

Forschende am Fraunhofer ILT: Tim Rörig, Florian Ribbeck und Stoyan Stoyanov (v.l.). Bild: Fraunhofer ILT

Festkörperbatterie: Vom Labor zur industriellen Fertigung

Laserprozesse als Enabler

IN KÜRZE

Florian Ribbeck, Stoyan Stoyanov

Lithium-Ionen-Batterien sind der Standard für elektrische Energiespeicher – von Unterhaltungselektronik über Elektromobilität bis hin zu stationären Speichern. Sie haben in den vergangenen Jahren eine beachtliche Entwicklung durchlaufen, doch die Technologie stösst nun an physikalische Grenzen. Die Energiedichte wächst nur noch langsam, die Sicherheit bleibt wegen flüssiger Elektrolyte eingeschränkt, und die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen wie Nickel, Mangan oder Kobalt besteht nach wie vor. Festkörperbatterien gelten daher als nächste Generation elektrochemischer Speicher. Sie versprechen höhere Energiedichten (Bild 1), grössere Sicherheit, ein breiteres Temperaturfenster dank fester Elektrolyte sowie neue Freiheitsgrade im Zellaufbau (Bild 2).

Noch stehen sie aber vor der industriellen Reife. Materialien wie Lithium-Metall und sulfidhaltige Elektrolyte erfordern neue Prozessstrategien, und die Fertigung verlangt Investitionen in Trocken- oder Inertgasumgebungen. Hier kann die Lasertechnik entscheidende Beiträge leisten, etwa durch selektives Sintern von Festelektrolyten, Strukturierung von Grenzflächen und das berührungsfreie Trennen duktiler Metalle. Damit kann sie sich als Schlüsseltechnologie auf dem Weg von der Laborzelle zur industriellen Festkörperbatterie erweisen.

Potenziale und Anwendungen

Diverse Hersteller treiben derzeit die Entwicklung von Festkörperzellen voran. Asiatische Firmen wie Toyota, BYD, Samsung SDI und SVOLT haben ambitionierte Zeitpläne für Pilotproduktionen ab 2027 veröffentlicht. Auch europäische Automobilhersteller wie Mercedes-Benz und Stellantis erproben mit Partnern erste Semi-Solid-State-Konzepte, während Nissan in Yokohama bereits eine Pilotfabrik errichtet. Die Technologie nähert sich also der industriellen Umsetzung.

«Der zentrale Vorteil von Festkörperbatterien liegt in ihrer intrinsischen Sicherheit», erklärt der Physiker Stoyan Stoyanov aus der Gruppe Trennen vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT. «Da sie auf flüssige Elektrolyte verzichten, entfällt das Risiko von Leckagen oder thermisch bedingten Brandereignissen. Zudem hemmt die hohe mechanische Stabilität vieler Festelektrolyte die Ausbildung von Lithium-Dendriten, die in konventionellen Zellen die Hauptursache für interne Kurzschlüsse sind.»

Neben der Sicherheit treibt vor allem die höhere Energiedichte das Interesse an. Lithium-Metall-Anoden mit einer spezifischen Kapazität von 3860 $mAhg^{-1}$ übertreffen Grafit-Anoden um ein Vielfaches. In Kombination mit dünnen, festen Elektrolyten lassen sich so Reichweiten- und Gewichtsvorteile erzielen, ein entscheidender Faktor für Elektromobilität und Luftfahrt.

Erste Anwendungsfelder entstehen dort, wo maximale Sicherheit und Leistung entscheidend sind: in der Luft- und Raumfahrt, im Motorsport, in der Medizintechnik oder in Hochsicherheits-Datenspeichern. Hier rechtfertigt die höhere Energiedichte die komplexe Fertigung. Für den Massenmarkt bleibt die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit zunächst begrenzt. Die Produktionsinfrastruktur ist im Aufbau, und etablierte Lithium-Ionen-Systeme entwickeln sich parallel weiter. «Festkörperbatterien werden auf absehbare Zeit parallel zu konventionellen Lithium-Ionen-Zellen existieren und vor allem besonders anspruchsvolle Anwendungen bedienen, in der Automobilindustrie etwa den Markt der Oberklassefahrzeuge», meint Stoyanov.

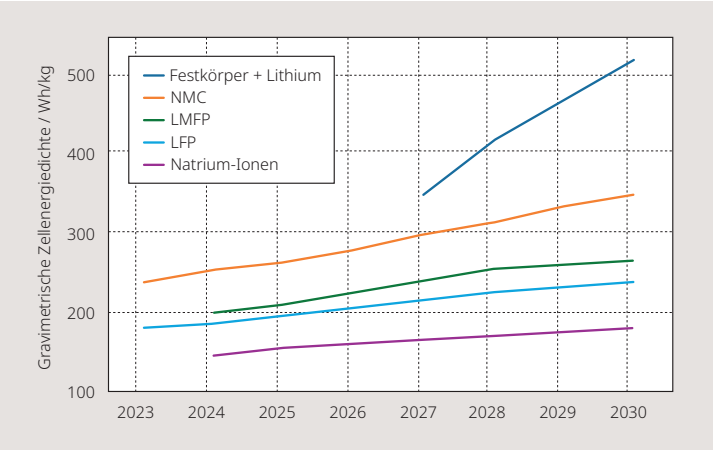


Bild 1 Entwicklung der gravimetrischen Zell-Energiedichte bis 2030 für verschiedene Batterietypen. Bild: Fraunhofer ILT

Herausforderungen in der Fertigung

So vielversprechend die Potenziale der Festkörperbatterie sind, so gross sind die Hürden bei der industriellen Umsetzung. Besonders der Umgang mit Lithium-Metall-Anoden ist anspruchsvoll: Das Material ist zwar wegen seiner hohen spezifischen Kapazität attraktiv, erweist sich in der Verarbeitung jedoch als extrem empfindlich. Es reagiert stark mit Sauerstoff und Feuchtigkeit, bildet leicht Passivschichten und kann sich bei mechanischer Belastung entzünden. Konventionelle Schneid- oder Walzverfahren stossen hier schnell an ihre Grenzen.

Auch bei den Festelektrolyten treten grundlegende Schwierigkeiten auf. Oxidkeramische Materialien wie Lithium-Lanthan-Zirkonat (LLZO) müssen bei rund 1200 °C gesintert werden. Dabei kommt es oft zu Lithiumverlusten und Nebenphasen, welche die Ionenleitfähigkeit mindern. Solche Verluste sind nicht nur ein technologisches, sondern auch ein

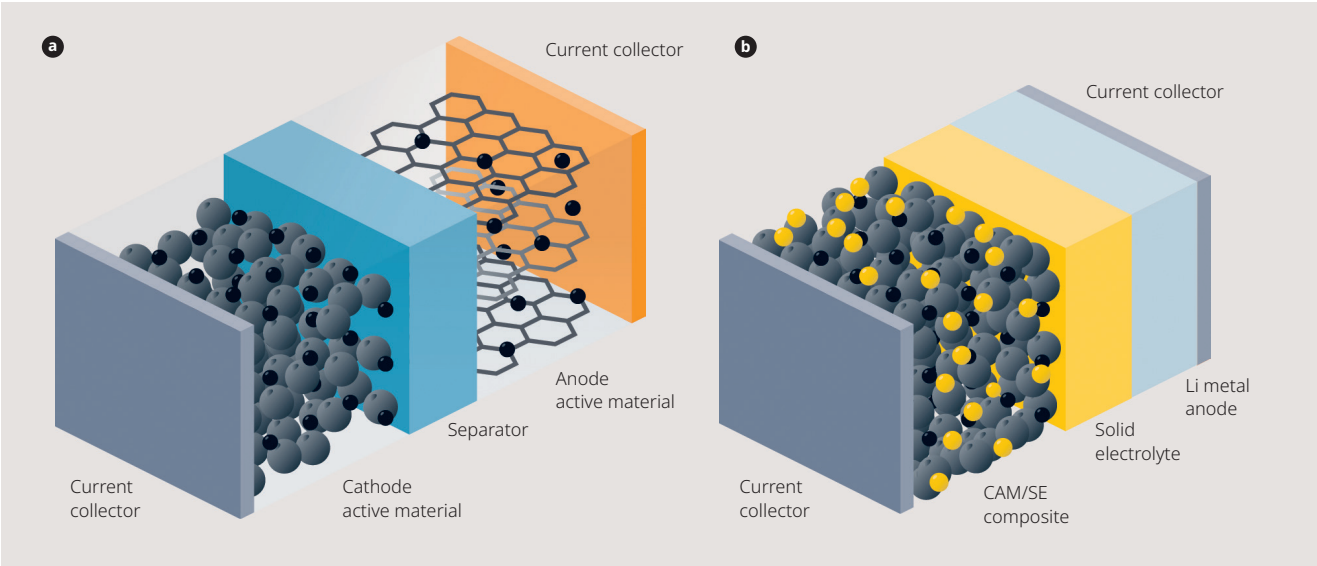


Bild 2 Zellaufbau im Vergleich. **a)** Li-Ionen-Zelle mit flüssigem Elektrolyten; **b)** Zelle mit festem Elektrolyten. Bild: Fraunhofer ISI

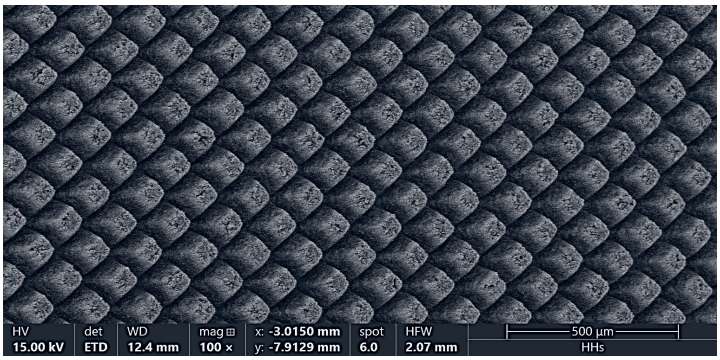


Bild 3 REM-Aufnahme einer mittels Ultrakurzpulslaser erzeugten Mikrostruktur auf der Oberfläche eines Festelektrolyten.

Bild: Fraunhofer ILT

wirtschaftliches Problem, da sie teure Rohstoffe unbrauchbar machen. Mit sogenannten Opferpulvern lassen sich diese Effekte zwar teilweise kompensieren, der Prozess bleibt aber komplex und empfindlich gegenüber kleinsten Schwankungen.

«Ein weiteres Nadelöhr ist die Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Anode. Hohe Übergangswiderstände mindern die Leistungsfähigkeit und erhöhen die Gefahr von Inhomogenitäten beim Lithium-Plating und -Stripping. Die Beherrschung dieser Grenzflächenchemie ist die Basis für stabile und langlebige Zellen», erklärt Florian Ribbeck aus der Gruppe Hochtemperatur-Funktionalisierung am Fraunhofer ILT.

Neben diesen materialspezifischen Aspekten stellen die Produktionsbedingungen selbst eine grosse Herausforderung dar. Festkörperbatterien erfordern durchweg Inertgas- oder Trockenraumatmosphären, die hohe Investitionen in die Infrastruktur bedingen. Erste Analysen zeigen, dass im industriellen Hochlauf Ausschussraten von bis zu 30% auftreten können, was Verluste in Millionenhöhe pro Tag nach sich zieht.

Schon bei etablierten Lithium-Ionen-Linien ist die hohe Ausschussrate ein akutes Problem. Bei Festkörperzellen verstärkt sich dieses Problem, da für die noch nicht standardisierten Materialien bislang keine geschlossenen Recyclingpfade existieren. Jeder defekte Prototyp bedeutet daher nicht nur ökonomischen Schaden, sondern auch den Verlust von wertvollen Rohstoffen. «Laserbasierte Verfahren können hier dazu beitragen, die Prozessstabilität zu erhöhen und Ausschuss von vornherein zu vermeiden», sagt Ribbeck.

Lasersintern von Festelektrolyten

Ein Forschungsansatz am Fraunhofer ILT ist die Verarbeitung oxidkeramischer Festelektrolyte wie LLZO. Dieses Material gilt als besonders vielversprechend, da es gegenüber Lithium-Metall-Anoden eine hohe elektrochemische Stabilität aufweist und im Vergleich zu sulfidhaltigen Elektrolyten weniger reaktiv gegenüber Umgebungsbedingungen ist.

«Am Fraunhofer ILT untersuchen wir, wie sich Laserstrahlung als lokal begrenzte und hochdynamische Energiequelle nutzen lässt, um LLZO-Schichten gezielt zu verdichten», erklärt Florian Ribbeck. «Der Vorteil liegt in der schnellen Aufheizung bei gleichzeitig kontrollierter Abkühlung. So lassen sich Lithiumverluste reduzieren und Temperaturinkompatibilitäten im Zellverbund vermeiden.»

Erste Experimente zeigen homogene Verdichtungen, auch wenn Rissbildung und Delaminationen weiterhin ein zentrales Forschungsthema bleiben. Neben LLZO werden NASICON-artige Elektrolyte wie Lithium-Aluminium-Titan-Phosphat (LATP) untersucht, die ähnliche Prozessanforderungen, aber andere Stabilitätsfenster aufweisen.

Laserstrukturierung für bessere Grenzflächen

Neben der Verdichtung der Elektrolytschichten ist die Qualität der Grenzfläche zur Lithium-Metall-Anode entscheidend für die Leistungsfähigkeit von Festkörperzellen. «Hier treten oft hohe Übergangswiderstände auf, die das elektrochemische Verhalten limitieren», erläutert Tim Rörig aus der Gruppe Oberflächenstrukturierung am Fraunhofer ILT die Herausforderung. «Ausserdem erschwert die geringe Benetzbarkeit der Keramikoberflächen eine homogene Lithiumabscheidung.»

Rörig und Ribbeck untersuchen daher, wie sich die Grenzflächen durch gezielte Laserstrukturierung optimieren lassen. Mit ultrakurzen Laserpulsen im Femtosekundenbereich bringen sie Mikrostrukturen in die Oberfläche des Festelektrolyten ein (Bild 3). Diese Strukturen erhöhen die effektive Kontaktfläche und begünstigen eine gleichmässigere Verteilung des Stroms, wodurch sich die Grenzflächenimpedanz potenziell reduzieren lässt. «Wir haben gezeigt, dass sich reproduzierbare Strukturen im Bereich von rund 30 µm erzeugen lassen», erklärt Rörig.

Die bisherigen Ergebnisse verdeutlichen jedoch auch die Komplexität der Wechselwirkung. Während die strukturierten Oberflächen in einzelnen Fällen eine verbesserte Benetzung zeigten, stieg der Gesamtwiderstand der Zelle mitunter an. Die Forscher vermuten, dass dabei sowohl Veränderungen der Kristallstruktur als auch prozessbedingte Defekte eine Rolle spielen.

Mit Raman-Spektroskopie und weiteren analytischen Verfahren charakterisieren die Forschenden derzeit die strukturellen Veränderungen im Kristallgitter nach der Laserbearbeitung. Parallel untersuchen sie das gezielte Li-Plating, um die Kontaktierung besser zu steuern, sowie Konzepte sogenannter «anodeless batteries», bei denen das Lithium erst beim ersten Ladeprozess abgeschieden wird.

Lasertrennen von Lithium-Metallelektroden

Ein weiterer Schwerpunkt am Fraunhofer ILT liegt auf der Trennung von Lithium-Metallfolien für den Einsatz als Anodenmaterial. «Lithium-Metall gilt als zentrale Komponente für die nächste Generation von Hochenergiezellen, stellt die Fertigungstechnik

jedoch vor erhebliche Herausforderungen», erläutert Stoyan Stoyanov. «Das Material ist weich, hochadhäsiv und extrem reaktiv. Konventionelle mechanische Verfahren wie Rollmesser oder Stanzen führen schnell zu Verschmierungen, Verkleben der Werkzeuge und inhomogenen Schnittkanten.» Darüber hinaus seien mechanisch nur lineare Schnittgeometrien realisierbar, was die Flexibilität im Zelllayout stark einschränkt. Die Lasertechnik eröffnet hier neue Möglichkeiten. Als kontaktloses und verschleissfreies Verfahren ermöglicht sie präzise Schnitte und erlaubt flexible Konturen.

Doch sowohl mechanische als auch laserbasierte Prozesse erfordern eine Verarbeitung ausschliesslich in abgeschlossenen Inertgas- oder Trockenraumatmosphären. Diese sind für den sicheren Umgang mit Lithium zwingend erforderlich, bringen jedoch eigene verfahrenstechnische Herausforderungen mit sich. «Argon eignet sich besonders gut, weil es die Oxidation verhindert und dadurch gleichmässige Kanten ermöglicht, ist aber kostspielig», erklärt Stoyanov. «Stickstoff ist zwar deutlich günstiger, führt aber zur Bildung von Lithium-Nitriden. Atmosphären mit Wassergehalt begünstigen dagegen Oxide und Hydroxide.» Solche Reaktionsprodukte erhöhen den Energiebedarf des Prozesses und können zugleich die elektrochemischen Eigenschaften der Elektrode verschlechtern.

Es laufen zwar bereits Studien, die auf kostengünstigere Prozessumgebungen abzielen und dabei den Ablauf der Wechselwirkungen an der Lithiumoberfläche besser kontrollieren sollen. «Diese Ansätze stehen jedoch noch ganz am Anfang. In unserem eigenen Labordemonstrator setzen wir deshalb auf eine reine Argon-Atmosphäre mit einem Taupunkt unter –70 °C. Andere Gasumgebungen lassen sich prinzipiell aber ebenfalls realisieren.»

Eine zusätzliche Herausforderung besteht darin, Partikel und Spritzer zu vermeiden, die beim Laserprozess entstehen können. Sie beeinträchtigen die Oberflächenqualität und führen zu Defekten im späteren Zellverbund. Deshalb entwickeln Stoyanov und sein Team Prozessstrategien, um die Ablation gezielt zu steuern und Emissionen effizient abzuführen.

Ultrakurzpulslaser, die mit Pulsdauern im Picosekundenbereich arbeiten, sind eine Option, um qualitativ hochwertige Schnittkanten zu erhalten, die frei von kritischer Bartbildung sind und eine minimale wärmebeeinflusste Zone aufweisen. Das Team untersucht auch technologisch einfacher zu integrierende und wirtschaftlich interessante Optionen wie den Einsatz von Nanosekunden-Lasern, die bei geringeren Investitionskosten eine akzeptable Schnittqualität ermöglichen. Parallel arbeiten die Forschenden an Konzepten zur Integration der Laserprozesse in skalierbare Produktionsumgebungen, etwa mithilfe kompakter Mini-Environments, die gezielt mit Inertgas gespült werden können.

Brücke zur industriellen Umsetzung

Die Überführung von Festkörperbatterien aus dem Labor in die industrielle Fertigung erfordert nicht nur neue Materialien, sondern vor allem belastbare Prozesse. Hier bietet die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen eine wertvolle Referenz. Viele Prozessschritte von der Elektrodenfertigung über die Zellassemblierung bis hin zur Endbearbeitung sind vergleichbar, wenngleich die Anforderungen bei Festkörperzellen deutlich höher ausfallen.

Lasertechnologien sind in der Lithium-Ionen-Fertigung bereits etabliert. Sie kommen beim Laserslitting zum Einsatz, also dem präzisen Längsteilen von Elektrodenfolien, beim Lasertrocknen, um Lösungsmittel schnell und energieeffizient zu entfernen, oder beim Lasernotching, dem Ausklinken der Stromableiter. Diese Erfahrungen lassen sich in weiten Teilen auf Festkörperzellen übertragen. Allerdings steigen die Ansprüche an Präzision, Reinheit und Materialstabilität erheblich: selbst kleinste Partikel, Defekte oder chemische Veränderungen können die Funktion der Zellen beeinträchtigen. Mit Lasertechnologien lassen sich die im Labor entwickelten Prozessketten in eine industrielle Logik übertragen. Wo heute noch hohe Ausschussraten und lange Anlaufzeiten dominieren, können laserbasierte Verfahren einen entscheidenden Beitrag leisten, die Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Festkörperbatterien zu sichern.

Ausblick

Festkörperbatterien werden die etablierten Lithium-Ionen-Zellen nicht so schnell verdrängen, auch wenn sie neue Perspektiven für Anwendungen eröffnen, die höchste Anforderungen an Sicherheit und Energiedichte stellen. «Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Hochleistungsfahrzeuge oder eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, die sogenannte USV, für Rechenzentren und Krankenhäuser sind Beispiele, in denen die Vorteile fester Elektrolyte den Mehraufwand rechtfertigen», meint Stoyan Stoyanov. Mittel- bis langfristig könnte mit sinkenden Produktionskosten auch der Schritt in breitere Märkte gelingen.

Für Europa ergibt sich hier eine besondere Chance. Während der Massenmarkt für Lithium-Ionen-Zellen stark von asiatischen Herstellern geprägt ist, besteht im Bereich der Festkörpertechnologie noch kein gefestigtes industrielles Monopol. Unternehmen und Forschungseinrichtungen können sich frühzeitig positionieren, Standards mitgestalten und neue Wertschöpfungsketten aufbauen.

Autoren
Florian Ribbeck ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Experte für Batterietechnologien am Fraunhofer ILT.
> Fraunhofer ILT, DE-52074 Aachen
> florian.ribbeck@ilt.fraunhofer.de

Stoyan Stoyanov ist Expert Scientist in der Gruppe Trennen am Fraunhofer ILT.
> stoyan.stoyanov@ilt.fraunhofer.de