



// Energie mit Zukunft

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-
Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung sind klimaneutrale Energietechnologien. Konzepte dafür müssen ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich tragfähig sein und sind untrennbar mit der Nutzung erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energieeffizienz verbunden. Dafür arbeitet das ZSW: Seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erforschen und entwickeln Technologien für Strom aus Sonne und Wind, für die Energiespeicherung über Wasserstoff und Batterien und für die Integration der erneuerbaren Energien ins Netz. Diese Technologien bringt das ZSW gemeinsam mit Industriepartnern in den Markt. Die technische Expertise fließt auch in übergreifende, systemanalytische Fragestellungen ein. Dazu gehören das Monitoring der Energiewende ebenso wie die Entwicklung und Evaluation von Förderinstrumenten. So unterstützt das ZSW gemeinsam mit Politik und Wirtschaft die Transformation unseres Energiesystems.



// Inhalt

- 4 // Kompetenzen
- 6 // Energiesystem mit Zukunft
- 10 // Strom aus Sonne und Wind
- 18 // Elektromobilität und Stromspeicherung mit Batterien
- 26 // Mobilität und Energiespeicherung mit Wasserstoff
- 34 // Netzintegration und Energiemanagement
- 38 // Partner für Wirtschaft, Forschung und Politik
- 39 // Standorte

// Kompetenzen des ZSW

Die Grafik zeigt die Kompetenzen des ZSW, die auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung zum Einsatz kommen. Bei diesen Technologien deckt das ZSW die gesamte Wertschöpfungskette ab: von der Materialforschung über die Entwicklung von Prototypen und Produktionsverfahren bis hin zu Anwendungssystemen, Qualitätstests und Marktanalysen. Auch die Konzepte und Analysen, die das Institut für Politik und Wirtschaft erstellt, tragen dazu bei, die Technologien in den Markt zu bringen.

Technologietransfer

Geschäftsmodelle

Transformationsprozesse



Strom

Wärme

Mobilität

Szenarien & Analysen

Förderinstrumente



// Energiesystem mit Zukunft

Wer den Energiebedarf zuverlässig, umweltschonend und zu akzeptablen Kosten decken will, braucht nicht nur entsprechende Energietechnologien, sondern auch kluge Konzepte für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft – diese liefert das ZSW.



Es gibt viele gute Ideen und Innovationen, die bei der Transformation unseres Energiesystems eine wichtige Rolle spielen. Das ZSW bewertet, wie sie sich umsetzen lassen.

Der Erfolg neuer Technologien auf dem Markt hängt sehr stark von den geltenden Rahmenbedingungen ab. Es ist Aufgabe der Politik, diese zu schaffen. Das ZSW unterstützt deshalb die Entscheidungsträger auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene mit Berechnungen, Analysen und Gutachten. Auf dieser wissenschaftlichen Basis entstehen strategische Konzepte, Gesetze wie das Klimaschutzgesetz in Baden-Württemberg oder Förderinstrumente wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz.

Für Akteure aus Wirtschaft und Verwaltung erstellt das ZSW ebenfalls belastbare Studien zur Leistungsfähigkeit neuer Energietechnologien, zur Vereinbarkeit ökonomischer und ökologischer Ziele, zu den Folgen des Umbaus des Energiesystems sowie zu den Vor- und Nachteilen staatlicher Eingriffe.

Auf die Unabhängigkeit und Objektivität der ZSW-Experten können sich Auftraggeber und Partner stets verlassen. Dabei ist die Kompetenz der Kolleginnen und Kollegen aus den technischen Geschäftsbereichen des Instituts eine wichtige Unterstützung.



Wie etablieren sich neue Technologien der Energiewende erfolgreich in der Anwendung und wie können Hemmnisse überwunden werden? Diese Fragen untersuchen ZSW-Forscher gemeinsam mit Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern im Rahmen von Projekten, die die Energiewende als einen gesellschaftlichen Veränderungsprozess verstehen.

// Energiesystem mit Zukunft



Die Wissenschaftler des ZSW beobachten, erfassen und beurteilen kontinuierlich die Energiewende auf internationaler und nationaler Ebene ebenso wie in den Ländern, Regionen und Kommunen. Daraus leiten sie Handlungsempfehlungen für die Politik ab.



// Kompetent beim Monitoring der Energiewende

Eine wichtige Aufgabe des ZSW besteht im Monitoring des Fortschritts der Energiewende. Für die Bundesregierung ebenso wie für die Landesregierung Baden-Württemberg analysieren die ZSW-Experten die Umsetzung und die Auswirkungen der Energiewende und geben Empfehlungen, an welchen Stellen nachzusteuern ist.

Das ZSW ist für Monitoring- und Evaluationsaufgaben prädestiniert, weil es über eine belastbare Informations- und Datengrundlage verfügt, die seit Jahrzehnten aufgebaut, gepflegt und weiterentwickelt wird. Die Gewinnung von Daten, deren Auswertung sowie Aufbereitung für unterschiedliche Fragestellungen und Akteure gehören

zu den Kernkompetenzen des Teams. Zu den Partnern und Auftraggebern zählen neben der Politik zahlreiche wissenschaftliche Einrichtungen, Fachverbände und Unternehmen.

So hat das ZSW die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) aufgebaut und viele Jahre geleitet und ist Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. Diese erstellt jährlich eine Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, die der Bundesregierung als Basis bei der Erfüllung zahlreicher Berichtspflichten dient. Des Weiteren ermittelt das ZSW auch ökonomische Effekte, die aus dem Ausbau der erneuerbaren Energien resultieren.



Einen Grundstein zur Energiewende legte Deutschland mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000. Das EEG wurde zum Vorbild für viele Fördersysteme weltweit. Bei der Gestaltung dieses Gesetzes stand das ZSW der Politik von Beginn an mit seiner Expertise zur Seite.

// Energiewirtschaftliche Konzepte für regenerative Kraftstoffe und alternative Antriebe

Wasserstoff und Methan auf der Basis von erneuerbaren Energien sowie batterieelektrische und Brennstoffzellen-Antriebe bieten die besten Aussichten auf eine wirksame CO₂-Vermeidung im Verkehr und können zugleich erneuerbaren Strom speichern.

Das ZSW verfügt in den sich besonders dynamisch entwickelnden Bereichen der batterieelektrischen Mobilität, der Wasserstoffherstellung und Nutzung in Brennstoffzellen sowie der Herstellung von regenerativem Methan und strombasierten flüssigen Kraftstoffen über einen großen Erfahrungsschatz in Forschung, Entwicklung und Anwendung. Die Systemanalytiker des Instituts erarbeiten Konzepte für den flächendeckenden und systemrelevanten Einsatz dieser Antriebstechnologien. Ziel ist die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik zur erfolgreichen Umsetzung des Transformationsprozesses im Verkehr und zur Stärkung des Wirtschaftsstandortes.

// Wärme und Effizienz

Mehr als ein Drittel des Stromverbrauchs in Deutschland wird bereits mit regenerativen Energien gedeckt. Nachholbedarf besteht neben dem Verkehr vor allem im Wärmemarkt und beim effizienten Einsatz von Energie, um die europäischen und nationalen Energiewende-Ziele zu erreichen.

Das ZSW hat viele Jahre die Weiterentwicklung des Marktanzreizprogrammes des Bundes begleitet, welches das zentrale Förderinstrument für erneuerbare Energien im Wärmemarkt darstellt. Auf Landesebene unterstützt das Institut das baden-württembergische Umweltministerium konzeptionell beim Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und realisiert den bundesweit einzigartigen Wettbewerb „Leitstern Energieeffizienz“, der Stadt- und Landkreise mit einem besonders effizienten Umgang mit Energie auszeichnet.

Nähere Infos unter



// Strom aus Sonne und Wind

Strom aus Sonne und Wind sind zwei wichtige Säulen für die Transformation unseres Energiesystems. In der Photovoltaik arbeitet das ZSW an der Effizienz und Lebensdauer von Solarzellen und -modulen, an Produktionsverfahren und an der Qualitätssicherung. Beim Wind verspricht das neue Testfeld für Anlagen in bergig-komplexem Gelände verwertbare Erkenntnisse für die Industrie. Anlagenbetreibern liefert das Institut Einspeiseprognosen für die Sonnen- und Windenergie.



Die Photovoltaik (PV) ist eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen. Ihre Kosten sind im letzten Jahrzehnt rapide gesunken. Die weltweiten Wachstumsraten sind enorm und heute stammen bereits 2 % der weltweiten Stromerzeugung aus der PV. Zum Erreichen der Klimaziele ist aber weiterhin eine erhebliche Ausbaudynamik erforderlich.

Auch in Deutschland sind noch umfangreiche Potenziale zum Beispiel auf und an Gebäuden in urbanen Räumen zu erschließen. Das ZSW leistet seinen Beitrag dazu, indem es die Technologie in Richtung Effizienz und Kostensenkung weiterentwickelt und gemeinsam mit Industriepartnern Innovationen in den Markt transferiert.

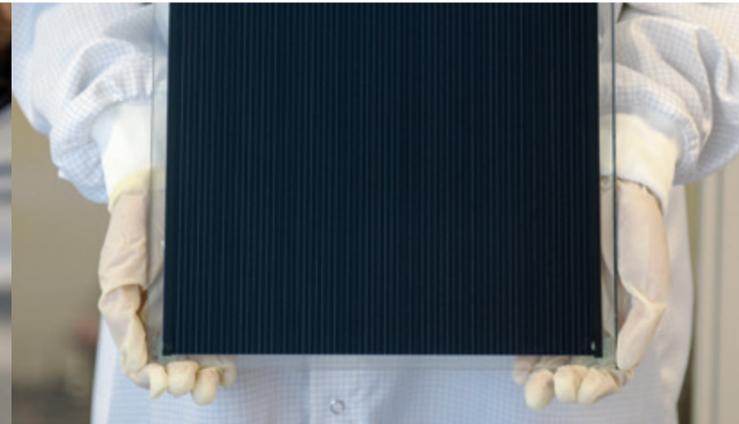
Das Forschungs- und Leistungsspektrum des ZSW in der Photovoltaik reicht von der Materialforschung über die Systemtechnik bis hin zu Produktionsforschung, Qualitätsprüfung und Consulting.

Wind ist die zweite große Energiequelle der globalen Energiewende. Zunehmend werden Standorte in bergigen Regionen erschlossen. Der Betrieb von Windkraftanlagen ist dort jedoch anspruchsvoller als im flachen Gelände. Die Frage, wie die Leistung der Anlagen optimiert und deren Lebensdauer verlängert werden kann, will nun das Forschungscluster WindForS beantworten. Unter der Federführung des ZSW entsteht 2018 ein Forschungstestfeld am Stöttener Berg bei Geislingen an der Steige.



Wind, Sonne & Co. zusammen genommen sind bereits die wichtigsten Energiequellen für die Stromerzeugung. Am 1. Januar und am 1. Mai 2018 konnte erstmals der gesamte Strombedarf in Deutschland zeitweise vollständig regenerativ gedeckt werden.

// Strom aus Sonne und Wind



// CIGS-Dünnschichtsolarzellen und -module

In der PV-Technologie dominiert derzeit das kristalline Silizium den Markt. Es gibt jedoch diverse Dünnschichttechnologien, die bereits wettbewerbsfähig sind und über erhebliche Kostensenkungspotenziale verfügen. Ihre Absorber sind nur wenige Mikrometer stark. Der Herstellungsprozess unterscheidet sich grundsätzlich von dem der Wafersilizium-Technologie, indem nicht erst einzelne Zellen hergestellt und dann elektrisch verbunden werden, sondern in einem integrierten Prozess ein komplettes Solarmodul mit schon verschalteten Zellen auf großen Glasscheiben abgeschieden wird. Dies ermöglicht effiziente, integrierte Produktionsprozesse mit hohem Durchsatz.

Das ZSW hat sich für ein Materialsystem aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen entschieden (abgekürzt CIS oder CIGS), weil dieses Material den höchsten elektrischen Wirkungsgrad aufweist und damit über weitere, erhebliche Kostensenkungspotenziale für die solare Stromerzeugung verfügt. Neben der Kosteneffizienz spricht auch die mattschwarze (oder auf Kundenwunsch farbige), homogene Erscheinung für den Einsatz dieser Technologie, insbesondere bei der Integration von CIGS-Modulen in Gebäudefassaden oder -dächer.

Dies zeigt beispielsweise die Solarfassade am ZSW-Gebäude in Stuttgart (siehe Umschlagfoto).

Auch die sogenannte Agrophotovoltaik, bei der neben der Stromerzeugung die landwirtschaftliche Fläche zum Nutzpflanzenanbau erhalten bleibt, ist eine Anwendung mit viel Potenzial.

Im ZSW-Technikum werden CIGS-Module auf Glas bis zu einer Größe von 30 x 30 cm hergestellt. Die Herstellungsanlagen sind, anders als in einem typischen Laborbetrieb, weitgehend für Durchlaufprozesse ausgelegt und damit sehr nah an industriellen Verfahren. Diese Ausrüstung erlaubt es dem ZSW, aktuelle Fragestellungen aus der Industrie zu bearbeiten, wie etwa höhere Prozessgeschwindigkeiten.

Die über 30-jährige Erfahrung des Teams sowie eine umfangreiche materialanalytische Infrastruktur (u. a. REM, TOF- SIMS, RFA, Raman, Sonnensimulatoren) ermöglichen ein tiefes Verständnis der Bauelemente und eine gezielte Weiterentwicklung von Solarzellen, Modulen und Produktionsprozessen.

Heute ist die CIGS-Technologie die Dünnschichttechnik mit den höchsten bei Laborzellen gezeigten Wirkungsgraden. Das ZSW steht nach Erreichen mehrerer Weltbestwerte mit an der Spitze der CIGS- Entwicklung. Der Weltrekord liegt bei 22,9 % (Stand Juni 2018). Damit hat die Technologie die besten Voraussetzungen für ein starkes Marktwachstum. Dies zeigt auch der Erfolg des Technologietransfers: Ein Industriepartner vertreibt schlüsselfertige Produktionsanlagen für CIGS-Solarmodule auf dem internationalen Markt.

// Flexible Solarzellen und Module

Einer der Vorteile der Dünnschichttechnologie besteht darin, dass neben dem Glas als Trägermaterial auch leichte und flexible Substrate zum Einsatz kommen können: von Edelstahl- oder Stahl-folien über Titan- bis hin zu Polyimidfolie. Damit lassen sich neue Anwendungsfelder erschließen: Leichtbaumodule für Industriehallen, ultraleichte Solarmodule für die Luft- und Raumfahrt sowie die Integration von Solarzellen in Fahrzeuge oder sogar in Textilien.

Zudem besitzen flexible Module ein großes Kostenreduktionspotenzial durch den geringeren Energieaufwand zum Aufheizen der Folien und durch die Verarbeitung in sogenannten Bandbeschichtungsanlagen, wie man sie aus der Druckindustrie kennt. Dieses Verfahren nennt man Rolle-zu-Rolle-Beschichtung. Für die Entwicklung flexibler Solarmodule müssen zahlreiche Prozessschritte, die für Glassubstrate entwickelt werden, an die Substratfolie angepasst werden.

Im Technikum des ZSW wird auf einer Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage für 30 cm Bandbreite die Prozesstechnik für die gleichzeitige Abscheidung eines Rückkontaktes aus Molybdän (durch Kathodenzerstäubung), des Absorbers (Verdampfen von Kupfer, Indium und Gallium in Selenatmosphäre) sowie des Frontkontaktes (Kathodenzerstäubung von Zinkoxid) entwickelt. Die Trägerfolie durchläuft dabei in einer einzigen Vakuumkammer kontinuierlich die verschiedenen Stationen. So lässt sich ein kilometerlanges Solarzellen-Band herstellen, das anschließend geschnitten und zu Solarmodulen verarbeitet werden kann.

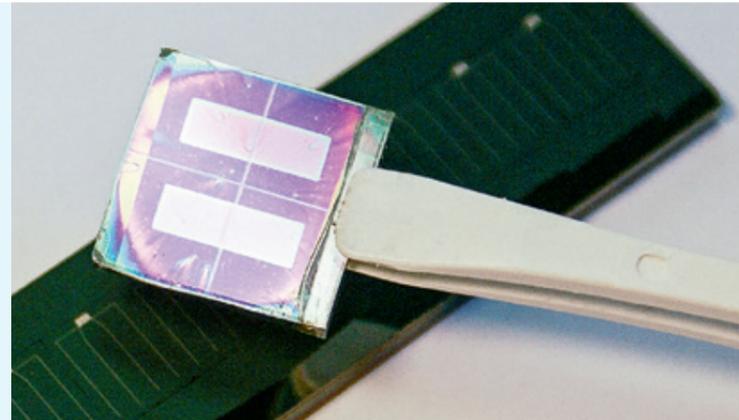
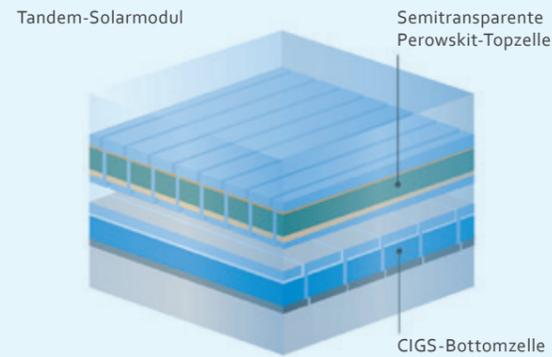


Bei CIGS-Dünnschichtsolarzellen reichen 800 g Halbleitermaterialien aus, um ein Einfamilienhaus in Deutschland über 30 Jahre mit Solarstrom zu versorgen.

Nähere Infos unter



// Strom aus Sonne und Wind: Gedruckte Solarzellen



Bei der Herstellung des Absorbers einer Dünnschichtsolarzelle verwendet man Vakuumtechnologie. Weitere Kostenersparnisse versprechen neue Materialkombinationen und Prozesse, die am ZSW entwickelt werden. Hinzu kommen Effizienzpotenziale, die in der nächsten Generation der Photovoltaik gehoben werden sollen.

Die Wirkungsgrade der Einfachzellen, wie sie in den heutigen kommerziell erhältlichen PV-Modulen umgesetzt sind, nähern sich dem thermodynamischen und auch technologischen Limit an. Bei Mehrfachzellen oder Multispektralzellen wird das Sonnenspektrum optimal ausgenutzt, indem Solarzellen mit unterschiedlich ausgedehnten Absorptionsbereichen direkt in einem Stapel seriell verschaltet werden. Dazu muss die obere Zelle möglichst viel Sonnenlicht zur unteren Zelle gelangen lassen („semitransparent“), gleichzeitig selbst aber sehr effizient sein. Daher werden die nächsten größeren Steigerungen bei den Wirkungsgraden von sogenannten Mehrfachzellen erwartet.

// Attraktives Tandem: CIGS und Perowskit

Hier versprechen neue Dünnschicht-Materialsysteme wie die sogenannten Perowskite durch kostengünstige Drucktechnologien weitere Fortschritte. Darüber hinaus handelt es sich um ein attraktives, kostengünstiges Material für die Verwendung als semitransparente Topzelle in Mehrfachzellen.

Der Wirkungsgrad des Perowskit konnte von unter 4 % im Jahr 2009 auf heute über 22 % gesteigert werden. Dieses Materialsystem ermöglicht es, die etablierten Technologien Silizium und CIGS mithilfe des Konzepts der Mehrfach-Solarzellen auf Wirkungsgrade zwischen 25 % und 30 % zu heben, d. h. über das theoretische Limit der Einzelzellen hinaus. Allerdings sind hierbei noch verschiedene Herausforderungen zu bewältigen.

Der aktuelle Wirkungsgrad für eine als Topzelle geeignete semitransparente Perowskitzelle liegt bei über 18 %. Beim Aufbau von Mehrfachzellen mit Silizium als Bottomzelle konnten bereits Effizienzen über 26 % und mit CIGS als Basiszelle über 24 % erzielt werden.

// Strom aus Sonne und Wind: Qualität von Photovoltaik-Modulen und Systemen

// Modulprüfung in Labor und Freifeld

Hersteller von Solarstrommodulen gewähren meist Produkt- und Leistungsgarantien über sehr lange Zeiträume. Bei der Sicherstellung dieser Qualität leistet ein Forschungsinstitut wie das ZSW, das auch selbst Solarzellen, -module und Produktionsprozesse entwickelt, mit seinen umfangreichen Prüfmöglichkeiten für Module und Materialien im Labor und auf dem Freifeld wertvolle Hilfe.

Investoren, Banken, Hersteller und Projektentwickler sind auf die Überprüfung und Bewertung der Leistungsfähigkeit, Langzeitstabilität und Betriebssicherheit von PV-Modulen durch unabhängige Prüfeinrichtungen angewiesen. Gerade beim Nachweis der Eignung von PV-Modulen bestimmter Technologien und Hersteller für große internationale Projekte („Bankability“) ist die stichprobenartige Prüfung der PV-Module durch einen Dritten („Third Party“) eine sinnvolle Maßnahme, um das Risiko für alle am Projekt Beteiligten zu minimieren.

// Consulting und Vor-Ort-Inspektionen

An PV-Anlagen werden immer wieder Ertragsschwächen oder auch Auffälligkeiten an einzelnen Komponenten festgestellt. In solchen Fällen leistet das ZSW-Testlabor Solab eine bedarfsgerechte Analyse der Ertragsdaten, IR-Thermografie und Leistungsmessung. Mögliche Fehlerursachen wie PID, Mikrorisse, Schnecken Spuren, LID, defekte Bypassdioden oder schadhafte Rückseitenfolien können präzise identifiziert werden. Zusätzlich werden einzelne Module im Solab vermessen und im ZSW-Analytiklabor detailliert untersucht. Als qualitätssichernde Maßnahme werden auch weltweit Vor-Ort-Inspektionen von PV-Anlagen sowie Inspektionen von Produktionsstätten für PV-Module durchgeführt.

ZSW Solar-Testfeld Widderstall –
Betrieb und Monitoring von PV-Modulen im Freifeld ergänzen die Qualitätsprüfung im Labor.



Das **ZSW-Testlabor Solab** bietet für Module aller Technologien Prüfungen wie die Messung der Leistung oder des Schwachlichtverhaltens, Isolationsprüfung unter Benässung oder Tests zur potentialinduzierten Degradation (PID), ergänzt durch beschleunigte Alterungstests wie den Damp-Heat-Test (DHT), den thermischen Zyklentest (TCT) oder den UV-Beleuchtungstest.

// Strom aus Sonne und Wind



// Windtestfeld in bergigem Gelände

Die zunehmende Nutzung der Windenergie erfordert auch eine Erschließung bergiger Gebiete mit guten Windverhältnissen. In einer derartigen Topografie kommt es zu unregelmäßigen Windströmungen und Luftverwirbelungen, die die Anlagen mechanisch fordern und den Anlagenenertrag beeinflussen. Wie man auch an solch anspruchsvollen Standorten Windkraftanlagen optimal betreiben kann, untersucht das ZSW mit seinen Partnern des Forschungsclusters WindForS in einem Testfeld auf der Schwäbischen Alb bei Geislingen an der Steige. Dieses Testfeld gilt aufgrund seiner Forschungskonzeption und des komplexen Standortes international als einzigartig und ist für die Weiterentwicklung von Windenergieanlagen sehr wertvoll.

Das Testfeld besteht aus zwei Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von jeweils 750 Kilowatt und einer Nabenhöhe von 75 Metern. Der Rotordurchmesser beträgt 50 Meter, die Gesamthöhe 100 Meter. Die Windkraftanlagen werden vom Fundament bis zu den Rotorblättern mit zahlreichen Mess-Sensoren ausgestattet.

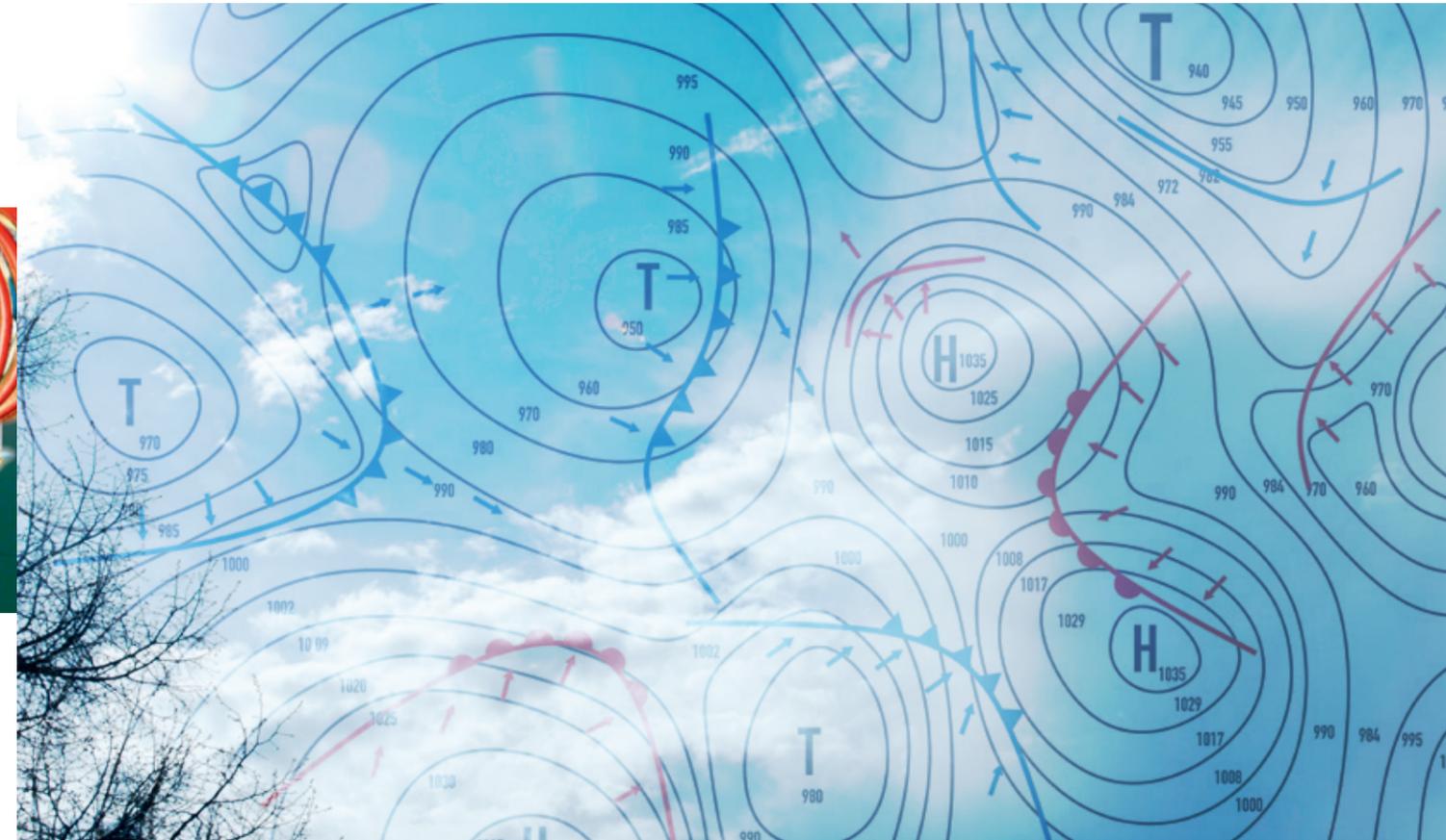
Zu den Alleinstellungsmerkmalen des Projekts zählt, dass die Wissenschaftler uneingeschränkter Zugriff auf die komplette Steuerungstechnik und die Konstruktionsdaten der Anlagen haben und so deren Verhalten im Detail analysieren und beeinflussen können.

Im Forschungsfokus stehen zahlreiche technologische Verbesserungen. Es geht um die Entwicklung strömungsoptimierter und dadurch leiserer Rotorblätter, leichterer und zudem leistungsstärkerer Rotoren sowie um optimierte Simulations- und Computermodelle. Die Ergebnisse der Analysen sollen auf kommerzielle Großanlagen übertragen werden und der Industrie neue Impulse liefern.

Zusätzlich wird das Testfeld für die Erforschung ökologischer Zusammenhänge und Wechselwirkungen rund um die Windenergie genutzt. So wird das Verhalten gefährdeter Vogel- und Fledermausarten studiert, um Technologien zu entwickeln, die eine Nutzung der Windenergie mit dem Erhalt der ökologischen Vielfalt und dem Artenschutz vereinbar machen. Zur Identifizierung von geschützten Vogelarten kommen Bilderkennungsverfahren zum Einsatz, wie sie für das autonome Fahren von Fahrzeugen entwickelt werden.



Zum Windtestfeld gehört auch eine **ökologische Begleitforschung**. Dabei wird der mögliche Einfluss der Anlagen auf die Tiere und Pflanzen am Standort untersucht. Für interessierte Bürger ist zudem ein **Rundweg mit Schautafeln** geplant.



// Einspeiseprognosen für Sonne und Wind

Die Einspeisung von Sonnen- und Windenergie schwankt in Abhängigkeit von der Tages- oder Jahreszeit sowie je nach Witterung beträchtlich. Der Anteil dieser erneuerbaren Quellen an unserer Stromversorgung nimmt mit fortschreitender Energiewende stetig zu. Zeitlich hochaufgelöste Vorhersagen der eingespeisten Leistung werden deshalb für Anlagenbetreiber immer wichtiger. Sie sind zudem notwendige Parameter für das Management von Übertragungs- und Verteilnetzen.

Das ZSW beschäftigt sich anwendungsnah mit Technologien, die genaue Windleistungsvorhersagen ermöglichen. Dabei berücksichtigen die Forscher das komplexe Zusammenspiel aus Wettermodell-Prognosen, Satellitendaten, meteorologischen Messungen sowie historischen und zukünftigen Winderträgen eines Standorts oder einer ganzen Region.

Hierbei spielen maschinelle Lernverfahren eine entscheidende Rolle. Dadurch können physikalisch bemessene Wind- und Sonneneinstrahlungsvorhersagen und folglich die Leistungsprognose der Anlagen nochmals deutlich verbessert werden. Im Rahmen des maschinellen Lernens erkennt das System Muster und Gesetzmäßigkeiten in den Parametern langjähriger Messzeitreihen und wendet sie auf die jeweils aktuelle Wettersituation an. Systematische Abweichungen, die stets in physikalischen Modellen vorkommen, werden hierbei automatisch korrigiert.

Neben Windleistungsprognosen erstellt das ZSW auch Photovoltaik-(PV-)Einspeiseprognosen für räumlich verteilte PV-Portfolios für ganz Deutschland sowie in den vier deutschen Regelzonen, d.h. den vier geografisch festgelegten Verbänden von Hoch- bzw. Höchstspannungsnetzen, deren Stabilität vom jeweils zuständigen Übertragungsnetzbetreiber sichergestellt wird.

// Elektromobilität und Stromspeicherung mit Batterien

Sonne und Wind sind fluktuierende Energiequellen. Um den daraus gewonnenen Strom kontinuierlich nutzbar zu machen, muss dieser gespeichert werden. Für diesen Zweck, aber auch für eine nachhaltige Mobilität werden leistungsfähige Technologien benötigt. Dazu zählt die Stromspeicherung mit Batterien.



Das Zusammenspiel von Elektromobilität und erneuerbaren Energien erfordert ganz neue, leistungsfähige Speichersysteme. Die Lithium-Ionen-Technologie hat sich als der Stromspeicher der Wahl bewährt und zu einem globalen Megatrend entwickelt.

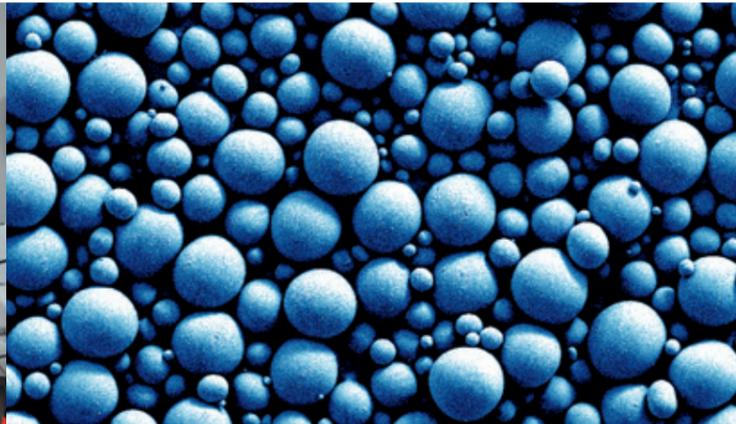
Hochleistungsbatterien sind das Kernelement moderner Hybrid- und Elektroantriebe für PKWs, denn sie bestimmen wesentlich Kosten, Verbrauch, Reichweite und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge. Darüber hinaus bieten Batterien für stationäre Anwendungen die Möglichkeit, z. B. den Eigenverbrauch von Strom aus dezentralen Photovoltaikanlagen zu maximieren. Gleichzeitig können mit Batterien Verteilnetze optimiert und Notstromeigenschaften realisiert werden.

Das ZSW betreibt seit 30 Jahren Batterieforschung. Aspekte sind die kontinuierliche Erhöhung der Energiedichte unter Einhaltung von Sicherheitsstandards, das Hoch- und Tieftemperaturverhalten sowie neue Materialklassen wie z. B. kobaltfreie Kathoden oder Silizium-basierte Anoden für Lithium-Ionen-Zellen. Parallel zu diesen evolutionären Entwicklungen werden ganz neue Ansätze zur elektrochemischen Energiespeicherung erforscht und entwickelt.



Die Elektromobilität verzeichnet weltweit seit Jahren hohe Wachstumsraten. 2017 wurden 1,2 Millionen Elektrofahrzeuge mit Batterien hergestellt, für 2025 werden 20 Millionen erwartet. Die Anzahl der Fahrzeugtypen steigt ebenfalls, wobei die verbauten Batterien bei neuen Modellen mit bis zu 100 kWh zunehmend größer werden. Um derartig hohe Mengen Lithium-Ionen-Zellen produzieren zu können, sind Milliarden-Investitionen für den Aufbau von bis zu 20 „Giga-Fabs“ mit einer Kapazität von jeweils 100 Gigawattstunden erforderlich.

// Elektromobilität und Stromspeicherung mit Batterien: Materialforschung und Post-Mortem-Analysen



// Entwicklung von Aktivmaterialien

Neue Aktivmaterialien liefern die Basis zur Entwicklung fortschrittlicher Batterien der nächsten Generation und ermöglichen es, Rohstoffengpässe durch die Massenproduktion zu vermeiden. Kernkompetenzen des ZSW sind die Synthese neuer chemischer Verbindungen und die Herstellung maßgeschneiderter Pulver und Pasten für Elektroden. Die Möglichkeiten zur Pulverherstellung reichen von wenigen Gramm bis zum Kilogramm-Maßstab. Zur Expertise gehören Kathodenmaterialien (z. B. Hochvoltspinnelle, Lithium-Übergangsmetallphosphate und -silikate) und Anodenmaterialien (z. B. optimierte Kohlenstoffmodifikationen, Titanate und Legierungsanoden) sowie Elektrolytsysteme mit speziellen Additiven.

Ein Beispiel sind Arbeiten zu kobaltfreien Elektroden. Kobalt wird in allen heute gängigen Zusammensetzungen der Kathoden von Lithium-Ionen-Zellen verwendet, auch bei den modernsten Varianten. Das Material ist aber toxisch, knapp und kostspielig. Bereits 2015 konnte ein neues, kobaltfreies Kathodenmaterial auf der Basis von $\text{Li}_{1+x}\text{Mn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$ entwickelt werden, das mit mehr als 240 mAh/g eine deutlich größere Speicherkapazität aufweist als heute verwendete oder in Entwicklung befindliche Materialien. Mit über 4,5 Volt (V) Entladespannung ist eine bis zu 40 Prozent höhere Energiedichte der gesamten Batterie möglich. Solche verbesserten Batterien verlängern die Reichweite von Elektrofahrzeugen signifikant.

Damit künftig neue Techniken wirtschaftlich darstellbar sind, schließt die Materialforschung auch verschiedenste Post-Lithium-Systeme ein. So wird am ZSW z. B. an Metall-Luft-Zellen, Lithium-, Schwefel- und Natrium-Ionen-Zellen, an Superkondensatoren und Hybrid-Superkondensatoren sowie an Redox-Flow-Batterien geforscht.

// Analytik

Das elektrochemische Verhalten von Speichermaterialien für Lithium-Ionen-Batterien hängt stark von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem kristallinen Aufbau ab. Form, Größenverteilung und Oberflächeneigenschaften der mikroskopisch kleinen Speicherpartikel bestimmen in starkem Maße das Verarbeitungsverhalten und damit die Einsetzbarkeit in der industriellen Zellproduktion. In Forschungsprojekten gehört es zu den Kernaufgaben des ZSW, ein vollständiges Eigenschaftsprofil der Materialien zu erstellen, Einflussfaktoren zu erkennen sowie Struktur-Eigenschafts-Beziehungen abzuleiten und zu verstehen.

Batterien verlieren im Gebrauch an Leistung und Speicherfähigkeit. Ursachen für diese Alterungserscheinungen können chemische Korrosionsvorgänge an Materialien und Komponenten oder auch mechanische Degradation sein. Eine spezielle Kompetenz des ZSW ist es, Alterungseffekte zu verstehen und das gewonnene Verständnis direkt in die Materialoptimierung und Zellentwicklung rückfließen zu lassen.

Zum Einsatz kommen analytische Standardmethoden zur chemischen Analyse (ICP-OES), zur Strukturaufklärung (XRD) und Mikroskopie (REM, EDX). Daneben erfolgen Oberflächenuntersuchungen (BET), hochaufgelöste Tiefenprofilanalysen (GD-OES) sowie Untersuchungen zum Zersetzungsverhalten bei höheren Temperaturen mit thermoanalytischen Methoden (TG/DSC-MS und ARC).

// Schadensanalyse – Lebensdauerprognosen – Qualitätssicherung

Mit der Marktentwicklung von Lithium-Ionen-Zellen für Elektroautos, E-Bikes und stationäre Solar-Stromspeicher gewinnt die detaillierte Analyse gealterter oder defekter Akkus immer mehr an Bedeutung. Sie soll klären, ob unsachgemäße Nutzung, Produktionsfehler oder Schwachstellen in der Konstruktion die Beeinträchtigung verursacht haben. Das ZSW verfügt über Experten mit langjähriger Erfahrung und die entsprechende Ausstattung um sämtliche Typen von Batterien – von konventionellen Batterien über Lithium-Ionen-Batterien bis hin zu neuen Supercaps zu untersuchen.

Mittels professioneller Zellöffnung und Demontage können Proben aus den einzelnen Bauteilen der Zelle – Anode, Kathode und Separator – entnommen, analysiert und damit die konkrete Ursache des Defekts ermittelt werden. Über Post-Mortem-Analysen lassen sich Schädigungsmechanismen ableiten. Ein Beispiel ist der Einfluss sich ändernder Umgebungstemperaturen auf den Alterungsmechanismus von Zellen. Dies ist ein wichtiges Thema bei Zellen für die Elektromobilität. Der zerstörungsfreie Blick in die Batterie mittels 3D-Röntgen-Computertomografie liefert die Basis für gezielte Verbesserungen an Materialien und Prozessen im Rahmen der Elektroden- und Zellfertigung oder für die Entwicklung neuer Prüfmethoden für die Batterieindustrie.



Am ZSW können sämtliche Typen und Formate von Batterien – von konventionellen Batterien über Lithium-Ionen-Batterien bis hin zu neuen Superkondensatoren – bis zu einer Kapazität von 400 Amperestunden untersucht werden.

Nähere Infos unter



// Elektromobilität und Stromspeicherung mit Batterien: Produktions- und Prozessforschung



Neue Materialien ermöglichen Fortschritte in der Performance von Batterien. Indem sie zu Elektroden und Vollzellen verarbeitet werden, können Eigenschaften und Wechselwirkungen mit anderen Zellbestandteilen geklärt sowie ihre Einsatzmöglichkeiten analysiert werden.

// Rezepturen und Verarbeitungsverfahren für Elektroden und Zellen

Je nach Anwendung der Lithium-Ionen-Zelle ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Belegung und Struktur der Elektrode mit Aktivmaterial. 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 die Leistungsdichte sowie die Kinetik beim Laden und Entladen der Zellen. Die Haftfestigkeit und Stabilität der Elektrodenbeschichtung sind weitere Eigenschaften, die über die Herstellparameter eingestellt werden.

Das ZSW entwickelt Rezepturen und Verarbeitungsverfahren, damit die Eigenschaften des Materials in der Zelle realisiert werden können. Hierzu ermitteln die Forscher zunächst einen optimalen Elektrodenaufbau und beurteilen dann die Auswirkungen der Verarbeitung auf Material, Elektrode und Zelle. Methoden hierfür sind beispielsweise die Rasterelektronenmikroskopie, die Quecksilber-Porosimetrie und die elektrochemische Analytik.

Mit der Abstimmung von Kathode auf Anode wird die Zelle für eine spezifische Anwendung ausgelegt. Dabei können die Zyklenstabilität, die Entladestromrate oder ein bestimmter Betriebstemperaturbereich im Vordergrund stehen. Im ersten Schritt liefern elektrochemische Untersuchungen der Elektroden in Halbzellen wichtige Anhaltspunkte zur „Elektrodenbalancierung“. Einen tieferen Einblick in die Wirkzusammenhänge ermöglichen elektrochemische Untersuchungen verschiedener Elektrodenkombinationen in Vollzellen mit Referenzelektrode.

Um aus neuen Aktivmaterialien oder Zellkomponenten voll funktionsfähige Elektroden und Zellen zu entwickeln und herzustellen, stehen alle Anlagen, vom Trockenraum bis zur Analytik, zur Verfügung. Die Möglichkeiten reichen vom Labormaßstab für Single-Layer- und gestapelte Pouch-Zellen sowie gewickelte 18650- und 21700-Zellen bis hin zur industriellen Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL) im PHEV-1-Format.



Die kurz- und mittelfristig geplanten Produktionsmengen für Elektrofahrzeuge erfordern nicht nur Investitionen in neue Fabriken im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich, sondern auch neue, fortschrittliche Batterie-Zellen und moderne industrielle Produktionstechnologien.



// Industrielle Produktions- und Prozessforschung

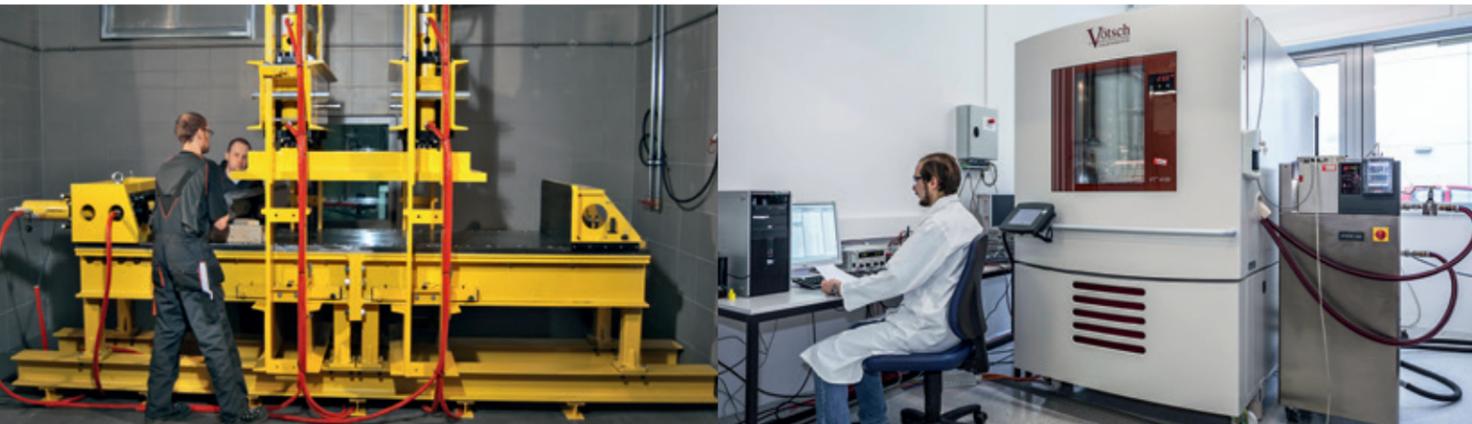
Damit die besten Batterien für Elektroautos oder zur Speicherung von Wind- und Sonnenenergie zukünftig auch in Deutschland produziert werden, wurde 2014 die „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“ am ZSW in Ulm geschaffen. Im Fokus steht der Aufbau von verfahrenstechnischem und produktionstechnologischem Know-How zur Produktion der großformatigen Lithium-Ionen-Zellen in industrierelevanten Anlagen. Die Anlage steht Industrieunternehmen und Forschungspartnern zur Entwicklung von Zell-Technologien und Fertigungsverfahren offen.

Jeder einzelne Prozessschritt der industriellen Produktion von Lithium-Ionen-Zellen hat Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit, Qualität und Kosten. Das ZSW forscht daher kontinuierlich an verbesserten Materialien und Komponenten und erprobt neue Produktionsverfahren und Anlagenkomponenten. Für Qualität und Ausbeute entscheidende Prozessparameter sowie neue Qualitätssicherungsmethoden in der Zellproduktion sind weitere wichtige Forschungsfelder, um die hohen Sicherheits- und Qualitätsanforderung der Automobilindustrie zu erfüllen.

Mit der modular aufgebauten Produktionsanlage können alle Prozesse, von der Rezepturvorbereitung über die Elektrodenherstellung und Zellaassemblierung bis zur Formierung, unter seriennahen Bedingungen entwickelt, optimiert und qualifiziert werden. Die vollautomatische Zellaassemblierung ist auf verschiedene Zellformate adaptierbar und auf eine Zelle pro Minute ausgelegt. Die Qualitätssicherung der einzelnen Produktionsschritte – als Einzelschritte oder gesamthaft – erfolgt über ein speziell entwickeltes Prozessleitsystem. Die Auswertung der Produktionsdaten ermöglicht es, relevante Zusammenhänge aufzuklären, und liefert die Basis für die Modellierung und Simulation.



// Elektromobilität und Stromspeicherung mit Batterien: Batterietestzentrum und Systemtechnik



// Batteriesicherheits- und Leistungs-Testzentrum

Die Sicherheit von Batterien und die Analyse ihres Verhaltens unter allen denkbaren Bedingungen, auch in Extremsituationen, hat allerhöchste Priorität für den Einsatz im Alltag. Im Mittelpunkt der Arbeiten im Batterietestzentrum stehen die Charakterisierung von Speichern sowie deren Verhalten bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen. Die Einsatzbereiche der Batterien umfassen die stationäre Energiespeicherung in elektrischen Netzen und in portablen Geräten ebenso wie in elektrifizierten Antriebssträngen für die Elektromobilität.

Mittels zerstörerischer Batterietests können die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Arten der Fehlbedienung beurteilt werden. Das Testspektrum am ZSW umfasst mechanische, thermische und elektrische Sicherheitsuntersuchungen, für die mehrere Testbunker mit Feuerlöschanlage, Gaswäsche, Videobeobachtung und High-Speed-Datenaufzeichnung zur Verfügung stehen. Die Tests erfolgen nach spezifischen Kundenvorgaben oder nach national und international anerkannten Prüfvorschriften.

Mit elektrischen Batterietests können Zellen, Module und Systeme auf Funktionalität und Leistungsfähigkeit vermessen sowie die zu erwartende Lebensdauer unter definierten Belastungen und Umgebungsbedingungen bestimmt werden. Das ZSW charakterisiert Einzelzellen, Module und komplette Batteriesysteme unter allen relevanten Betriebsbedingungen. Die Prüfeinrichtungen ermöglichen Tests im Leistungsbereich von wenigen Milliwatt bis zu maximal 320 Kilowatt bei Spannungen bis 1.000 Volt.



Im Mittelpunkt der Testaktivitäten steht die Charakterisierung von Batterien unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie das Verhalten bei Fehlbedienung und in Unfallsituationen.



// Systemtechnik und Batteriemangement

Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung und Simulation von Zellen und Batteriesystemen. Die Forschung des ZSW spannt den Bogen von der Charakterisierung von Zellen über die Entwicklung von Batteriemodulen und Batteriemangementsystemen bis hin zur Anwendung des Speichers in seiner Einsatzumgebung. Ziel ist ein dynamischer, zuverlässiger und wirtschaftlicher Betrieb über die gesamte Lebensdauer.

Zu den Aufgaben zählen grundlegende Untersuchungen des Verhaltens von Batterien (elektrochemisch, elektrisch, thermisch, mechanisch), modellbasierte Algorithmen für die Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung) und die Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit sowie für die optimale Laderegelung, insbesondere unter Schnellladebedingungen, und zum Energiemanagement. Weitere Themen sind die Evaluation von Batterieanwendungsfällen und Kostenentwicklungen.

Je nach Einsatzgebiet der Batterie, z. B. als Traktionsbatterie in einem Elektrofahrzeug, als PV-Batteriespeicher in einem Gebäude oder als Netzbetriebsmittel, werden unterschiedliche Anforderungen an die Batterie gestellt und die Priorität der Eigenschaften (Energiedichte, Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Kosten ...) neu bestimmt. Aufgabe der Batteriesystemtechnik ist es, den Gesamtspeicher in der Wechselwirkung mit seiner Umgebung (Leistungselektronik, Lasten, Messtechnik, Kommunikation) in den Blick zu nehmen und optimale Betriebsbedingungen auszugestalten.



// Mobilität und Energiespeicherung mit Wasserstoff

Neben der Batterie ist Wasserstoff ein weiterer wichtiger chemischer Speicher für Strom aus erneuerbaren Energien. Er kann aber noch mehr:

Als sauberer Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge leistet er einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Zusätzlich kann Wasserstoff zu regenerativem Erdgas und zu synthetischen Kraftstoffen, den sogenannten E-Fuels, weiterverarbeitet werden.



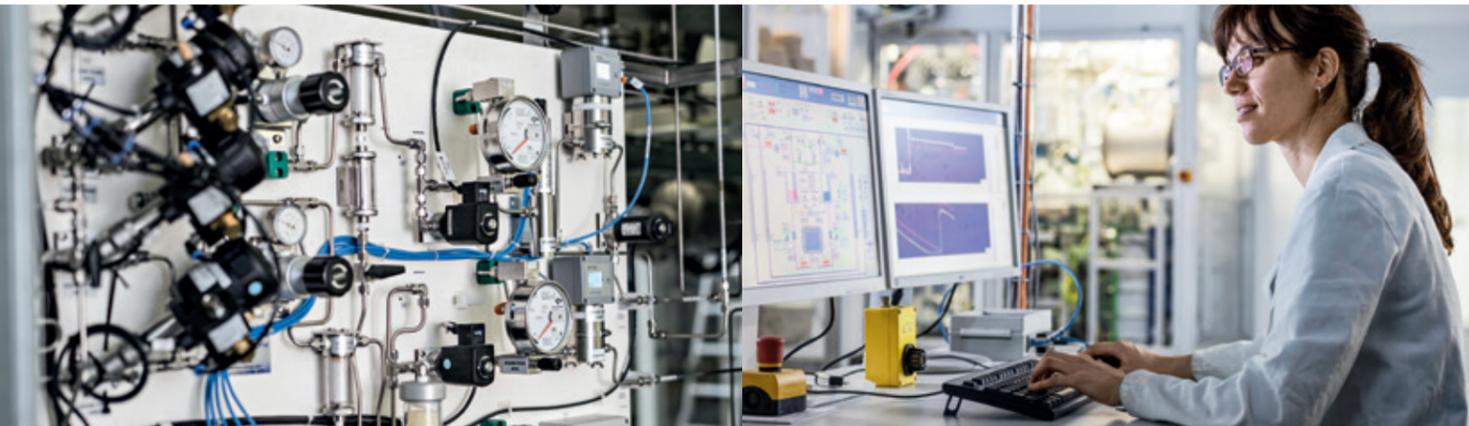
Elektromobilität umfasst neben Hybridfahrzeugen und reinen Batteriefahrzeugen auch Elektrofahrzeuge, die ihren Strom in einer Brennstoffzelle aus mitgeführtem Wasserstoff selbst generieren. Der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen steigert die Energieeffizienz und reduziert Schadstoffemissionen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Brennstoffzellenfahrzeuge haben eine vergleichbare Reichweite und ähnlich kurze Tankzeiten wie Benzin- und Dieselfahrzeuge. Getankt wird Wasserstoff, der über die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt wird.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die chemische Energie eines Brennstoffes – wie Wasserstoff, Erdgas oder Methan – in Strom, Wärme und Wasser wandeln. Ihr Betrieb mit Wasserstoff ist am Einsatzort emissionsfrei. Das Einsatzspektrum ist sehr vielseitig, vom E-Antrieb für Fahrzeuge und Schiffe über die Strom- und Wärmeversorgung im häuslichen Keller bis hin zur Notstromversorgung. Aus einer Vielzahl von Technologien hat sich die wasserstoffbetriebene Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM) als die am vielfältigsten einsetzbare Variante herauskristallisiert. Darüber hinaus sorgen erdgasbetriebene Brennstoffzellen in der stationären Hausenergieversorgung hocheffizient und umweltschonend für Wärme und Strom.



Das ZSW ist spezialisiert auf fortschrittliche Elektrolyseverfahren und PEM-Brennstoffzellen. Dies reicht von der Modellierung und Simulation über die Entwicklung automatisierter Herstellverfahren sowie Demonstrations- und Testsystemen bis zur Überprüfung der Betankungs- und Gasqualität an Wasserstofftankstellen.

// Mobilität und Energiespeicherung mit Wasserstoff: Wasserstoff – von der Erzeugung zum Kraftstoff



Die saisonale Speicherung regenerativen Stroms und ein klimafreundlicher Verkehrssektor zählen zu den größten Herausforderungen der Energiewende. Das ZSW stellt sich beiden Themen, indem es Verfahren zur Herstellung und Verwendung entsprechender Brenn- und Kraftstoffe entwickelt. Im Fokus stehen dabei Wasserstoff (Elektrolyse) und Methan (P2G) auf der Basis von Ökostrom.

// Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse

Wasserstoff (H₂) gilt als *der* Sekundärenergieträger der Zukunft zur Speicherung und sektorübergreifenden Bereitstellung großer Strommengen aus erneuerbaren Energien. Er kann rückverstromt oder sektorübergreifend als emissionsfreier Kraftstoff für Brennstoffzellen dienen oder als Ausgangsstoff in der Chemieproduktion, und er kann zu kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern, den sogenannten E-Fuels, weiterverarbeitet werden. Dies sind synthetische Kraftstoffe, die aus Wasserstoff und Kohlendioxid (CO₂) über den Power-to-Gas- oder Power-to-Liquid-Prozess hergestellt werden.

Das ZSW erforscht die Technologie der elektrochemischen Wasserstoffherzeugung umfassend – von der Entwicklung energieeffizienter Elektroden über die Konzeption fortschrittlicher Anlagenkonzepte bis zum Bau und Betrieb entsprechender Forschungs- und Demonstrationsanlagen. Dazu zählen atmosphärische wie auch Druck-Elektrolyseure im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt für Teststände sowie Demonstrationsanlagen mit Leistungen bis in den Megawatt-Bereich.

Bei der Wasserelektrolyse haben sowohl die klassische Technologie mit alkalischem Elektrolyt als auch das Verfahren mit Polymermembran (PEM) als Elektrolyt hohes Zukunftspotenzial. Der Fokus der Arbeiten am ZSW liegt in beiden Fällen auf der Entwicklung kostengünstiger Katalysatoren, der Optimierung von Zell- und Blockdesign, der Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlagen sowie auf der Entwicklung innovativer Elektrodenmikrostrukturen.

// Power-to-Gas (P2G)

Im Rahmen von Power-to-Gas-Konzepten wird überschüssiger erneuerbarer Strom durch Elektrolyse in Wasserstoff (H₂) konvertiert. Bei Bedarf kann dieser zusammen mit Kohlendioxid aus biogenen Quellen wie Biogasanlagen in Methan (CH₄) umgewandelt werden – den Hauptbestandteil von Erdgas. Beide Gase, H₂ und CH₄, lassen sich ins Erdgasnetz einspeisen und dort über Monate verlustfrei speichern.

Außerdem lassen sich die Gase aus dem P2G®-Prozess direkt zum Antrieb von Brennstoffzellen- bzw. Erdgasautos nutzen. Durch weitere Verfahren in Anlehnung an P2G® können auch andere Kraftstoffe (E-Fuels) produziert werden, z. B. synthetisches Kerosin für Flugzeuge, Flüssiggas für Schiffe oder synthetisches Benzin bzw. Diesel für den Schwerlastverkehr.

Das ZSW nutzt gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie das Verfahren seit Jahren: Bereits im Jahr 2009 wurde am Institut eine 25-Kilowatt-Anlage konstruiert sowie 3 Jahre später eine 250-Kilowatt-Anlage, die flexibel auf das rasch wechselnde Stromangebot aus Wind und Sonne sowie auf plötzliche Unterbrechungen reagieren kann. Auch eine industrielle P2G®-Anlage mit 6 Megawatt Anschlussleistung ist mithilfe des ZSW in Betrieb gegangen. Darüber hinaus ist das ZSW am Reallabor für strombasierten Wasserstoff am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein beteiligt, das zunächst für eine elektrische Anschlussleistung von insgesamt 1,3 Megawatt konzipiert ist.



// Wasserstoff (H₂) als Kraftstoff

Parallel zur Markteinführung der ersten Brennstoffzellen-Serienfahrzeuge erfolgt weltweit der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und -tankstellen. Standard zum Tanken des Gases sind 700 bar Wasserstoffdruck. Die exakte Bestimmung der abgegebenen Mengen des gasförmigen Kraftstoffes erfordert allerdings im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen ganz neue Methoden und Technologien.

Bei der Wasserstoff-Herstellung, dem Transport zur Tankstelle, beim Verdichten des Gases oder während der Betankung können Verunreinigungen auftreten, die Brennstoffzellen schädigen können. Die Wasserstoffqualität an den Tankstellen muss deshalb vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und danach regelmäßig überprüft werden.

Das ZSW ist mit seiner langjährigen Erfahrung in der Brennstoffzellentechnik und der Nutzung von Wasserstoff in mehrere Projekte zum Aufbau einer europäischen Wasserstoff-Infrastruktur eingebunden. Die Expertise liegt bei der Überprüfung der internationalen Betankungs- und Wasserstoffstandards nach SAE J2719 bzw. ISO 14687-2 von unabhängiger Stelle. Hierfür wurde vom ZSW ein mobiles Abnahmesystem mit Online-Monitoring entwickelt und ein Wasserstoff-Labor mit geeigneter Analytik aufgebaut.

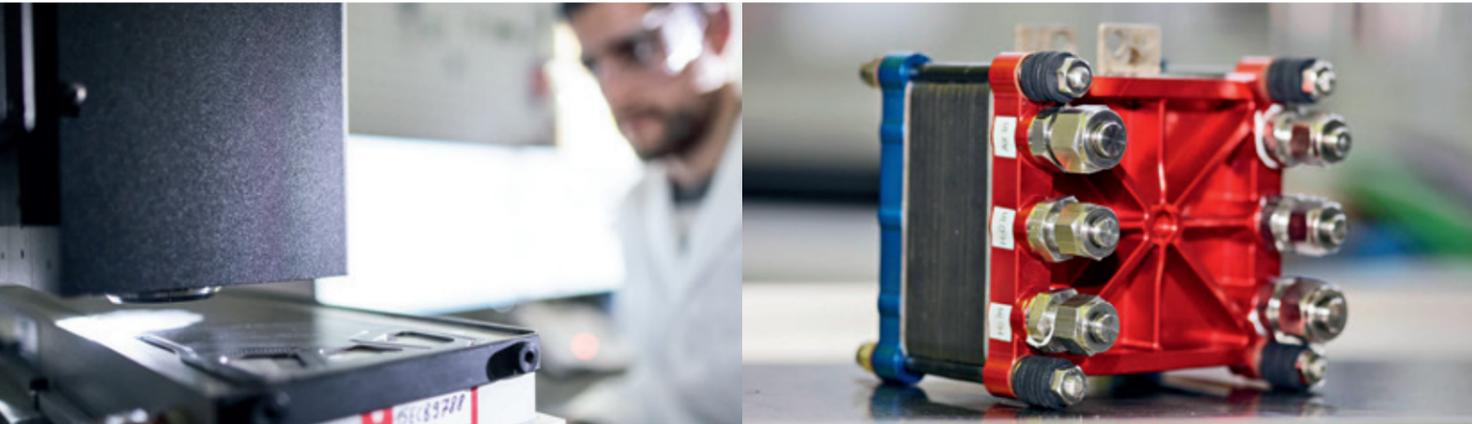


Bis 2025 sollen die heute weltweit rund 260 H₂-Tankstellen auf 3.500 Stationen ausgebaut werden, 600 davon in den USA, 830 in Asien und 2.000 in Europa. Deutschland plant bis 2025 die aktuell rund 50 Stationen auf 400 zu erweitern. Die Zahl der Brennstoffzellen-Fahrzeuge soll von heute rund 6.500 auf über 300.000 ansteigen.

Nähere Infos unter



// Mobilität und Energiespeicherung mit Wasserstoff: Brennstoffzellen-Technologie



// Optimierung von Brennstoffzellen

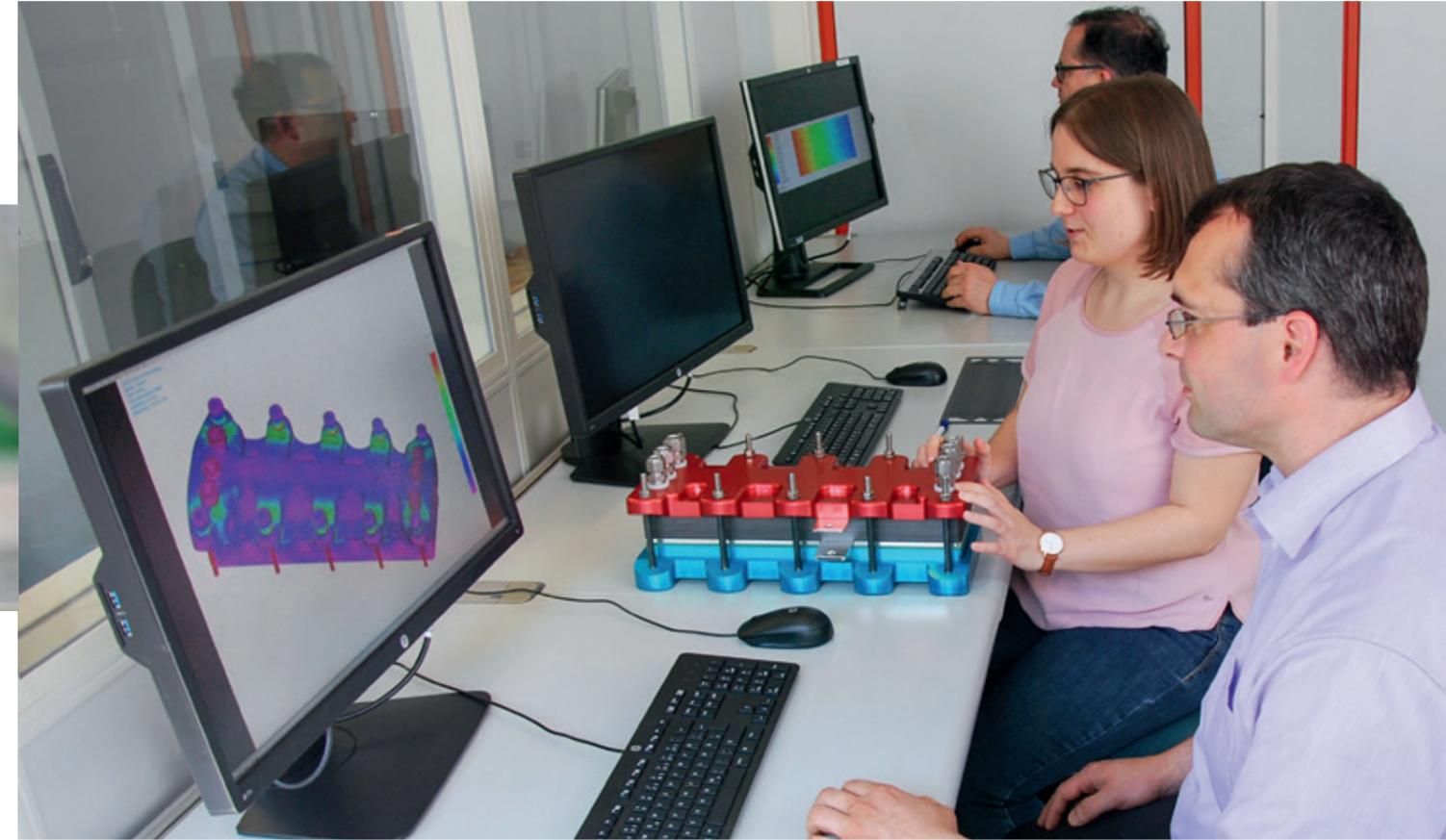
Bei Brennstoffzellen für die Mobilität kommt es auf höchste Leistungsdichten, gute Kaltstarteigenschaften sowie eine lange Lebensdauer bei hochdynamischem Betrieb an. Dafür müssen kostengünstige Bauteile entwickelt, aufeinander abgestimmt und funktional optimiert werden. Das ZSW optimiert Brennstoffzellen in Bezug auf Leistung, Wirkungsgrad, Lebensdauer und Kompaktheit, der Schwerpunkt liegt auf Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) – von der Elektrode bis zur Bipolarplatte (BPL).

Spezialgebiete des ZSW sind die Charakterisierung und Leistungs-optimierung sowie die Standzeiterhöhung. Dieses beinhaltet insbesondere Arbeiten zu fortschrittlichen Herstelltechniken, zur Struktur- und Oberflächenbeschaffenheit von Materialien – einschließlich der Abschätzung von Alterungsprozessen – und Fehleranalysen. Auf experimenteller Ebene werden Funktionsmaterialien, Elektroden- sowie Membran-Elektroden-Anordnungen (MEAs) erforscht. Die Bestimmung der Beständigkeit von Dichtungen, Gasdiffusionslagen oder Bipolarplatten sind ein weiteres Forschungsthema. Das schließt die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels spezieller Simulationssoftware für Brennstoffzellen ein.

// Fertigungstechnologie für Brennstoffzellen

Brennstoffzellen-Stacks für Fahrzeuge sollen hohe Anforderungen bezüglich Bauvolumen (<30 Liter) und Leistung (100 kW Dauerleistung) erfüllen. Mehrere hundert Bauteile müssen hierfür exakt montiert und verklebt werden. Das ist nur noch maschinell realisierbar, jedoch ist die notwendige Fertigungstechnologie weltweit noch in einem frühen Stadium.

Aufgabe der Forschung am ZSW ist es, Methoden zur Qualitätssicherung von Bauteilen und zur hochpräzisen maschinellen Assemblierung von Brennstoffzellen und Stacks zu entwickeln. Exemplarische Themen sind Fügetechniken und Herstellprozesse für Zellen sowie die roboterunterstützte Stack-Montage und -prüfung. Dabei kommen langjährige Erfahrung aus zahlreichen Forschungsvorhaben und beim Bau von über 1.000 Prototypen in unterschiedlichen Designs zum Tragen.



// Modellierung und Simulation von Elektroden und Zellen

Mathematische Modelle ermöglichen den Einblick in die physikalischen und chemischen Vorgänge innerhalb der Brennstoffzelle und liefern die Basis für völlig neue technologische Ansätze zur Stack-Konstruktion und zur Systemoptimierung. Sie sind damit auch ein wertvolles Entwicklungswerkzeug, um Optimierungen zielgerichtet durchzuführen und damit Entwicklungszeiten und -kosten zu reduzieren.

Am ZSW werden konstruktionsbegleitende sowie elektrochemische Modellierungen von Brennstoffzellenkomponenten, Stacks und Systemen mit kommerziellen und hauseigenen Simulationsmethoden durchgeführt. Der Untersuchungsbereich erstreckt sich von mikroskopischen Vorgängen wie der Wasserverteilung in

Gasdiffusionslagen mit Monte-Carlo-(MC-) und kinetischer Monte-Carlo-Simulation (KMC) über makroskopische Vorgänge (mit CFD- und FEM-Simulationen) bis zur Auslegung von kompletten Systemen (mit Ipse-Pro, Matlab-Simulink). Weitere Themen sind konstruktionsbegleitende Modellierungen an Modellkanälen und ganzen Zellen, in Halb- und Vollzellmodellierung sowie unter Einschluss von Mehrphasen-Betrachtungen, zur Medienverteilung innerhalb eines Stacks sowie zum Wasseraustragsverhalten bei verschiedenen Gasverteilerfeld-Geometrien. Die entscheidenden Verifikationen der Simulationsergebnisse erfolgen in realitätsnahen Hardware-Experimenten.



Hochleistungsbrennstoffzellen, wie sie in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen, sind extrem komplexe Konstruktionen. Hunderte von Einzelzellen, jeweils bestehend aus 20 Mikrometer dünnen und im Betrieb aufquellenden Membranen, müssen mit Bipolarplatten von 1 mm Bauhöhe mit filigranen Gasverteilerstrukturen und den Gasdiffusionslagen aus komprimierbarem, porösem Kohlefaservlies aufeinander abgestimmt und zu einem Stack zusammengefügt werden.

// Mobilität und Energiespeicherung mit Wasserstoff: Brennstoffzellen-Testzentrum



Mit der weltweit laufenden Markteinführung von Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen steigt die Nachfrage nach unabhängigen Testeinrichtungen. Speziell bei Brennstoffzellen im Straßenverkehr muss das elektrische Verhalten unter hochdynamischen Belastungszuständen im täglichen Fahrzyklus sicher funktionieren.

Um hierauf vorbereitet zu sein, baut das ZSW sein Brennstoffzellentestfeld seit 20 Jahren kontinuierlich aus. Mit dem modern ausgestatteten Prüffeld und durch langjähriges Know-how mit Brennstoffzellen-Systemtechnik ist das ZSW Partner bei der Entwicklung zukünftiger Produkte. In öffentlich geförderten Projekten werden wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen. Industriepartner nutzen diese Expertise, um ihre Produkte weiterzuentwickeln, zu qualifizieren sowie um deren Sicherheit – von unabhängiger Stelle – nachzuweisen.

Im Testzentrum können Brennstoffzellenmodule mit Wasserstoff oder Wasserstoffgemischen von 100 W bis 160 kW_{el} auf ihre Leistung getestet werden. Zur Verfügung stehen 25 Teststände, an denen rund um die Uhr kostengünstige Dauertests durchgeführt werden können. Die akkumulierte Anzahl der Betriebsstunden der Teststände von rund 40.000 Stunden jährlich belegen die Leistungsfähigkeit und Nachfrage im Testzentrum.

Es besteht auch die Möglichkeit, Tests nach vorgegebenen Verfahren wie dem internationalen Qualitätsstandard DIN IEC 62282-2 unter Einbeziehung einer „Zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS)“ durchzuführen. Parallel erfassen die Testingenieure alle Abläufe und identifizieren Parameter zur Optimierung der Brennstoffzellen. Da die Interpretation der Testergebnisse inzwischen ein sehr tiefgehendes Verständnis des Zusammenspiels von Materialien und Komponenten in den Zellen erfordert, werden die Tests mit umfangreicher Analytik und durch begleitende Simulationen ergänzt.

Nähere Infos unter



// Brennstoffzellen-Systeme

Entscheidend für den effizienten und fehlerfreien Betrieb von Brennstoffzellen-Systemen sind eine Reihe von Komponenten wie Luftverdichter, die Wasserstoff-Rezirkulation, Befeuchter und der Kühlkreislauf. Die Anforderungen unterscheiden sich ganz wesentlich je nach Anwendung, ob im Antriebsstrang von Fahrzeugen, in der Hausenergieversorgung (KWK-Anlagen), bei der netzunabhängigen Stromversorgung oder für Batterieladegeräte (Range Extender).

Das ZSW hat jahrelange Erfahrung in der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen. Die Expertise umfasst die Planung und simulationsunterstützte Auslegung, den Aufbau von Prototypen und die Charakterisierung und Qualifizierung. Weitere Themenfelder sind die Erprobung und Qualifizierung von Systemkomponenten und die Produktzertifizierung oder Sicherheitsbewertungen und Packaging-Studien im Industrienauftrag.



Das ZSW betreibt seit über 20 Jahren ein Brennstoffzellentestfeld. Mit rund 25 vollautomatisierten Testständen bis 160 Kilowatt ist es heute eines der weltweit größten Testfelder für Brennstoffzellen-Stacks an einem unabhängigen Forschungsinstitut.

// Netzintegration und Energiemanagement

Neben strategischen Weichenstellungen und ökonomischen Konzepten müssen auch die technischen Voraussetzungen geschaffen werden, um neue Technologien optimal ins Energiesystem zu integrieren. Dazu gehören neben den Leistungsprognosen für Wind und Solar und den Speichertechnologien nicht zuletzt Lösungen für die Steuerung der Nachfrage und von Zwischenspeichern, um den Stromverbrauch auf das Angebot von erneuerbaren Energien abzustimmen. Auch solche Lösungen entwickelt das ZSW.



Die Integration der Stromerzeugung aus den fluktuierenden Energiequellen Sonne und Wind in das Energiesystem gelingt über optimal gesteuerte elektrische Verbraucher sowie über das Zusammenspiel von Strom, Wärme und regenerativen Kraftstoffen. Ziel ist es, zu jedem Zeitpunkt den Verbrauch elektrischer Energie an die aktuelle Erzeugungsleistung aus regenerativen Quellen anzupassen. Für ein solches „Smart Grid“ entwickelt das ZSW sowohl Speicherlösungen als auch Steuerungsalgorithmen.

Der Begriff „Smart Grid“ steht einerseits für eine intelligente Ausstattung der Netze mit Betriebsmitteln zur Anpassung an die Fluktuationen in der Erzeugung. Dies geschieht durch Speicher, zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs und durch Energiewandler zwischen den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität. Andererseits steht der Begriff für die notwendigen neuen Geschäftsmodelle und eine Regulierung, die den Akteuren im Energiesektor Anreize und Vorgaben für den Ausbau der Infrastruktur und für den Betrieb von Lasten und Speichern im Sinne eines nachhaltigen Energiesystems schafft.

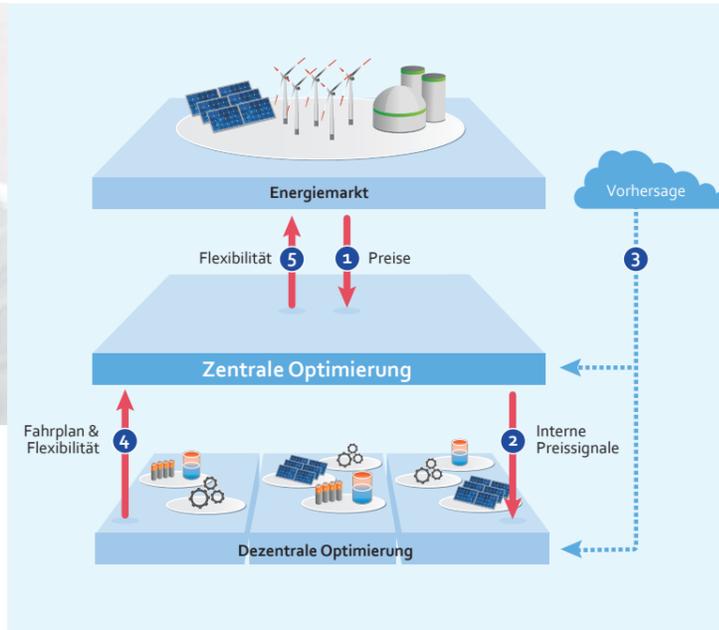
// Integration von Solarstrom ins Netz

Durch die optimierte Betriebsführung von verschiebbaren Lasten sowie elektrische und thermische Speicher kann die lokale Nutzung des Solarstroms erhöht und die Netzbelastung gesenkt werden. Im Themenfeld „Netzintegration“ am ZSW werden die Potenziale zur Eigenstromnutzung, die Auslegung von PV-Speicher-Systemen sowie Algorithmen zur Steuerung von Speichern und Anlagen untersucht und in Feldtests verifiziert. Verfahren zum Betrieb von Verteilnetzen mit hohem Anteil an Solarstrom, etwa eine kontinuierlich vorausschauende Steuerung aus einer modernen Leitwarte, oder Verfahren zur Bestimmung von Netzausbaupfaden zu minimalen Kosten sind ebenfalls Gegenstand von Forschungsprojekten. Dabei helfen Netzsimulationen sowie Prognose- und Optimierungsverfahren, die auf reale und typisierte Verteilnetze angewendet werden.



Stromerzeuger und Netzbetreiber benötigen Fahrpläne für den Netzbetrieb sowie Steuerungsmöglichkeiten für flexible Lasten und Speicher, um Erzeugung und Verbrauch jederzeit kosteneffizient ausgleichen zu können. Das ZSW erarbeitet für diese Kunden Algorithmen zur optimalen Nutzung vorhandener Netze und Energieanlagen.

// Netzintegration und Energiemanagement



// Beispiele für die Sektorkopplung

Das Energiesystem muss in einer gesamtheitlichen Betrachtung optimiert werden, die die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität umfasst. Ein Beispiel für eine solche Sektorkopplung ist das Einspeisen von aus Strom gewonnenem, regenerativem Gas ins Erdgasnetz oder seine Verwendung in Erdgasfahrzeugen. Außerdem können Wärmepumpen mit thermischen Speichern in Industrie oder Haushalten zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden. Geschieht dies zur Mittagszeit, wenn die Solarstromerzeugung auf dem Industriegebäude- oder Wohnhausdach hoch ist, wird zugleich die Spitzenleistung der PV-Einspeisung reduziert und das Netz entlastet.

Ebenso kann die typischerweise hohe Verweildauer von Fahrzeugen an Parkplätzen beim Arbeitgeber oder zuhause genutzt werden, um Elektrofahrzeuge dann aufzuladen, wenn ein hohes Stromangebot aus erneuerbaren Energien vorhanden ist. Das ZSW betrachtet mit Akteuren wie Stadtwerken oder Industrie Bedarfs- und Erzeugungsprofile und die darauf basierende Auslegung von Systemen, z. B. die Planung von Ladesäulen und deren Steuerung, die Netzauslastung und den Gewinn durch lokale Speicher. In diesem Tätigkeitsfeld sind auch die Kompetenzen des ZSW auf dem Gebiet der Einspeiseprognosen ein Gewinn für den Kunden (siehe S. 17).

// Preissignale als gemeinsame Sprache im Demand Side Management (DSM)

Im privaten Haushalt und in der Industrie gibt es eine Vielzahl von Stromverbrauchern, die geeignet sind, dem Elektrizitätsangebot entsprechend netzdienlich geregelt zu werden. So können Netzengpässe ausgeglichen, aber auch der Spitzenbedarf beim Energiebezug reduziert werden, um die Kosten für die Anschlussleistung zu senken (Demand Side Management oder DSM). Das DSM kann von einer zentralen Einheit gesteuert werden, erfordert dann jedoch für einen optimierten Einsatz detaillierte Kenntnisse über die Spezifikationen aller Verbraucher im System. Eine effiziente Alternative ist die Kommunikation über die gemeinsame Sprache „Geld“ – so kann etwa durch die Vorgabe eines Preissignals jeder Verbraucher selbst über den Zeitpunkt des Energiebezugs „entscheiden“ und so eine kostenoptimale Lösung für die DSM-Anforderung gefunden werden. Am ZSW werden mittels verschiedener Simulationstools und agentenbasierter Modelle eben diese Möglichkeiten und deren Nutzen sowohl für den Anwender als auch für die Netzintegration untersucht.



// Ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich tragfähige Konzepte für das Energiesystem

Das ZSW verfügt als Institut der angewandten Energieforschung über eine breite Expertise beim Transfer von Technologien in den Markt – sowohl auf technischer als auch auf analytischer und ökonomischer Ebene. Wie Sie in den vorausgegangenen Kapiteln erfahren haben, liefert das Institut Lösungen für Strom aus Sonne und Wind, für den Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff oder Speicher sowie für Batterien in der Elektromobilität. Erzeugungsprognosen für die Photovoltaik- und Windenergie, Detailkenntnisse zum Betrieb von Photovoltaik- und Windenergieanlagen, die Modellierung von virtuellen Kraftwerken und die Simulation von Netzen und Netzzuständen runden das technische Portfolio ab.

Die Technologieentwicklung wird begleitet und ergänzt durch übergreifende systemanalytische Fragestellungen wie das Monitoring der Energiewende oder die Entwicklung und Evaluation von Förderinstrumenten.

Diese einzigartige Kombination von technischen und ökonomischen Kompetenzen bietet den ZSW-Partnern wertvolle Unterstützung bei ihren Projekten für die Transformation unseres Energiesystems.



Die Kopplung der Sektoren Verkehr, Wärme und Strom schafft Flexibilitäten zur Entlastung der Elektrizitätsnetze bei gleichzeitiger Minderung von Treibhausgasemissionen – daran arbeitet das ZSW.

Nähere Infos unter



// Partner für Wirtschaft, Forschung und Politik

Das ZSW blickt auf 30 Jahre vertrauensvolle Zusammenarbeit mit zahlreichen Akteuren aus Industrie, Forschung und Politik zurück. Das Spektrum der Kooperationspartner ist breit: Branchen wie der Maschinenbau für die Herstellung von Solarmodulen oder die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien, die Automobil- und Zulieferindustrie, kommunale Unternehmen und Energieversorger, Landes- und Bundesministerien, Verbände und viele andere gehören dazu.

Diese Kunden schätzen das Verständnis der ZSW-Experten für die Abläufe in der Industrie und ihre flexible und unkomplizierte Auftragsbearbeitung, gekoppelt mit einem ganzheitlichen Know-how: Es reicht vom Materialwissen über die Entwicklung von Produktionsverfahren bis hin zu anwendungsspezifischen Tests und Systemlösungen. Dabei arbeiten sie in einem breiten Netzwerk von universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen und sind damit auch bestens auf die Technologien der nächsten und übernächsten Generation vorbereitet.

Hinzu kommt die systemanalytische Kompetenz des ZSW mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung von Szenarien und Förderinstrumenten oder der Anfertigung von Marktstudien. Für Ministerien auf Landes- und Bundesebene sowie für die EU erstellt das Institut Berechnungen, Gutachten und Analysen. Ein Beispiel ist die Mitarbeit in der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, die das regelmäßige Monitoring zur Energiewende der Bundesregierung kommentiert und wissenschaftlich begleitet.

Sprechen Sie uns an – nebenstehend finden Sie unsere Kontaktadressen.

Impressum

// Herausgeber

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Telefon: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

E-Mail: info@zsw-bw.de
Internet: www.zsw-bw.de

// Rechtsform

Das ZSW wurde 1988 als gemeinnützige Stiftung bürgerlichen Rechts gegründet.

// Redaktion

Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Annette Stumpf

// **Layout & Satz**
Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de

Der Jahresbericht wurde auf FSC-zertifiziertem Papier gedruckt.

// Förderung

Das ZSW erhält eine Grundfinanzierung vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg. Viele Infrastruktur- und Forschungsprojekte werden von verschiedenen Ministerien des Landes und des Bundes sowie von der Europäischen Union gefördert.

// Bildnachweis

Alle Abbildungen, soweit nicht anderweitig gekennzeichnet, sind © ZSW. Veröffentlichung und auszugsweise Verwendung sind ohne ausdrückliche Genehmigung des Herausgebers nicht zulässig. Zuwiderhandlung wird rechtlich verfolgt.
Sonstige Bildnachweise:
S. 10: NICE Solar Energy
S. 11, li.: Fotolia / Ingo Bartussek
S. 11, re.: Ulrich Mertens Atelier für Kunst und Fotografie (u.mertens@visuelle-konzept.de), VG Bild-Kunst Urheber Nr. 281843;
S. 13 re.: Hanergy; S. 26: The Linde Group;
S. 39 o.li.: Jens Willebrand.

// Standorte



// Stuttgart

Photovoltaik (mit Modultestlabor Solab), Energiepolitik und Energieträger, Zentralbereich Finanzen, IT, Personal & Recht

Meitnerstraße 1 | 70563 Stuttgart

Ansprechpartnerin Claudia Brusdeylins
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Telefon: +49 711 7870-278
E-Mail: claudia.brusdeylins@zsw-bw.de



// Widderstall Solar-Testfeld

Widderstall 14 | 89188 Merklingen



// Ulm

Elektrochemische Energietechnologien (Batterien und Brennstoffzellen), Hauptgebäude

Helmholtzstraße 8 | 89081 Ulm

Ansprechpartnerin Tiziana Bosa
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Telefon: +49 731 9530-600
E-Mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de



// Ulm eLaB

Labor für Batterietechnologie (eLaB)

Lise-Meitner-Straße 24 | 89081 Ulm

www.zsw-bw.de



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-
Forschung Baden-Württemberg (ZSW)