossile Kraftstoffe sind gleichbedeutend mit CO_2-Emission und der damit verbundenen Klimaänderung, die inzwischen auch in Deutschland zu enormen Schäden führt und global immer größere Flüchtlingsströme erzeugt. Hinzu kommen die Belastungen durch Schadstoffe in Ballungszentren und die vielen geopolitischen Verwerfungen aufgrund des Wettstreits um die begrenzt verfügbaren fossilen Ressourcen, von denen wir so abhängig sind.

Was muss passieren, um die Energiewende und Elektromobilität voranzubringen?

Die politischen Rahmenbedingungen ändern sich derzeit sehr schnell und die Investitionen in erneuerbare Energietechnologien erreichen inzwischen weltweit Rekordwerte. Jetzt geht es darum, den industriellen Strukturwandel für die neuen Schlüsseltechnologien, wie Batterien und Brennstoffzellen, voranzutreiben. Im Mobilitätssektor entfallen bis zu 40 % des Wertschöpfungsanteils von Elektrofahrzeugen auf das Batteriesystem. Und viele klassische Komponenten eines Fahrzeugantriebes werden nicht mehr benötigt.

Worin bestehen Ihrer Meinung nach die größten Möglichkeiten, den Einsatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen?

In der Mobilität haben wir enormen Nachholbedarf, aber auch bei den Sektoren Stromerzeugung und Wärmebereitstellung sind noch riesige Herausforderungen vor uns. Künftig wird die sektorenübergreifende Speicherung von Energie eine herausragende Rolle spielen. Fortschrittliche Energiespeicher wie Batterien und Wasserstoff sind hierfür entscheidend.

Mit dem Thema Mobilität sprechen Sie etwas an, das den Menschen ans Herz gewachsen und bei dem Effizienz von immenser Bedeutung ist. Wie sind die Wirkungsgrade alternativer Antriebskonzepte zu bewerten?

Batterie-elektrische Antriebe erreichen im Alltagsbetrieb einen Wirkungsgrad im Bereich von 70 bis 80 %. Das sind Welten zu den etwa 25 %, die ein moderner Verbrennungsmotor von der wertvollen Fracht im Tank wirklich nutzt. Und den „Kraftstoff" nicht wie Öl zu importieren, sondern Strom oder Wasserstoff lokal aus Sonne und Wind zu erzeugen, ist aus vielerlei Gründen hoch attraktiv.

Und welchen Beitrag leistet hier konkret das ZSW?

Die Schwerpunkte des Ulmer Geschäftsbereichs Elektrochemische Energietechnologien liegen in der Entwicklung von Batterien und Brennstoffzellen. Zum Portfolio gehören auch Superkondensatoren als Hochleistungsspeicher sowie neue Elektrolysetechnologien zur Wasserstofferzeugung. Unsere Forschungsthemen und Leistungen umfassen die komplette Wertschöpfungskette: die Modellierung und Simulation elektrochemischer Vorgänge, die Synthese und Charakterisierung von Aktivmaterialien, die Optimierung von Komponenten und deren Herstellungsverfahren sowie die Qualifikation neuer Produkte in den Testfeldern. Aus der sehr engen Kooperation mit vielen auch zunehmend internationalen Partnern aus allen Bereichen der Industrie resultiert die Anwendungsnähe unserer Aktivitäten.

Das heißt, das ZSW ist sozusagen ein Schmelztiegel mit langjährigem Know-how, wissenschaftlichen Erkenntnissen und neuesten Technologien, der attraktive Lösungen für die Industrie schafft?

So kann man das durchaus sehen. Neben der engen Kooperation mit der Industrie sind die Partnerschaften mit anderen Forschungsinstituten wie dem Helmholtz Institut Ulm, vielen Instituten der Universität Ulm sowie mit vielen internationalen Wissenschaftlern ein großer Vorteil. Damit sichern wir nicht nur den Zugang zu neuesten Forschungsergebnissen, sondern auch den notwendigen wissenschaftlich-technischen Nachwuchs für unsere Projekte. Und der Know-how-Transfer in die Industrie erfolgt ganz häufig über junge Mitarbeiter, die nach ihrer Master- oder Doktorarbeit am ZSW in die Wirtschaft wechseln.

Und was waren die bisher größten Erfolge?

Ein Meilenstein war sicherlich der Aufbau unseres Batterieforschungszentrums eLaB mit einer einzigartigen Forschungsplattform zur industriellen Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen und einem international anerkanntem Batterietestzentrum für alle Arten von Batterietests. Im Bereich Brennstoffzellenforschung sind die Entwicklung und der Test von Hochleistungs-Brennstoffzellen der 100-kW-Klasse ein schöner Erfolg. Und anwendungsnahe Lebensdauertests und Untersuchungen zum Einfluss der Wasserstoffqualität auf Brennstoffzellen liefern wichtige Erkenntnisse für unsere Partner in der Industrie.

Was sind die Zukunftsthemen?

Brennstoffzellen und Batterien im Auto oder in stationären Anwendungen stehen ganz am Anfang der Kommerzialisierung. Für den langfristigen Markterfolg werden noch viele technologische Fortschritte von Bedeutung sein. So werden neue, nachhaltige Materialien eine wichtige Rolle bei den Li-Ionen-Zellen der Zukunft spielen. Für sichere Hochenergie-Zellen ist neben dem Zelldesign auch eine Optimierung der Elektroden und Separatoren erforderlich. Bei den Brennstoffzellen liegt der Fokus auf kostengünstigen Komponenten und neuen Herstellverfahren sowie Methoden zur Qualitätssicherung.

Was glauben Sie: Welche Entwicklungsschritte wird die Energiewende in den nächsten 5 Jahren noch mit sich bringen?

Der Wettbewerb um die besten Produkte auf dem heiß umkämpften Weltmarkt hat erst begonnen. Und das bedarf noch vieler kreativer Köpfe und einer exzellenten Forschungsinfrastruktur – sprich des ZSW.

Die Speicherung von elektrischer Energie mit Batterien stellt eine der Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert dar und gehört zu den bedeutendsten wissenschaftlichen, gesellschaftlichen und volkswirtschaftlichen Herausforderungen.

Batterien

Anwendungen, Expertise und Technologien

Anwendungen
Hochleistungsbatterien sind das Kernelement moderner Hybrid- und Elektroantriebe. Sie haben großen Einfluss auf Kosten, Verbrauch, Reichweite und Zuverlässigkeit von Fahrzeugen. Damit wird die Lithium-Ionen-Technologie zu einem strategischen Element für die Automobilindustrie von morgen. Für die dezentrale Speicherung von Strom, der z. B. mit der eigenen Photovoltaikanlage erzeugt wird, bieten die Lithium-Ionen-Batterien mit ihrer hervorragenden Zyklenstabilität die einmalige Chance, den Eigenverbrauch zu maximieren. Gleichzeitig können mit Batterien Verteilnetze optimiert und Notstromeigenschaften realisiert werden.

Expertise
Das Kompetenzspektrum des ZSW zu Batterien umfasst die komplette Wertschöpfungskette: die Synthese und Charakterisierung von Aktivmaterialien, die Modellierung und Simulation von elektrochemischen Vorgängen, die Optimierung von Komponenten und Technologien für die Serienfertigung, Zell-Prototypen und Musterserien sowie die industrielle Prozess- und Produktionsforschung. Im Batterietestzentrum werden auch alle Arten von Batterietests ausgeführt sowie Fragen zur Systemtechnik oder zum Batteriemanagement untersucht.

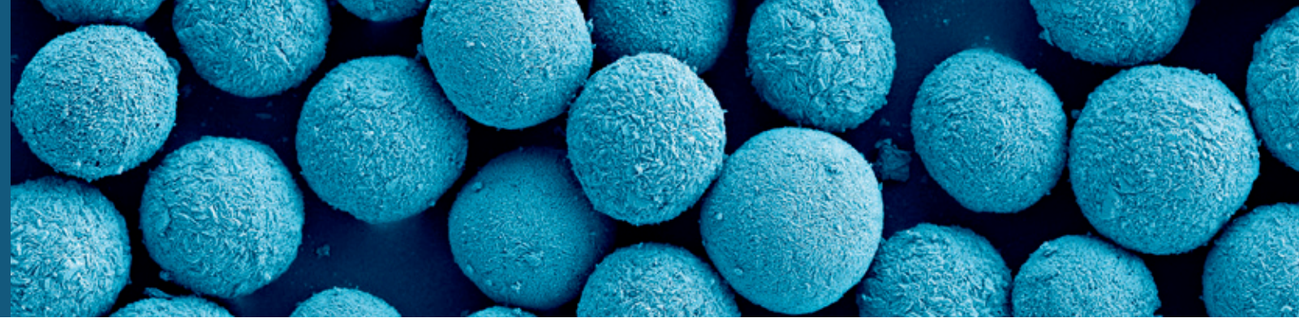
Technologien
Die Lithium-Ionen-Technologie ist heute der Stromspeicher der Wahl für viele Anwendungen im Consumer-, Automobil- und stationären Bereich. Durch kontinuierliche Verbesserungen der Elektrodenmaterialien und des Zelldesigns konnten Energiedichte, Leistung und Lebensdauer über die letzten zwanzig Jahre enorm gesteigert werden. Diese schrittweise Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie wird sich auch noch über die nächsten zwanzig Jahre fortsetzen.

Das ZSW arbeitet seit rund 30 Jahren in allen Bereichen der Batterieforschung. Motivation sind die kontinuierliche Erhöhung der Energiedichte unter Einhaltung von Sicherheitsstandards, das Hoch- und Tieftemperaturverhalten sowie Fragen zur Verfügbarkeit kritischer Materialien.

Parallel zu diesen evolutionären Entwicklungen arbeiten wir auch an komplett neuen Speichertechnologien wie an Natrium-Ionen-Zellen, Metall-Luft-Systemen, an Redox-Flow-Technologien oder an asymmetrischen Doppelschichtkondensatoren.

Batterien

Materialforschung und Zellchemie



REM-Aufnahme eines kobaltfreien Hochenergie-Kathodenmaterials für Lithium-Ionen-Batterien.

Rund 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser umfangreiches Verständnis zu den Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von Aktivmaterialien in elektrochemischen Systemen. Für die Synthese ganz neuer Materialien (Beispiel Hochvoltkathoden) ist deren Wechselwirkung mit den anderen Komponenten einer Zelle (Beispiel Elektrolyt) und den sehr vielfältigen Anforderungen (Beispiel Zyklenfestigkeit) entscheidend für den Erfolg.

Synthesereaktor zur Herstellung von Aktivmaterial im Kilogramm-Maßstab.

Syntheseprozesse

Die Synthese neuer chemischer Verbindungen zur elektrochemischen Speicherung von Energie und die Herstellung maßgeschneiderter Pulver und Pasten für die Elektrodenbeschichtung gehören zu unseren Kernkompetenzen. Dabei setzten wir eine Vielzahl etablierter und neuer Herstellverfahren wie Fällungsprozesse oder Mahltechnologien ein. Die Schwerpunkte liegen auf der Optimierung von Pulvermorphologie, Partikelgröße und Partikelbeschichtung. Dafür setzen wir die Methode der statistischen Versuchsplanung ein. Unsere Möglichkeiten zur Pulverherstellung umfassen wenige Gramm bis zum Kilogramm-Maßstab. Neben Synthesen von anorganischen Materialien werden auch neue Materialien für Elektrolyte und Elektroden entwickelt.

Analytik

Das elektrochemische Verhalten von Speichermaterialien für Lithium-Ionen-Batterien hängt stark von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem kristallinem Aufbau ab. Form, Größenverteilung und Oberflächeneigenschaften der mikroskopisch kleinen Speicherpartikel bestimmen in starkem Maße das Verarbeitungsverhalten und damit die Einsetzbarkeit in die technischen Prozesse der Batteriefertigung. In Forschungsprojekten gehört es zu unseren Kernaufgaben, ein vollständiges Eigenschaftsprofil der Materialien zu erstellen, Einflussfaktoren zu erkennen sowie Struktur-Eigenschaftsbeziehungen abzuleiten und zu verstehen.

Batterien verlieren im Gebrauch fortschreitend Leistung und Speicherfähigkeit. Ursachen für diese Alterungserscheinungen können chemische Korrosionsvorgänge an den Materialien und Komponenten, oder auch die mechanische Degradation sein. Unsere Kompetenz liegt darin, Alterungseffekte zu untersuchen, zu verstehen und das gewonnene Verständnis direkt in die Materialoptimierung und Zellentwicklung rückfließen zu lassen.

Neben Standardmethoden der chemischen Analyse (ICP-OES), Strukturaufklärung (XRD), Mikroskopie (REM, EDX) und Oberflächenuntersuchung (BET) führen wir Tiefenprofilanalysen mit hoher Auflösung durch. Das Zersetzungsverhalten bei höheren Temperaturen können wir mit den thermoanalytischen Methoden TG/DSC-MS und ARC ermitteln.

„ZUKÜNFTIGE ELEKTROMOBILITÄT UND ERNEUERBARE ENERGIEN ERFORDERN NEUE ENERGIESPEICHERSYSTEME. WIR ERFORSCHEN BATTERIEN VOM PULVER BIS ZUR FERTIGEN ZELLE."

Große Vielfalt künftiger Speichertechnologien

Aktuell dominiert die Li-Ionen-Technologie die F&E-Landschaft. Mittelfristig wird es aber eine ganze Reihe neuer Technologien geben, mit denen wir uns heute schon auseinandersetzen. Dazu gehören:

- Nanostrukturierte Nickelelektroden, eisenbasierte Anoden und neuartige Manganoxide als Kathode für alkalische Hochleistungszellen
- Fortschrittliche, pseudokapazitive Aktivkohlen für asymmetrischen Doppelschichtkondensatoren
- Leistungsfähige Anodenmaterialien und Elektrolyte für die Natrium-Ionen-Technologie
- Metall-Luft-Zellen, als Kombination einer metallischen (Lithium, Magnesium) Elektrode mit einer Luftelektrode
- Neue Zell-Konzepte für optimale Funktionalität

Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens
Fachgebietsleitung Akkumulatoren Materialforschung

LEISTUNGSSPEKTRUM

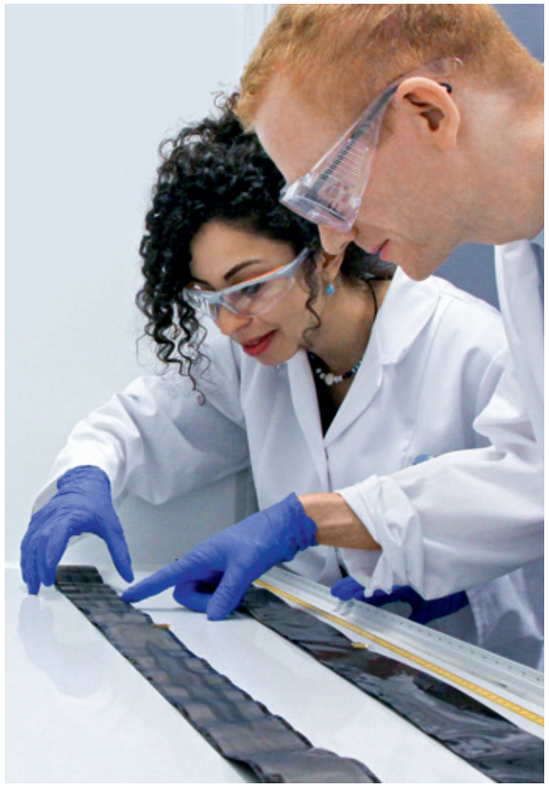
- Entwicklung neuer Aktivmaterialien: Hochvoltspinelle, Lithiumübergangsmetallphosphate und -silikate, Titanate, Legierungsanoden und Elektrolyte inkl. Additive
- Optimierung „klassischer" Aktivmaterialien: Morphologie, Oberflächenmodifizierung etc.
- Analyse der Wechselwirkungen Elektrode/Elektrolyt und Anode/Kathode
- Alle modernen Methoden zur elektrochemischen Charakterisierung von Materialien
- Untersuchung von Alterungseffekten von Batteriematerialien und -komponenten: Standardmethoden der chemischen Analyse, Oberflächenuntersuchung, Tiefenprofilanalysen sowie thermoanalytische Methoden (TG/DSC-MS und ARC)
- In-situ-Untersuchungen an Materialien in Modellzellen und Ex-situ-Untersuchungen an Materialien aus realen Zellen (XRD, Ramanspektroskopie, TPS)

Ansprechpartner: Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens | margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-612

Zell-Alterung und Post-Mortem-Analysen

3-D-CT für zerstörungsfreie Untersuchungen von Li-Ionen-Zellen.

Mit der Markteinführung von Lithium-Ionen-Zellen für Elektroautos, E-Bikes und stationärem Solar-Stromspeicher gewinnt die detaillierte Analyse gealterter oder defekter Akkus immer mehr an Bedeutung. Bei der Schadensbeurteilung geht es häufig um die Frage, ob unsachgemäße Nutzung, Produktionsfehler oder Schwachstellen in der Konstruktion die Beeinträchtigung verursacht haben.



Sichtprüfung und Probenentnahme der ausgewaschenen und ausgerollten Elektrodenbänder nach der Zellöffnung.

Alterungsmechanismen und Lebensdauerprognosen

Das durchgängige Verständnis der Zusammenhänge zwischen Zellmaterialien, Elektroden- und Zelldesign und Alterungsmechanismen ist zwingend notwendig, um Alterungstests in Bezug auf Vorhersagekraft und Zeitraffung zu verbessern und um Lebensdauerprognosen mit hoher Treffsicherheit entwickeln zu können.

Auslöser für die Zellalterung (Degradation) sind verschiedene Alterungsmechanismen wie das Wachstum von Schichten aus Zersetzungsprodukten oder die Abscheidung von metallischem Lithium auf den Anoden (‚Li-Plating'). Entscheidend zur Aufklärung solcher Schadensfälle ist die sichere, reproduzierbare und möglichst wenig verfälschende Öffnung von Batteriezellen.

Nach einer Zellöffnung werden die Elektrodenbänder ausgerollt (s. Abb. links), um aus Anode, Kathode und Separator Proben zu entnehmen. Diese können mittels umfangreicher physikalisch-chemischer Methodik analysiert werden. Zur Verfügung stehen u. a. Rasterelektronenmikroskopie (REM) zur Aufklärung der Mikrostruktur, die Röntgenstrukturanalyse (XRD) zur Bestimmung von Gitterkonstanten, EDX und ICP zur chemischen Elementaranalyse von Elektroden und GC-MS zur Elektrolytanalyse. Am ZSW konnte außerdem eine Methode implementiert werden, wobei mittels rekonstruierten Zellen und Referenzelektrodenmessungen Betriebsbedingungen von Lithium-Ionen-Zellen sicher vorhersagbar werden.

Zerstörungsfreie Untersuchungen an Lithium-Ionen-Zellen

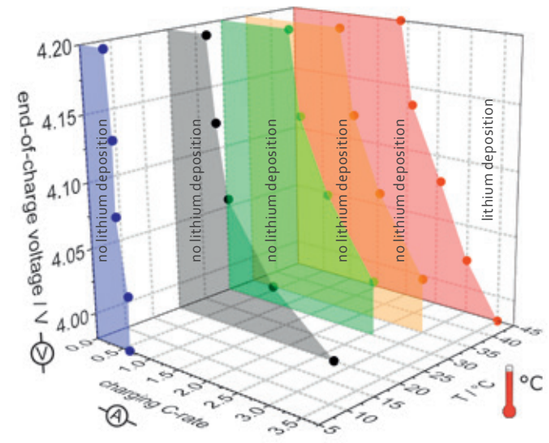
Neben Zellöffnungen und Post-Mortem-Analysen werden am ZSW zerstörungsfreie 3-D-computertomografische Untersuchungen an Batterien und Zellen durchgeführt. Solche dreidimensionalen Einblicke ins Zellinnere liefern wichtige Erkenntnisse zur Optimierung von Zellen und zu den Produktionsprozessen. Sie bilden auch die Basis für eine gezielte Verbesserung von Materialien und Prozessen im Rahmen der Elektroden- und Zellfertigung und sind darüber hinaus Teil der Entwicklung neuer Prüfmethoden für die Batterieindustrie. Die dreidimensionalen Messungen werden bei Schadensfällen (Post-Mortem) sowie zur Qualitätssicherung neuer Batterien durchgeführt.

BDSH e.V. – Der Bundesverband für Sachverständige aller Branchen
BDSH e.V.
zertifizierter Sachverständiger

„AUS DEN ERGEBNISSEN DER POST-MORTEM-ANALYSEN KÖNNEN TYPISCHE SCHÄDIGUNGSMECHANISMEN VON BATTERIEN ABGELEITET WERDEN."

LEISTUNGSSPEKTRUM

- ZSW-Sachverständiger mit über zwanzigjähriger Erfahrung in der Batterieforschung (Bundesverband Deutscher Sachverständiger des Handwerks (BDSH) geprüft)
- Professionelle Arbeitsplätze zur Öffnung von Zellen aller Bauarten (inkl. Argon Glove-Box)
- 3-D-Röntgen-Computertomograf mit 300-KV-Mikrofokusröhre und Detailerkennbarkeit bis 1 µm (geeignet vor allem für größere Zellen und ganze Batteriemodule) sowie einer Nanofokusröhre mit Detailerkennbarkeit von 0,5 µm
- Physikalisch-chemische Analysemethoden zur Untersuchung der Schädigungsmechanismen (SEM, EDX, ICP-OES, XRD, GC-MS, GD-OES, DSC/TG/MS)
- Analyse aller Bestandteile der Zellen – Anoden, Kathoden, Separatoren und Elektrolyt



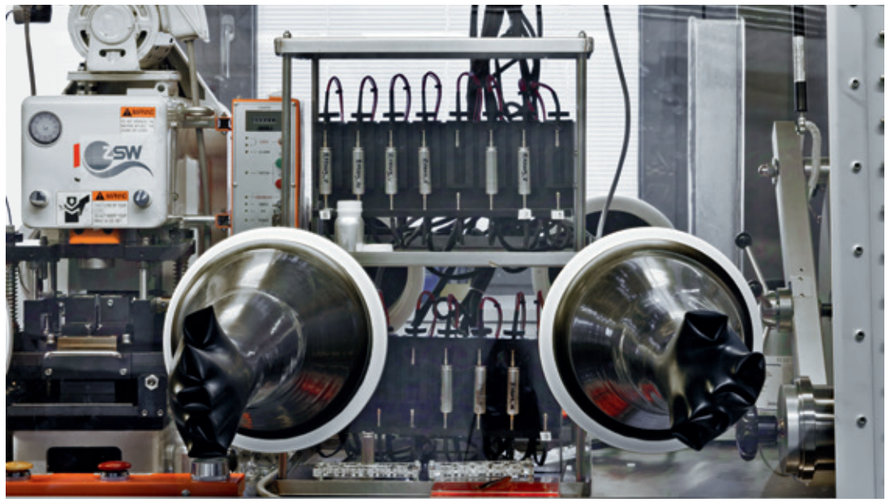
Einfluss der Betriebsparameter auf die Li-Abscheidung in Pouchzellen. Quelle: ZSW/T. Waldmann et al., J. Electrochem. Soc., 163, A1232 (2016).

Ansprechpartner: Michael Kasper | michael.kasper@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-564

Elektroden- und Zelltechnologie

Stapel-Wickel-Maschine zur Herstellung von Pouchzellen.

Ein innovatives Aktivmaterial alleine macht noch keine gute Batterie aus. Die richtige Partikelmorphologie, ausgewählte Additive und ein abgestimmter Herstellprozess sind ausschlaggebend für gute Elektroden. Die Rezeptur und Rheologie der Beschichtungspaste, die Parameter für den Beschichtungs- und Trocknungsprozess und zuletzt die Abstimmung der Elektroden sind von ganz entscheidender Bedeutung für die Qualität der Zelle.



Laboranlage zum Verschließen und Befüllen von 18650-Zellen.

Wussten Sie schon?

Lithium-Ionen-Batterien für Elektroautos müssen so lange wie das Auto leben und dabei – je nach Antriebskonzept und Fahrleistung – viele Tausend Ladezyklen absolvieren. Dabei sollte die Kapazität des Akkus nicht unter 80 Prozent des Nennwertes fallen. Den Ulmer Materialforschern ist es gelungen, 18650-Standardzellen zu entwickeln, die nach 17.000 vollständigen Lade- und Entladevorgängen mit 2 C immer noch mehr als 80 Prozent der Ausgangskapazität aufweisen.

Elektrodenentwicklung und Elektrodenherstellung

Je nach Anwendung der Lithium-Ionen-Zelle mit Aktivmaterial ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Belegung der Elektrode sowie an deren Struktur. Elektroden für Hochleistungs-Zellen (High Power) werden dünner beschichtet und haben einen erhöhten Anteil an Leitfähigkeitsadditiven. Für den Einsatz in High-Energy-Anwendungen werden Elektroden dagegen üblicherweise stärker belegt und der Anteil an Additiven in der Rezeptur auf ein Minimum reduziert.

Die Porosität der Elektroden bestimmt deren Kinetik beim Lade- und Entladevorgang sowie ihre Leistungsdichte. Die Haftfestigkeit und Stabilität werden über die Herstellparameter beeinflusst. Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM), Quecksilber-Porosimetrie und die elektrochemische Analyse von Elektroden ermöglichen es, den optimalen Elektrodenaufbau zu ermitteln.

Das ZSW erarbeitet Rezepturen und geeignete Verarbeitungsverfahren, mit denen die fortschrittlichen Eigenschaften des Materials in der Zelle realisiert werden können. Eine umfangreiche Ausstattung von Analyse- und Testgeräten ermöglicht eine fundierte Beurteilung der Auswirkung des Verarbeitungsweges einerseits auf das Material und andererseits auf die Eigenschaften der Elektroden und Zellen.

Entwicklung von Vollzellen

Mit der Abstimmung von Kathode auf Anode wird die Zelle für eine spezifische Anwendung ausgelegt. Dabei können Zyklenstabilität, Entladestromrate oder ein bestimmter Betriebstemperaturbereich im Vordergrund stehen.

Im ersten Schritt liefern elektrochemische Untersuchungsergebnisse der Elektroden in Halbzellen wichtige Anhaltspunkte für eine geeignete Elektrodenbalancierung. Einen tieferen Einblick in die Wirkzusammenhänge ermöglichen elektrochemische Untersuchungen verschiedener Elektrodenkombinationen in Vollzellen mit Referenzelektrode.

Mit der Ausrüstung am ZSW können Single-Layer-Pouchzellen, gestapelte Pouchzellen, gewickelte 18650-Zellen oder prismatische Zellen (PHEV-1) hergestellt werden.

„DAS BEHERRSCHEN DER ELEKTRODEN- UND ZELLTECHNOLOGIE IST EIN ENTSCHEIDENDER SCHRITT, UM FORTSCHRITTLICHE AKTIVMATERIALIEN IN DEN MARKT ZU BRINGEN."

LEISTUNGSSPEKTRUM

Für die Elektroden- und Zellentwicklung (18650- und Pouchzellen) stehen alle Anlagen zur Verfügung:

- Verschiedene Misch-Technologien (vom Labor bis zum Industrie-Maßstab), Kugelmühlen, Rheometer- und Analyse-Labor
- Verschiedene Beschichter, von der Tisch- bis zur Technikumsanlage
- Trockenraum mit Wickel- (18650) und Stapel-Wickel-Maschine, Laseranlage zur Konfektionierung, Behandlung und Kontaktierung von Elektroden, Laminier-Maschine, Tiefziehgerät für Pouchzellen
- Verschiedene Elektrolyt-Befüll- und Formier-Einrichtungen, sowie 350 Zyklisierplätze

Labormischer für Elektrodenpasten.

Ansprechpartner: Dr. Alice Hoffmann | alice.hoffmann@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-558

Produktions- und Prozessforschung

200 m² Trockenraum zur vollautomatischen Zellassemblierung von prismatischen Wickelzellen.

Für eine erfolgreiche Kommerzialisierung von Lithium-Ionen-Zellen ist das Beherrschen aller Herstellprozesse im industriellen Maßstab und deren Zusammenwirken unter realen Produktionsbedingungen mit einer industriellen Anlage von größter Bedeutung. Die Qualität, Geschwindigkeit und Robustheit der Prozesse bestimmen Kosten, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Zelle.

Beschichtungsanlage für Elektroden mit 20 m Trockenstrecke und bis zu 30m/min. Bandgeschwindigkeit.

Wussten Sie schon?

Die weltweit einmalige Forschungsplattform für industrielle Fertigung von Zellen wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit 25,7 Millionen Euro und vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft (MFW) des Landes Baden-Württemberg mit sechs Millionen Euro gefördert.

Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen

Mit den Anlagen werden die Herstellprozesse für großformatige Zellen, wie sie in Elektroautos oder zur Speicherung von erneuerbarer Energie zum Einsatz kommen, im industriellen Maßstab erforscht. Kernthema ist die Optimierung der einzelnen Prozessschritte und die Validierung neuer Zellchemie in Standardzellen. Mit dem Aufbau der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)" wurde die Lücke beim Übergang vom Labormaßstab zur kommerziellen Serienfertigung geschlossen.

Der Forschungsfokus liegt auf:

- Demonstration fortschrittlicher Aktivmaterialien und Rezepturen in Standardzellen
- Evaluierung neuer Materialien und Komponenten für die Produktion im industrierelevanten Umfeld
- Erprobung und Optimierung neuer Produktionsverfahren und Anlagenkomponenten in modularer und prozesssicherer Testumgebung sowie
- Weiterentwicklung der für Qualität und Ausbeute entscheidenden Prozessparameter und Qualitätssicherungsmethoden im seriennahen Umfeld

„MIT DER FORSCHUNGSPLATTFORM STELLEN WIR UNSEREN PARTNERN AUS INDUSTRIE UND WISSENSCHAFT EINE STABILE BASIS FÜR GEMEINSAME PROJEKTE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG ZUR VERFÜGUNG."

Alle Prozesse bis zur fertigen Lithium-Ionen-Zelle, von der Rezepturvorbereitung, über die Elektrodenherstellung und Zellassemblierung bis zur Formierung (die geladenen Zellen) können mit der modular aufgebauten Anlage unter seriennahen Bedingungen entwickelt, optimiert und qualifiziert werden. Die Assemblierung ist auf verschiedene Zellformate adaptierbar und kann eine Zelle pro Minute mit serientauglichen Prozessen erstellen. Für jeden Produktionsschritt steht ein stabiler Parametersatz zur Verfügung, mit dem der Referenzprozess auf der FPL in Einzelschritten oder gesamthaft „aufgerufen" werden kann.

Dr. Wolfgang Braunwarth
Fachgebietsleitung
Produktionsforschung

LEISTUNGSSPEKTRUM

Pastenherstellung

- Automatisches Abwiegen und Zuführen der Materialien
- Thermostatisierbare Mischanlage zur Pastenherstellung bis zu 60-l-Ansätzen

Elektrodenfertigung

- Doppelstöckige Elektrodenbeschichtungsanlage zur beidseitigen Elektrodenbeschichtung mit 500 mm Beschichtungsbreite, 30 m/min Bandgeschwindigkeit und verschiedenen Auftragssystemen
- Präzisionskalander mit 600 mm Walzenbreite
- Rollenschneider (30 m/min) mit austauschbaren Schneideinheiten mit je 4 Messern und Bürstensystem zur Reinigung der geschnittenen Elektrodenbänder

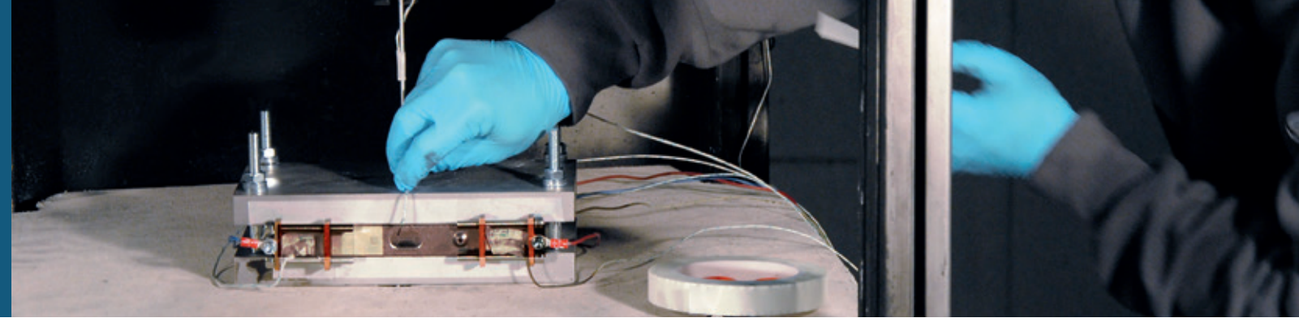
Zellassemblierung/Formierung

- Vollautomatische Anlage für Wickeln, Montage und Befüllung von prismatischen Zellen mit einer Taktzeit von 1 Zelle/min.
- 200 m² Trockenraum (Taupunkt –60°C) für die Erprobung neuer Assemblierungstechnologien
- Vollautomatische Formierung mit 240 temperierbaren Zyklisierplätzen und 2.016 Lagerplätzen

Anlage zum Vorformieren prismatischer Wickelzellen (PHEV-1-Format).

Ansprechpartner: Dr. Wolfgang Braunwarth | wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-562

Batterie- und Sicherheits-testzentrum



Lithium-Ionen-Zelle wird zum Nageltest vorbereitet.

Batterien müssen auch bei schwierigsten Bedingungen und Voraussetzungen ihre Leistungsfähigkeit und Lebensdauer unter Beweis stellen. Dabei stehen deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Ermittlung der qualitativen Eigenschaften der Akkumulatoren und die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung und in Unfallsituationen im Mittelpunkt der Testaktivitäten.

Testbunker mit Presse für 100-Tonnen-„Crush-Tests" mit Videoüberwachung.

Sicherheitstest

Die Sicherheit von Batterien und die Analyse ihres Verhaltens unter allen denkbaren Bedingungen, auch in Extremsituationen, hat allerhöchste Priorität für den Einsatz im täglichen Leben.

Mittels zerstörerischer Tests können wir die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilen. In unserem Sicherheitstestzentrum führen wir zerstörerische Tests an Zellen und kompletten Batteriesystemen durch.

Schwerpunkt unserer Arbeiten sind mechanische, thermische und elektrische Sicherheitsuntersuchungen. Die Prüfungen zur funktionalen Sicherheit erfolgen nach spezifischen Kundenvorgaben oder nach national und international anerkannten Prüfvorschriften. Hierfür stehen geeignete Testbunker mit Feuerlöschanlage, Gaswäsche, Videobeobachtung und High-Speed-Datenaufzeichnung zur Verfügung.

Elektrische Tests

Batteriesysteme werden zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Die Messaufgabe beinhaltet die Erfassung der physikalischen Größen Strom, Zeit, Temperatur und Spannung und die daraus berechneten Größen. Weitere Daten aus dem Batteriemanagementsystem (BMS) können wir über CAN- oder LIN Bus erfassen.

Mit unabhängigen Tests untersuchen wir, ob Batteriesysteme nicht nur alle Sicherheitsanforderungen erfüllen, sondern auch einer Vielzahl sehr anspruchsvoller Betriebsbedingungen im automobilen Umfeld gerecht werden.

Dr. Harry Döring
Fachgebietsleitung
Akkumulatoren

„IM BATTERIETESTZENTRUM ERFORSCHEN, TESTEN UND UNTERSUCHEN WIR BATTERIEN UND SYSTEME FLEXIBEL, NORMGERECHT UND INNOVATIV."

LEISTUNGSSPEKTRUM

Charakterisierung von Einzelzellen, Modulen und Batteriesystemen

- Tests zu Leistung, Kapazität, Lebensdauer und Sicherheit nach international anerkannten Prüfvorschriften und Kundenspezifikation
- Elektrische Batterietests in Temperaturkammern von –40 °C bis 80 °C bis zur Aufnahme eines PKW-Gesamtfahrzeuges
- Elektrische Batterietests auf automatisierten Prüfplätzen für Zellen (bis 20 V, mA bis 3 kA), Module (bis 100 V, bis 600 A), Batterie Packs (bis 1.000 V, bis 900 A)
- Beschleunigte Lebensdaueruntersuchungen, zyklisch und kalendarisch
- Post-Mortem-Analysen von allen Speichertechnologien
- Test und Bewertung von Superkondensatoren und neuen Speichertechnologien
- Verknüpfung elektrischer Tests mit Schock und Vibration

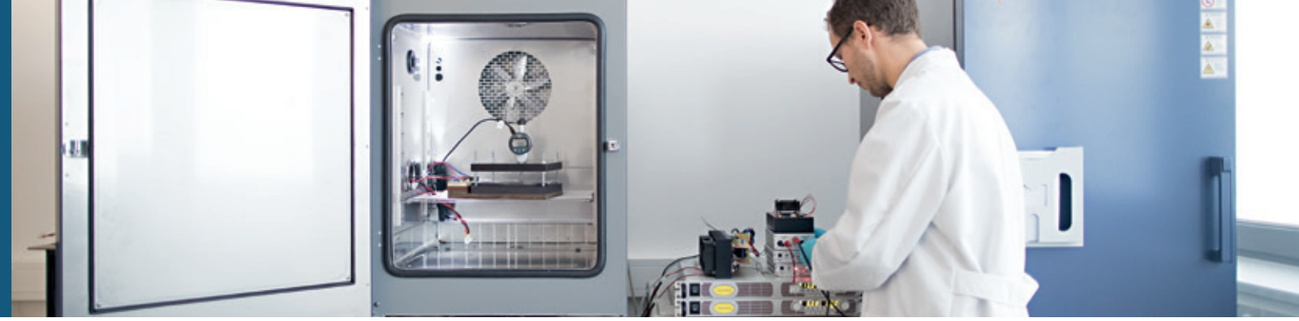
Thermische, elektrische und mechanische Sicherheitstests

- 100 Tonnen quasistatisches Quetschen (crush)
- Brandversuche und thermische Stabilitätstests
- Penetrationstests (Nagel, Blunt, Schraube etc.)
- Vibrations- und Schocktests
- Testbunker mit Infrastruktur (explosionsfest, Feuerlöscheinrichtung, Gaswäsche, Videoüberwachung, Messtechnik)
- Kurzschlusseinrichtung bis 15 kA, Hochvolttesteinrichtung bis 1.500 V/200 A und Hochstromtesteinrichtung bis 20 V/1.500 A
- Überwachung der Messungen per HD-Video, sowie Infrarot und Highspeed-Kamera
- Datenloggersystem für verschiedene Messgrößen bis 300 kHz

Temperaturkammer für elektrische Batterietests.

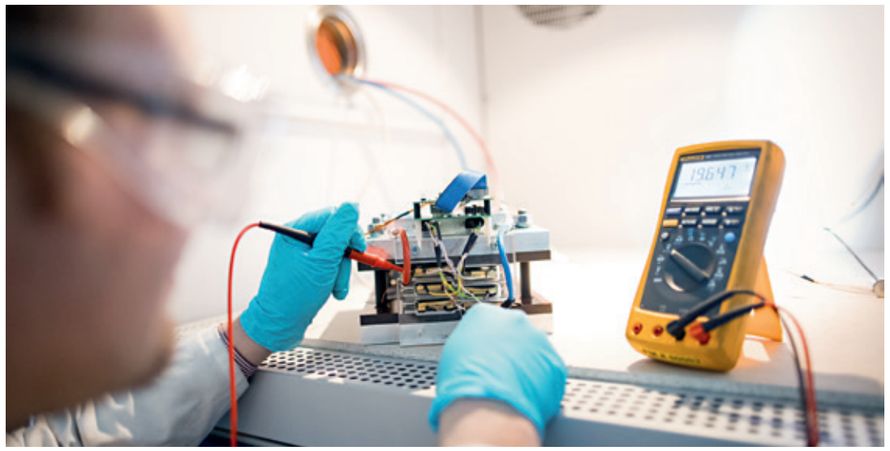
Ansprechpartner: Dr. Harry Döring | harry.doering@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-506

Systemtechnik, Modellierung und Simulation



Diagnose von Alterungseffekten und diagnoseunterstützte Schnellladeverfahren.

Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung und Simulation von Zellen und Batteriesystemen. Die Forschung spannt den Bogen von der Charakterisierung von Zellen über die Entwicklung von Batteriemodellen und Batteriemanagementsystemen bis hin zur Charakterisierung eines Speichers in seiner Einsatzumgebung.



Charakterisierungstests auf Modulebene und Entwicklung von Batteriemanagementsystemen.

Zelle

Die Zelle bildet die Grundeinheit eines jeden Batteriespeichers und wird daher detailliert und umfassend in ihrem elektrochemischen, elektrischen, thermischen und mechanischen Verhalten charakterisiert. Die Analyse erfolgt im Zeit- und Frequenzbereich (z. B. Pulsmessungen und elektrochemische Impedanzspektroskopie). Das entwickelte Verständnis über das kurzfristige dynamische Verhalten der Zelle und über die langfristigen Alterungserscheinungen wird in mathematische, parametrierte Modelle übersetzt und in entsprechende Simulationsumgebungen implementiert.

Zudem werden die erworbenen Kenntnisse über das Verhalten der Zelle für die Entwicklung von modellbasierten Algorithmen der Batteriezustandsschätzung, der Leistungs-, Energie- und Lebensdauerprognose sowie der Laderegelung genutzt.

Batteriemodul

Das Batteriemodul stellt einen Verbund von Einzelzellen dar und bildet zusammen mit einem Batteriemanagementsystem (BMS) eine funktionsfähige Einheit zur Speicherung von elektrischer Energie.

Die Arbeiten auf Modulebene legen ein besonderes Augenmerk auf das Streuverhalten der Zellen wie SOC oder Alterung in der Serien-Parallel-Verschaltung im Batterie Pack. Dieses Verhalten wird in entsprechenden Modellen abgebildet und die Auswirkung von Maßnahmen der Betriebsführung (z.B. Zellsymmetrierung) können untersucht werden. Für das BMS werden Algorithmen, Software und Elektronik zur Batterieüberwachung, zur Batteriezustandsschätzung, zur Diagnose und Prognose sowie zur Laderegelung entwickelt.

Die prototypischen, konstruktiven Arbeiten rund um ein Batteriemodul umfassen Modulkonstruktion, Zellverbinder, mechanische Verspannung, Sensorik und Kühlung. Sie dienen u. a. der Demonstration und Evaluation der Batteriemodelle (z. B. elektrische Verhaltensmodelle, Wärmeflussmodelle), der Batteriemanagementalgorithmen sowie Betriebs- und Kühlstrategien.

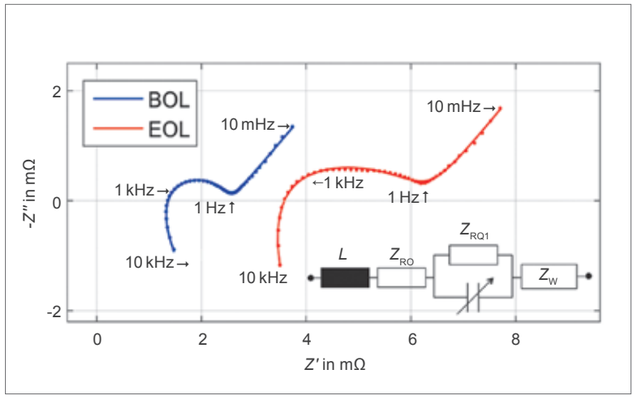
System

Batterien finden Einsatz in sehr unterschiedlichen Anwendungsumgebungen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an Leistung, Energie und Lebensdauer z. B. als Hybrid- oder Traktionsbatterie in einem Elektrofahrzeug oder als PV-Batteriespeicher in einem Gebäude. Die erste Aufgabe der Systemtechnik ist hierbei die modellbasierte Auslegung und Dimensionierung des Speichers für einen wirtschaftlichen und zuverlässigen Einsatz als elektrischer Energiespeicher. Hinsichtlich Steuerung, Regelung und Kommunikation muss das Batteriemanagementsystem in das Energiemanagement des Gesamtsystems eingebunden sein. Ziel der Batteriesystemtechnik ist die Entwicklung von optimalen und effizienten Betriebsführungsstrategien der Batterie in Wechselwirkung mit Leistungselektronik, Messtechnik (z. B. Smart Meter) und dynamischen Lasten sowie der sichere Betrieb über die gesamte Nutzungsdauer.

LEISTUNGSSPEKTRUM

Analyse, Modellierung und Management von Zellen, Modulen und Systemen

- Physikalisch-chemische Modellierung von Transportvorgängen und Überspannungsmodellen
- Elektro-chemische, elektro-thermische und elektro-mechanische Zellmodelle
- Dynamische, nichtlineare und adaptive Klemmenspannungsmodelle
- Wirkungsgrad- und Energieflussmodelle
- Alterungs- und Degradationsmodelle
- Optimierte Ladestrategien: Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer
- Batterie-Management-System: Algorithmen der Zustandsschätzung und Leistungsprognose
- Energiemanagement und optimale Betriebsführungsstrategien inkl. Kühlstrategien
- Batterietechnologiebewertung und -vergleich, Kostenanalysen
- Netzintegration und Netzdienlichkeit



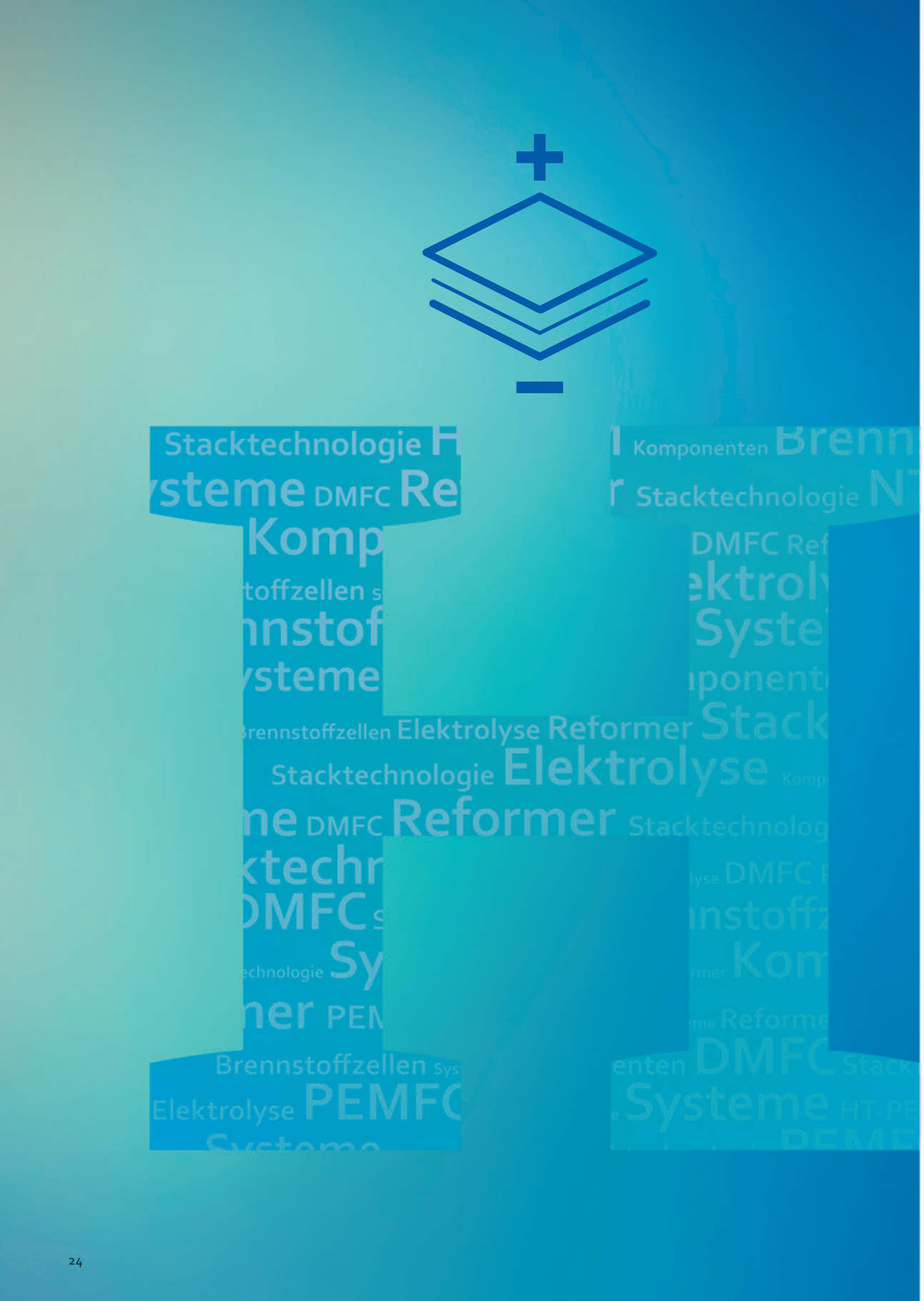
Modellierung der elektrochemischen Impedanzspektren einer Lithium-Ionen-Zelle zwischen Lebensbeginn (BOL) und Lebensende (EOL).

Ansprechpartner: Joaquin Klee Barillas | joaquin.klee-barillas@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-536

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler. Sie wandeln die chemische Energie eines Brennstoffes direkt mit hohem Wirkungsgrad und emissionsfrei in elektrischen Strom, nutzbare Wärme und Wasser. Wasserstoff (H_2) ist ein idealer Energieträger zur Speicherung von erneuerbaren Energien und wird der Kraftstoff für die Mobilität der Zukunft mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen.

Brennstoffzellen + Wasserstoff

2



Anwendungen, Expertise und Technologien

Anwendungen

Brennstoffzellen wandeln Brennstoffe wie Wasserstoff, Erdgas oder Methanol mit hohem Wirkungsgrad und emissionsfrei in Strom, Wärme und Wasser um. Das Anwendungsspektrum ist sehr vielseitig, vom E-Antrieb für PKW, Stadtbusse und Schiffe über die Strom- und Wärmeversorgung im häuslichen Keller bis hin zur Notstromversorgung. Wasserstoff (H_2) gilt als der sekundäre Energieträger der Zukunft: als sauberer Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge, als Chemierohstoff oder als chemischer Speicher für Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien. Für Letzteres erfolgt die Erzeugung von sauberem Wasserstoff über die Elektrolyse von Wasser.

Technologien

Aus einer Vielzahl von Brennstoffzellentechnologien hat sich die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) als die am vielfältigsten einsetzbare Variante herauskristallisiert. Forschungsschwerpunkte für alle Anwendungsfelder sind kostengünstige Materialien und Herstellverfahren, für Fahrzeuganwendungen sind es höhere Leistungsdichten und optimiertes Betriebsverhalten. Für Wasserstoff als Kraftstoff für Fahrzeuge ist die Sicherstellung der Qualität (Analyse von Verunreinigungen) unerlässlich. Für den Aufbau und zur Akzeptanz einer breiten H_2-Tankstellen-Infrastruktur ist die zuverlässige Messbarkeit der Wasserstoffbetankung mit Hochdrucksystemen (700 bar) ein wichtiges Erfolgskriterium. Bei der Wasserelektrolyse hat sowohl die klassische Technologie mit alkalischem Elektrolyt als auch das Verfahren mit Polymermembran als Elektrolyt hohes Zukunftspotenzial. Bei Letzterem steht die Entwicklung von kostengünstigen Katalysatoren und Elektroden im Vordergrund. Bei der alkalischen Elektrolyse können durch die Optimierung von Elektroden und Zelldesign Wirkungsgrad und Leistungsdichte noch deutlich gesteigert werden.

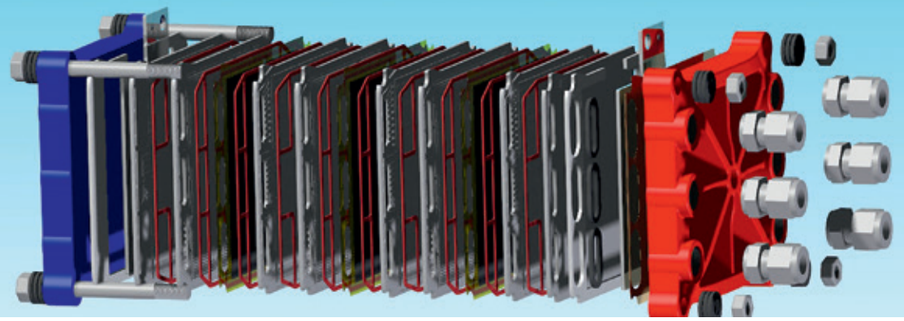
Expertise

Das ZSW mit seiner fast 30-jährigen Erfahrung mit Brennstoffzellen gilt als richtungsweisend in der anwendungsnahen Forschung. Von den Komponenten über die Fertigung von Prototypen von Stacks und kompletten Systemen bis zum Testprogramm bringen wir die fundierte Expertise für industrienahe Forschung mit. Weiterer Fokus liegt auf dem Thema Wasserstoff als Kraftstoff. Mit dem Know-how aus der Materialforschung für Batterien und Brennstoffzellen verfügen wir auch über ideale Voraussetzungen zur Entwicklung von fortschrittlichen Elektrolysetechnologien, beispielsweise von neuen Elektroden-Mikrostrukturen, basierend auf Nanomaterialien.

Brennstoffzellen + Wasserstoff

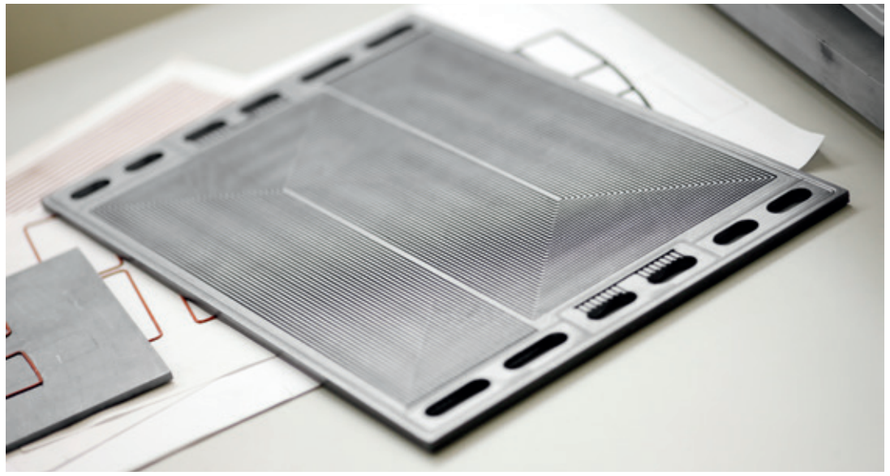
Wasserstoff + Brennstoffzelle

Brennstoffzellen-Komponenten



Explosionszeichnung eines ZSW-Brennstoffzellen-Stacks mit 100 cm² Aktivfläche.

Für die erfolgreiche Etablierung von Brennstoffzellen am Markt ist eine ganze Reihe wichtiger Eigenschaften von Bedeutung: höchste Leistungsdichten, gute Kaltstarteigenschaften und eine lange Lebensdauer, auch bei hochdynamischem Betrieb. Dafür müssen kostengünstige Bauteile entwickelt, aufeinander abgestimmt und in ihrer Funktion optimiert werden.



Bipolarplatte mit optimierter Gasverteilerstruktur.

Entwicklung von Komponenten für Brennstoffzellen

Im Fokus der Aktivitäten am ZSW stehen seit vielen Jahren Entwicklungen zur Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen-Technologie (PEMFC) mit all ihren Bauteilen und deren Zusammenwirkung. Weitere Schwerpunkte liegen auf Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC), Hochtemperaturmembran-Brennstoffzellen (HT-PEMFC) sowie Brennstoffzellen mit alternativen Membran- (z. B. AEMFC) und Elektrodenmaterialien, die z. B. Pt-freie Katalysatoren ermöglichen.

In enger Kooperation mit Komponenten-Herstellern optimieren wir neue Funktionsmaterialien für Membranen (MEAs), Gasdiffusionslagen (GDLs), Katalysatoren, Elektroden und Bipolarplatten in Bezug auf Leistung, Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Zu unseren Kernkompetenzen gehört neben einem tiefen Verständnis von Wassertransportvorgängen in allen Bereichen und Strukturen der Zelle auch das Wissen um das Zusammenspiel von Material, Design und Betriebsstrategie.

Methoden zur Charakterisierung von Komponenten

Zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten werden kundenspezifische Spezialtests durchgeführt. Hierfür bilden ZSW-Standard-Zellen in Verbindung mit einer ausgefeilten Prüfstandstechnik die zentralen Elemente. Hinzu kommen speziell entwickelte Methoden wie die ortsaufgelöste Stromdichtemessung und die elektrochemische Charakterisierung mittels Impedanzspektroskopie und Zyklovoltammetrie.

Zur mechanischen Prüfung von Komponenten kommen Techniken wie Biegefestigkeits- und Kompressionstests (z. B. für Gasdiffusionslagen) zum Einsatz. Die Vermessung von Gasverteilerstrukturen erfolgt über optische Verfahren (z. B. Weißlichtinterferometer), während zur Bestimmung der Mikrostrukturen von Gasdiffusionslagen die 3-D-Röntgen-Mikrocomputertomografie (Mikro-CT) zur Verfügung steht. Für die Analyse der Wassertransportvorgänge im Zellinnern sind Röntgen- und Synchrotron-Tomografie die idealen Instrumente. Hinzu kommen die verschiedenen Methoden der Kontaktwinkelmessung und Porenanalyse sowie zur Charakterisierung von Elektroden.

Zur Post-Mortem-Analyse steht das ganze Spektrum der klassischen Analytik, beispielsweise die Elektronenmikroskopie (REM) oder XRD-Untersuchungen, zur Verfügung.

Dr. Joachim Scholta
Fachgebietsleitung
Brennstoffzellen-Stacks

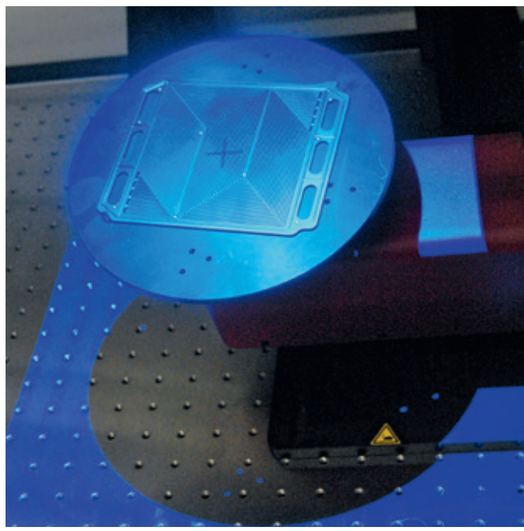
LEISTUNGSSPEKTRUM

Elektrisch-chemische Charakterisierung in Standardzellen
- Impedanzspektroskopie und Zyklovoltammetrie
- Ortsaufgelöste Stromdichte-Messung

Mechanische und elektrische Charakterisierung
- Röntgen-Mikrocomputertomografie
- Zug-Druck-Prüfmaschine, Biegesteifigkeit und Kompressibilität
- Geometrieprüfungen und CAD-Matching (Weißlichtinterferometer und Röntgen-µ-Computertomografie)

Untersuchung Wasserhaushalt
- In-situ mittels Röntgenstrahlen mit Synchrotron oder µ-Computertomografie sowie Ex-situ-Untersuchungen (Leverett-Funktion)
- Kontaktwinkelmessungen: Tropfenkontur, Flüssig-Sorptionsmessungen, inverse Gas-Chromatografie
- Hydrohead, Bubble Point, Wasserdampfsorption

Schadens- und Post-Mortem-Analysen
- Umfangreiches Methodenspektrum zur Analytik



Vermessung der Gasverteilerstrukturen mittels Weißlichtinterferometer.

Ansprechpartner: Dr. Joachim Scholta | joachim.scholta@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-206

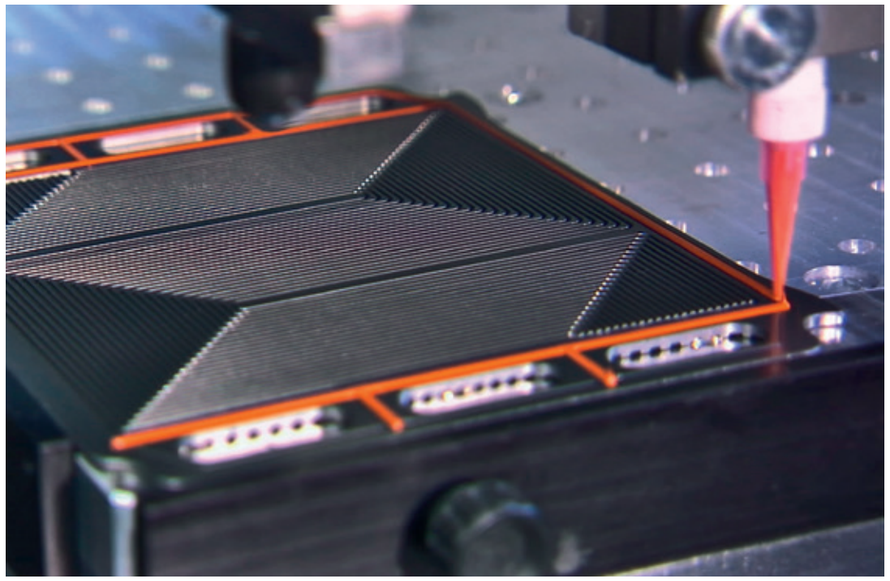
Wasserstoff + Brennstoffzelle

Design und Fertigungs-technologien

Brennstoffzellen-Endplatte mit Medien- und Stromanschluss.

Hochleistungsbrennstoffzellen, wie sie beispielsweise in E-Fahrzeugen zum Einsatz kommen, sind extrem komplexe Konstruktionen. Hunderte von Einzelzellen, jeweils bestehend aus 20 Mikrometer dünnen und im Betrieb aufquellenden Membranen müssen mit 1 Millimeter feinen Bipolarplatten mit filigranen Gasverteilstrukturen und den Gasdiffusionslagen aus komprimierbarem, porösen Kohlefaservlies hochpräzise aufeinander abgestimmt und zu einem Stack zusammengefügt werden.

„WIR OPTIMIEREN BRENNSTOFFZELLEN MIT ALL IHREN KOMPONENTEN IN BEZUG AUF LEBENSDAUER, LEISTUNG UND DYNAMIK."



Automatisiertes Auftragen von Dichtungen mit Dispenser.

Konstruktion – Design – Prototypen

Das ZSW beschäftigt sich seit rund 30 Jahren mit Konstruktion und Design sowie dem Bau von Brennstoffzellen-Stacks im Leistungsbereich von 50 W bis 100 kW. Dieses tiefe, fachübergreifende Know-how bildet die Basis zur Entwicklung erfolgreicher Stack-Designs und Prototypen. Eine Vielzahl anwendungsspezifischer ZSW-Designs spiegelt dies wider. Unsere Prototypen im ZSW-Design unterscheiden sich neben der aktiven Fläche pro Zelle auch hinsichtlich der Bipolarplatten-Konzeption, des Druckabfalls sowie des Betriebstemperaturbereichs.

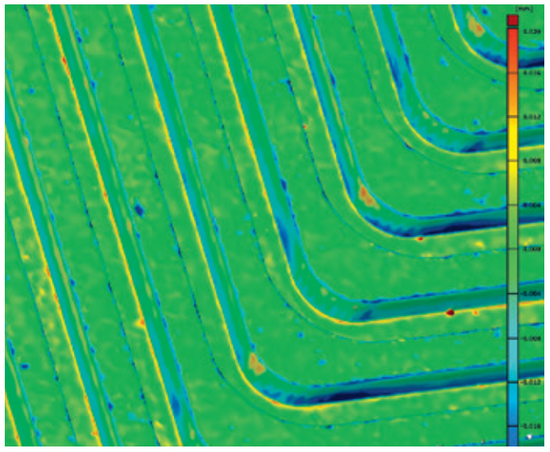
Wussten Sie schon?

Am ZSW wurden in den letzten Jahren schon über 1.000 Brennstoffzellen-Stacks in vielen Leistungsklassen und für ein breites Anwendungsspektrum hergestellt.

In jedem Fall weisen alle ZSW-Stacks eine hohe spezifische Leistung auf und sind innerhalb der vorgesehenen Betriebsbereiche sicher und zuverlässig betreibbar. Im Bedarfsfall können auch Anpassungen an spezielle kundenseitige Anforderungen durchgeführt werden. Zur Entwicklung von Brennstoffzellen-Stacks nach Kundenanforderung verfügen unsere hochqualifizierten Expertenteams über umfassende Erfahrung mit CAD-Konstruktion, konstruktionsbegleitender Modellierung (CFD, FEM), Fertigungstechnologien und dem Test von Brennstoffzellen.

Fertigungstechnologien

Zur Herstellung von Brennstoffzellen-Stacks mit Leistungen bis zu 100 kW stehen am ZSW modernste Fertigungstechnologien und Experten mit umfangreichem Know-how zur Verfügung. Viele Jahre Erfahrung und der Bau von insgesamt mehr als 1.000 Stacks belegen dies. Exemplarische Themen sind Fügetechniken und Herstellprozesse für Zellen sowie die roboterunterstützte Stackmontage und -prüfung. Des Weiteren wurden schon frühzeitig die Themen zur Qualitätssicherung sowie zur stückzahlangepassten Automatisierung der Stack-Montage aufgegriffen und an eigenen Stack-Designs erprobt. Durch diese Arbeiten kann ein beträchtliches Know-how bezüglich der automatisierten Handhabung von Bauteilen, der Applikation von Dichtungen sowie des Fügens und Stapelns von Zellen angeboten werden.



Qualitätskontrolle von Bipolarplatten. Abgleich derCAD-Daten mit den gemessenen 3-D-Daten.

LEISTUNGSSPEKTRUM

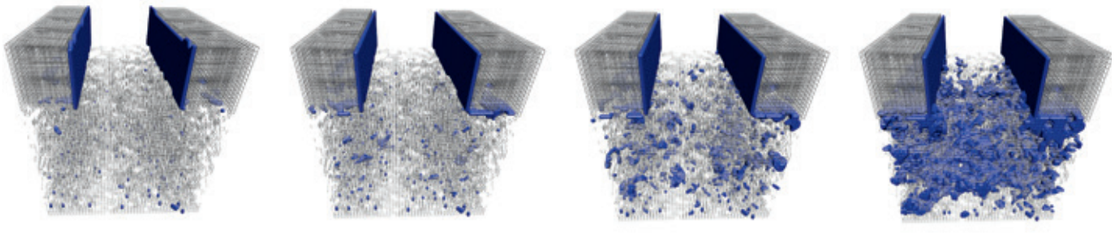
- Dichtungs- und Klebetechnik
- Roboterunterstützte Stackmontage
- Prototypen mit unterschiedlichen Bipolarplattenkonzepten, Druckabfall und Betriebstemperaturbereich
- Aktivflächen von 50 bis 560 cm² (kundenspezifische Anpassungen möglich)
- Umfassende Prüftechnik

Ansprechpartner: Frank Häußler | frank.haeussler@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-790

Modellierung und Simulation

Ex-situ-Charakterisierung von porösen Brennstoffzellen-Komponenten mit Mikro-Computertomografie (µ-CT).

Mathematische Modelle ermöglichen den Einblick in die physikalischen und chemischen Vorgänge innerhalb der Brennstoffzelle und liefern die Basis für die Entwicklung und Etablierung völlig neuer technologischer Ansätze. Sie stellen eine wichtige Säule innerhalb der Brennstoffzellenforschung und -entwicklung bis hin zur Systemoptimierung dar. Die computergestützte Simulation hilft, Entwicklungszeit und -kosten durch zielgerichtete Optimierung zu reduzieren, und führt zum Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse in der Brennstoffzelle.



Auswirkung von unterschiedlichen PTFE-Anteilen auf die Wasserverteilung in der GDL mittels Monte-Carlo-Simulation.

Modellierungen von Brennstoffzellen-Komponenten, Stacks und Systemen

Im ZSW werden konstruktionsbegleitende sowie elektrochemische Modellierungen von Brennstoffzellen-Komponenten, -Stacks und -Systemen mit kommerziellen und mit „Inhouse"-Simulationsmethoden durchgeführt. Die entscheidenden Verifikationen der Simulationsergebnisse erfolgen mit aussagekräftiger Hardware und in realitätsnahen Experimenten. Der Untersuchungsbereich erstreckt sich von mikroskopischen Vorgängen wie der Wasserverteilung in Gasdiffusionslagen über makroskopische Vorgänge bis zur Auslegung von kompletten Systemen.

Bestimmung der Wasserverteilung in Gasdiffusionslagen

Komplementär zur experimentellen Bestimmung der Wasserverteilung in der Gasdiffusionslage (GDL) werden am ZSW verschiedene Modellierungstechniken verwendet und weiterentwickelt. Neben makroskopischen Ansätzen (Computational Fluid Dynamics, CFD) können auch ortsaufgelöste Modellierungen der zu erwartenden Wasserverteilung innerhalb einer GDL durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Betriebsbedingungen der Zelle und zur Abbildung der Struktur- und Benetzungseigenschaften der Materialien wird ein speziell entwickeltes, auf Monte-Carlo-Methoden (MC) basierendes Modell verwendet, welches in einem kontinuierlich gepflegten und weiterentwickelten „Inhouse"-Simulationscode zur Verfügung steht. Das MC-Modell kann auf Kundenwunsch flexibel erweitert werden.

Modellierungen von Zellen und Stacks

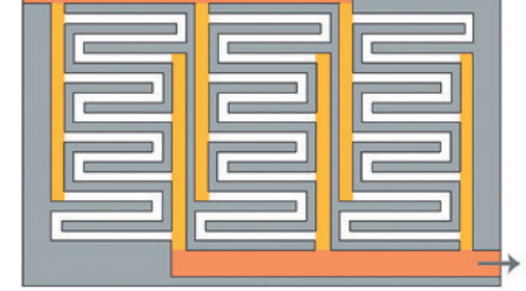
Unter bevorzugtem Einsatz der Modellierungssoftware Fluent™ und AVL FIRE™ können praktisch alle Themen im Bereich des Zell- und Stack-Designs abgedeckt werden. Dies umfasst beispielsweise die Ermittlung und Optimierung lokaler Medienkonzentrationsverteilungen und Stromdichten bei der Entwicklung neuer Zelldesigns. In erweiterten Ansätzen können auch lokale GDL-Effekte oder 2-Phasen-Strömungen in den Kanälen (Volume-of-Fluid, VOF) untersucht werden. Existierende Designs können mittels CFD-Modellierung (Computational Fluid-Dynamics) untersucht und optimiert werden. Der Einsatz von CFD im Rahmen der Brennstoffzellenentwicklung wurde am ZSW weit entwickelt und umfasst praktisch alle Fragestellungen von der Dimensionierung der Medienverteilerkanäle in der Bipolarplatte bis zur Auslegung ganzer Brennstoffzellen-Stacks.

Numerische Simulation zur Stack-Konstruktion (FEM)

Mit numerischen Simulationstechniken (FEM = Finite-Elemente-Methode) können Brennstoffzellenkomponenten hinsichtlich Gewicht und Volumen schon bei der Konstruktion, insbesondere im Bereich der Stack-Verspannung, optimal ausgelegt werden. Des Weiteren können funktionale Komponenten wie Bipolarplatten bereits vorab auf die im Brennstoffzellenbetrieb erwartbaren Belastungen untersucht werden und entsprechend Abmessungen, Gewicht und Zuverlässigkeit optimiert werden.

Simulation von Betriebsverhalten und Systemsimulation

Das ZSW verfügt über Modellierungstechniken für Brennstoffzellensysteme, die einen herausragenden Ansatz zur Systemoptimierung und -vereinfachung liefern. Im Hinblick auf stationäre und instationäre Systemzustände können modellmäßige Vorhersagen ermittelt und damit in iterativen Prozessen ein optimiertes System entwickelt und aufgebaut werden. Für stationäre Systemzustände sind Simulationen mit „IPSEpro" eine zuverlässige Methode, während die Simulation der Dynamik von Brennstoffzellen-Systemen bevorzugt mit der Software „MATLAB®-Simulink" erfolgt.



Beispiel einer CFD-Simulation von Gasverteiler-Strukturen.

LEISTUNGSSPEKTRUM

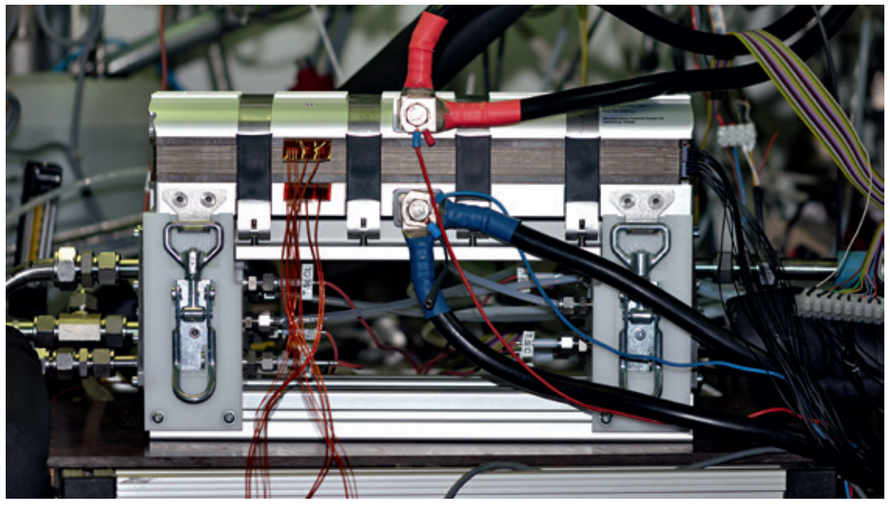
- Simulation von Brennstoffzellen-Flowfields und -Komponenten, einschließlich Mehrphasen-Betrachtungen (CFD, Monte Carlo (MC))
- Beschreibung von Brennstoffzellen mit mathematischen Modellen
- Analyse von Komponenten und Baugruppen mit CFD und FEM
- Modellierung von Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Stromdichteverteilung, Wasserhaushalt, Temperaturverteilung und Druckabfall
- Quantenmechanische Simulationen von Elementarprozessen
- Stack-Systemsimulation zur Darstellung kompletter Anlagen
- Auslegung von Gasverteiler-Strukturen unter Berücksichtigung des Stofftransports in den porösen Strukturen und der Elektrochemie

Ansprechpartner: Dr. Florian Wilhelm | florian.wilhelm@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-203

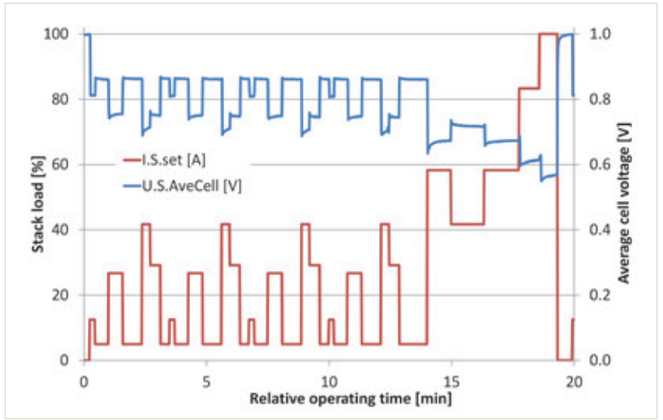
Wasserstoff + Brennstoffzelle

Brennstoffzellen-Testzentrum

Mit der weltweit laufenden Markteinführung von Brennstoffzellen für Mobilität und für stationäre Anwendungen steigt auch die Nachfrage nach unabhängigen Testeinrichtungen. Das ZSW betreibt seit über 20 Jahren ein Brennstoffzellentestfeld, welches kontinuierlich ausgebaut und mit rund 25 vollautomatisierten Testständen heute eines der weltweit größten unabhängigen Testfelder für Brennstoffzellen-Stacks bis 120 kW_{el} Leistung ist.



Kurzstapel einer Hochleistungs-Brennstoffzelle für Fahrzeuge im Teststand.



Am ZSW entwickelter, harmonisierter Prüfzyklus zur Lebensdauer-Untersuchung von Brennstoffzellen (Fuel Cell Dynamic Load Cycle, FC-DLC).

Dr. Alexander Kabza
Fachgebietsleitung
Brennstoffzellen-Systeme

„UNSERE FUNDIERTEN AUSWERTUNGEN HELFEN, PRODUKTE WEITERZUENTWICKELN. BEI BEDARF WERDEN DIE TESTS DURCH BEGLEITENDE SIMULATIONEN ODER DURCH IN-SITU-ANALYSEN UNTERSTÜTZT."

Wussten Sie schon?

2015 konnte einer fahrzeugtauglichen 100-Kilowatt-Brennstoffzelle eine wöchentliche Fahrleistung von über 5.600 Kilometer nachgewiesen werden. Der Dauertest erfolgte in einem harmonisierten, dynamischen Prüfzyklus und lieferte auch wichtige Informationen über die Leistung und das Alterungsverhalten des Brennstoffzellen-Stacks. Der Wasserstoffverbrauch unter Vollbelastung lag dabei bei 7,8 Kilogramm pro Stunde – dies entspricht 1.450 Normalliter pro Minute. Dieser Wert zeigt die Leistungsfähigkeit des ZSW-Brennstoffzellen-Testzentrums.

Testkompetenz

Im Testzentrum am ZSW können Brennstoffzellenmodule mit Wasserstoff oder Wasserstoffgemischen von 100 W bis 100 kW_{el} auf ihre Leistungsfähigkeit getestet werden. Weitere Arbeiten umfassen die professionelle, zuverlässige und belastbare Untersuchung und Charakterisierung von Brennstoffzellen, -stacks und -systemen. Zur Verfügung stehen derzeit 25 Teststände, an denen rund um die Uhr Dauertests durchgeführt werden können. Es besteht auch die Möglichkeit, Tests nach vorgegebenen Verfahren wie beispielsweise der DIN IEC 62282-2 unter Einbeziehung einer „Zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS)" durchzuführen.

Parallel zu den Tests erfolgen qualifizierte Testanalysen und die Identifikation von Optimierungsparametern. Da die Interpretation der Testergebnisse inzwischen ein sehr tiefgehendes Verständnis des Zusammenspiels von Materialien und Komponenten in den Zellen erfordert, werden die Tests durch eine Vielzahl von Analysegeräten und -methoden und durch testbegleitende Simulationen ergänzt.

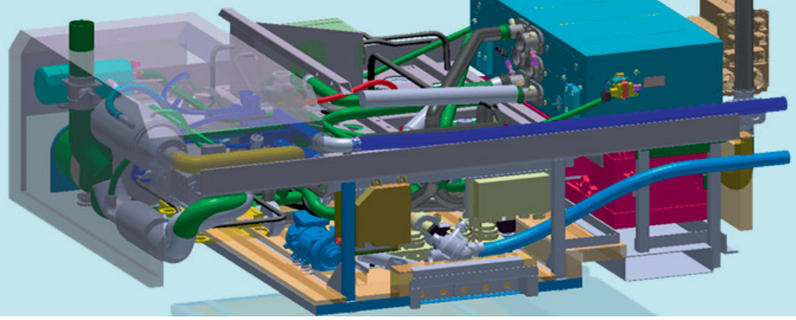
Im Fokus von Brennstoffzellen im Straßenverkehr steht beispielsweise das elektrische Verhalten der Brennstoffzelle unter hoch dynamischen Belastungszuständen, wie sie im täglichen Fahrzyklus auftreten können.

LEISTUNGSSPEKTRUM

- Leistungsbereich von wenigen Watt bis 160 kW (Full Size Automotive Stacks und Systeme)
- Hohe Flexibilität der Teststände durch ein eigenes Steuerprogramm und eigene Werkstätten
- Kalibrierung der Teststände vor oder auch während eines Tests
- Vollautomatisierte Rund-um-die-Uhr-Tests
- Das komplette Testprogramm der DIN IEC 62282-2
- Beschleunigte Alterungstests auch nach DoE
- Schadgasuntersuchungen
- Breites Spektrum zur Reaktandenversorgung

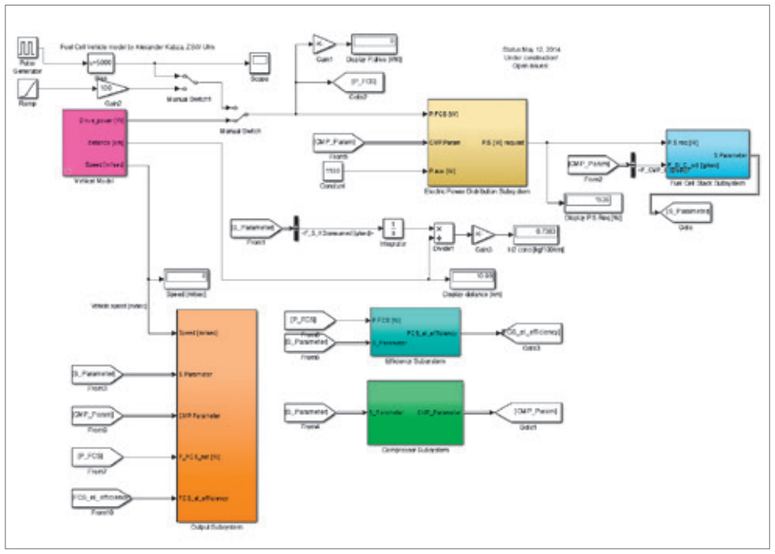
Ansprechpartner: Dr. Alexander Kabza | alexander.kabza@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-832

Systeme und Reformer



CAD-Konstruktion eines Brennstoffzellen-Systems für Busse.

Brennstoffzellen benötigen für den Betrieb eine Reihe von Systemkomponenten wie Luftverdichter, Wasserstoff-Rezirkulation, Befeuchter und Kühlkreislauf. Bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Brenngas sind dazu noch Reformer zu deren Umwandlung in Wasserstoff notwendig. All diese Komponenten sind für einen effizienten und fehlerfreien Betrieb von Brennstoffzellen entscheidend. Sie unterscheiden sich auch ganz wesentlich für die jeweilige Anwendung: im Antriebsstrang von Fahrzeugen, in der Hausenergieversorgung (KWK-Anlagen), bei netzunabhängigen Stromversorgungen oder bei Batterieladegeräten (Range Extender).



Simulation eines Brennstoffzellen-Systems mittels MATLAB®-Simulink®.

Systementwicklung und Systemoptimierung

Das ZSW entwickelt Brennstoffzellen-Systeme für die verschiedensten Anwendungen, von der Systemplanung, über die simulationsunterstützte Systemauslegung bis zum Aufbau von Prototypen und deren Charakterisierung und Qualifizierung. Der Leistungsbereich der Systeme reicht von wenigen Watt bis 100 kW. Der Einsatzbereich umfasst methanol- oder alkoholbetriebene, netzunabhängige Stromversorgungen bis zu Hausenergieversorgungsanlagen mit vorgeschalteter Brennstoffreformierung, H_2/O_2-Systeme für maritime und Luftfahrtanwendungen, Bordstromversorgungen und Antriebssysteme von Nutzfahrzeugen.

Zusätzlich unterstützt das ZSW Industriepartner mit der Erprobung und Qualifizierung von Systemkomponenten, mit Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Hardware-in-the-Loop-Tests (HIL) bei der Produktzertifizierung.

Für Brennstoffzellensysteme verfügt das ZSW über Modellierungstechniken, die einen herausragenden Ansatz zur Systemoptimierung und -vereinfachung liefern. Wir können im Hinblick auf stationäre und instationäre Systemzustände modellmäßige Vorhersagen ermitteln und damit in iterativen Prozessen ein optimiertes System entwickeln und mit dem Kunden aufbauen.

Reformer für flüssige Brennstoffe

Wasserstoff ist der ideale Brennstoff für Brennstoffzellen: Er kann direkt und mit hohem Wirkungsrad in Strom umgewandelt und einfach aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Für Fahrzeuge in Verbindung mit Hochdruckspeichern ist das der ideale Kraftstoff.

In vielen anderen Anwendungen sind flüssige Brennstoffe wie Methanol oder Ethanol aufgrund ihres hohen Energieinhaltes und der einfachen Speicherung interessant. Sie können über einen chemischen Prozess (Reformierung mit anschließender Edukt-Aufbereitung) in ein wasserstoffreiches Gas umgewandelt werden, das als Brennstoff für Brennstoffzellen geeignet ist. Auch Erdgas und Flüssiggas sind kostengünstig flächendeckend erhältlich und können über einen ähnlichen Reformierungsprozess in für Brennstoffzellen geeignetes wasserstoffreiches Gas transformiert werden.

Das ZSW entwickelt hochkompakte Reformersysteme für Methanol und baut integrierte Reformer-Brennstoffzellen-Systeme für Methanol, Ethanol, Erdgas und weitere Brennstoffe. Zu den typischen Entwicklungsarbeiten gehören die Systemplanung, die simulationsunterstützte Systemauslegung und der Aufbau und die Charakterisierung von Prototypen.

LEISTUNGSSPEKTRUM

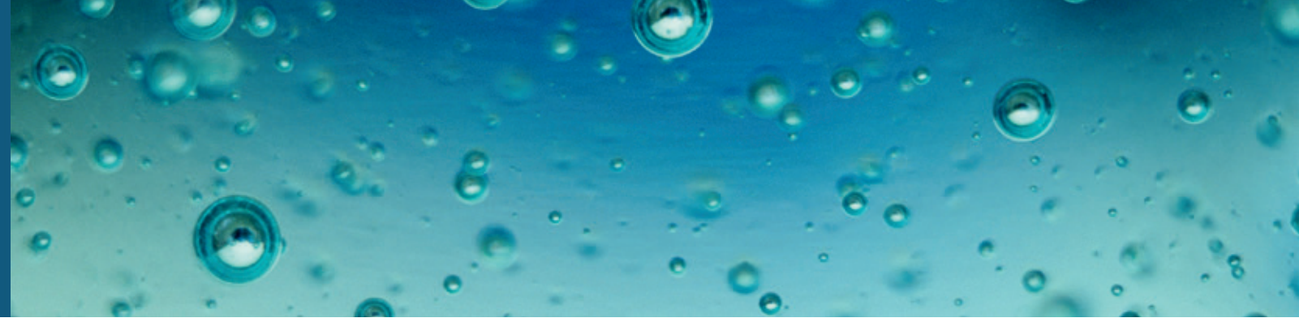
Systeme

- Auslegung, Entwicklung und Bau von Reformer- und Brennstoffzellensystemen für alle Anwendungsbereiche
- Entwicklung Systemkomponenten inkl. Hardware-in-the-Loop-Tests
- Systemsimulationen und Betriebsstrategien
- Systemanalysen und Systemerprobung
- Hochintegrierte Komponenten für die Reformierung von Methanol sowie die Aufbereitung der Produkte zu brennstoffzellentauglichem Brenngas.
- Bau und Entwicklung netzunabhängiger Brennstoffzellen-Stromversorgungssysteme und -Batterieladegräte mit integrierten Reformern für Methanol und Ethanol
- Brennstoffzellen-Hausenergieversorgungssysteme mit integrierten Reformern (KWK-Systeme) für Erdgas

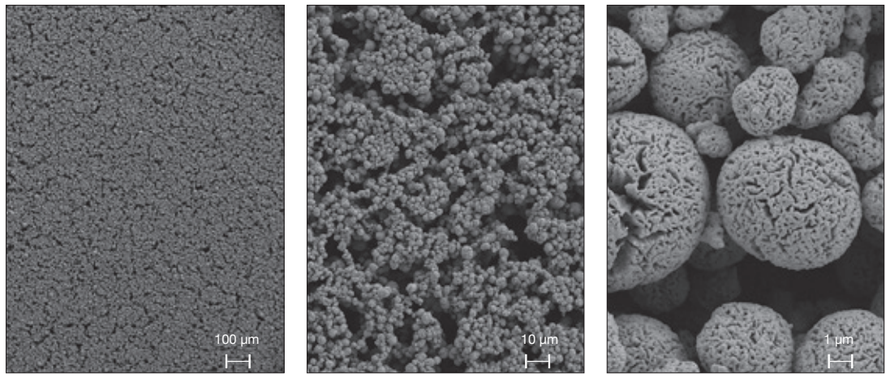
Airport-Scooter mit PEM-Brennstoffzelle.

Ansprechpartner: Günther Schlumberger | guenther.schlumberger@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-834

Neue Elektrolyse-Technologien



Heutzutage wird Wasserstoff (H_2) in industriellem Maßstab überwiegend aus Erdgas oder anderen fossilen Rohstoffen hergestellt und dient der chemischen Industrie als Rohstoff. Wird Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt, kann er als kohlenstofffreier sekundärer Energieträger als Kraftstoff im Verkehrssektor einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus stark fluktuierenden Photovoltaik- und Windenergieanlagen stellt die ideale Technologie hierfür dar. Für diese Anwendung gibt es im Hinblick auf Kosten, Effizienz und Stabilität unter stark fluktuierendem Betrieb noch erhebliche Optimierungspotenziale.



REM-Aufnahme von oberflächenreichen Nickelelektroden. Beschichtung von nanostrukturierten Nickelpartikeln auf Nickelfolie.

Wussten Sie schon?

Das im September 2016 verabschiedete Regierungsprogramm „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie 2016 – 2026" sieht in der Entwicklung kostengünstiger und marktfähiger Elektrolyseure einen Schwerpunkt. Ziel ist hierbei die Absicherung dieses Technologiepfades im Hinblick auf seinen Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrs sowie das Schaffen der Voraussetzungen für einen hohen deutschen und europäischen Wertschöpfungsanteil in diesem global sehr dynamischen Industriezweig.

Elektrolyseverfahren

Mit zunehmender Verfügbarkeit von überschüssigem regenerativ erzeugtem Strom wird die elektrolytische Zersetzung von Wasser zu einer interessanten Option der Wasserstofferzeugung. Hierzu existieren drei Verfahrensprinzipien, die sich durch die Wahl des Elektrolyten unterscheiden.

Bei der sogenannten alkalischen Elektrolyse wird Kalilauge als Elektrolyte eingesetzt. Alkalische Elektrolyseure haben ihre Einsatzfähigkeit und Robustheit über viele Jahrzehnte demonstriert. Die Elektroden kommen ohne den Einsatz teurer Edelmetalle aus. Jedoch sind die erzielbaren Stromdichten begrenzt. Bei PEM-Elektrolyseuren werden ähnlich wie bei PEM-Brennstoffzellen saure Polymerelektrolytmembranen als Elektrolyten eingesetzt. Aus diesem Grund erfordern sie den Einsatz von Edelmetallkatalysatoren. Mit PEM-Elektrolyseuren sind grundsätzlich sehr hohe Stromdichten erzielbar. Alkalische und PEM-Elektrolyseure werden heute in Demonstrationsprojekten im Lastwechselbetrieb in direkter Kopplung mit Strom aus Solar- bzw. Windenergie eingesetzt.

Die dritte Elektrolyseur-Technologie setzt einen keramischen Elektrolyten bei hohen Temperaturen ein. Dies ermöglicht grundsätzlich eine erhebliche Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie, erfordert jedoch eine Wärmequelle bei hohen Temperaturen.

Unser Team beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Elektrodenmikrostrukturen für die alkalische und die PEM-Elektrolyse. Auf Basis der am ZSW verfügbaren Expertise zur Herstellung und Formgebung von Katalysatoren variieren wir die Zusammensetzung, Morphologie und Mikrostruktur katalytisch aktiver Materialien und verarbeiten diese in innovative Elektrodenstrukturen.

Dr. Ludwig Jörissen
Fachgebietsleitung
Brennstoffzellen Grundlagen

„UNSER TEAM VERFÜGT ÜBER LANGJÄHRIGE ERFAHRUNG UND DIE ENTSPRECHENDE INFRASTRUKTUR, UM NEUE TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE IM LABORMASSSTAB SCHNELL ZU VERIFIZIEREN UND DEMONSTRIEREN."

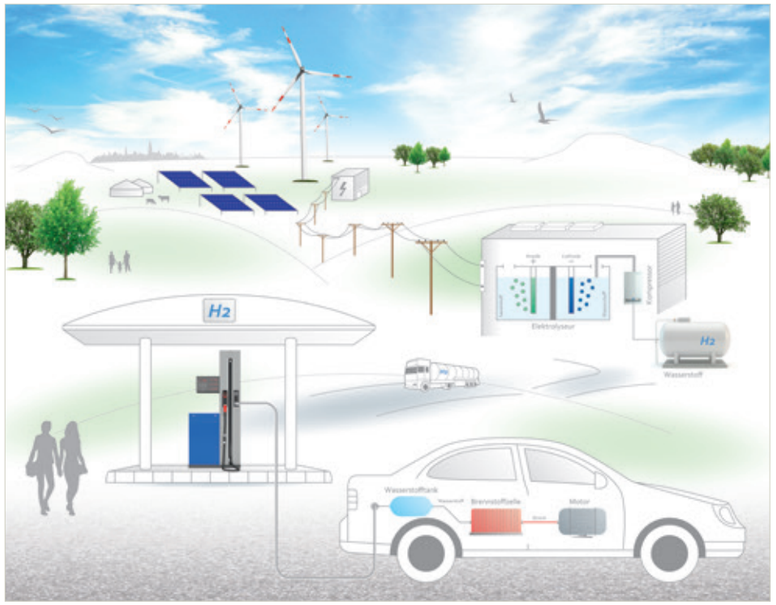
Alkalische Elektrolyse bei Atmosphärendruck mit Laborzelle.

Ansprechpartner: Dr. Ludwig Jörissen | ludwig.joerissen@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-605

Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff-Tankstelle am ZSW in Ulm.

Voraussetzung für die Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist der begleitende Aufbau eines Netzes von Wasserstoffstationen (H_2-Tankstellen) sowie von Anlagen zur Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff. Entscheidend ist hierfür die Qualität des Wasserstoffs (H_2) im Hinblick auf Verunreinigungen sowie die Reproduzierbarkeit des Betankungsvorgangs.



Sauber tanken – so wird aus erneuerbaren Energien sauberer Kraftstoff (H_2) für die Elektromobilität.

Wussten Sie schon?

... dass Brennstoffzellenfahrzeuge in drei Minuten betankt werden und dann eine Reichweite von 500 km haben?
... dass 400 Wasserstoff-Tankstellen bis 2023 in Deutschland gebaut werden?
... dass bereits heute schon viele Wasserstoff-Tankstellen zur Verfügung stehen?

https://cleanenergypartnership.de/kundenbereich/h2-tankstellen/

Das ZSW ist mit seiner langjährigen Erfahrung in der Brennstoffzellentechnik und damit in der Nutzung von Wasserstoff durch mehrere Projekte in den Aufbau einer europäischen Wasserstoff-Infrastruktur eingebunden. Gegenstand aktueller Untersuchungen sind Fragestellungen vor allem zur Betankung und zur Einhaltung der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoffqualität. Aktueller Standard ist eine Betankung mit 70 MPa Wasserstoffdruck nach SAE J2601 und einer Wasserstoffqualität nach SAE J2719/ISO14687-2.

Bestimmung der Qualität von Wasserstoffproben

Bei der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff können Verunreinigungen, beispielsweise durch Kohlenmonoxid, auftreten. Diese können die Leistung und Lebensdauer von Brennstoffzellen beeinträchtigen. Die Analyse der Proben am ZSW deckt einen Großteil der ISO 14687-2 ab.

Schwerpunkt der Untersuchungen im ZSW ist die Überwachung, Abnahme und Optimierung der Betankungsqualität von Wasserstoffstationen gemäß SAE-Richtlinie durch ein Probenentnahme-Abnahmesystem. Die Analyse der entnommenen Gasproben ermöglicht die Untersuchung von Fragestellungen zur Wasserstoffqualität im Anlieferzustand sowie bei der Entnahme und Abgabe an den Fahrzeugantrieb. Dazu ist neben der Spurenanalytik auch ein Konzept zur schnellen und einfachen Online-Bewertung der Wasserstoffqualität hinsichtlich Brennstoffzellentauglichkeit Schwerpunkt der Untersuchungen.

Abnahme von Wasserstofftankstellen nach CEP-Richtlinien

Wasserstofftankstellen müssen vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und danach regelmäßig hinsichtlich H_2-Qualität und korrekter Mengenangaben (Eichung) überprüft werden. Das ZSW verfügt über eigens entwickelte und amtlich zugelassene Geräte zur Abnahme von Wasserstoff-Tankstellen nach Vorgaben, die auch die SAE J2601 Bestimmungen gemäß Clean Energy Partnership (CEP) anerkennt.

LEISTUNGSSPEKTRUM

Fuel-Station-Test-Module (H_2 FSTM)
- Mobiles Prüfgerät mit TÜV-Nord-Zulassung zur Abnahme von Wasserstoff-Stationen
- Tests gemäß CEP nach SAE-Richtlinien (SAE J2601)
- Überwachung der Einhaltung von Druck- und Temperaturgrenzwerten, Infrarot-Kommunikation von Fahrzeug/Tankstelle sowie Wasserstoffmenge
- Probenentnahmen während und nach der Betankung möglich

Gasanalytik
- Analysen der Wasserstoffqualität und Detektion von Verunreinigungen hinsichtlich der Anforderungen nach ISO 14687-2
- Analyse von Reformat-Gas-Zusammensetzungen
- Online-Monitoring zur kostengünstigen Überwachung der Wasserstoffqualität von Tank- und Abfüllstationen

Analytiklabor zur Detektion von Verunreinigungen in Wasserstoffproben nach SAE J2719/ ISO 14687-2.

Ansprechpartner: Markus Jenne | markus.jenne@zsw-bw.de | Telefon +49(0) 731 95 30-821

Stuttgart:
Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Fon: +49 (0) 711 78 70-0
Fax: +49 (0) 711 78 70-100
www.zsw-bw.de

Ulm:
Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Fon: +49 (0) 731 95 30-0
Fax: +49 (0) 731 95 30-666
www.zsw-bw.de

Ulm eLaB:
Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Fon: +49 (0) 731 95 30-500
Fax: +49 (0) 731 95 30-599
www.zsw-bw.de

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008