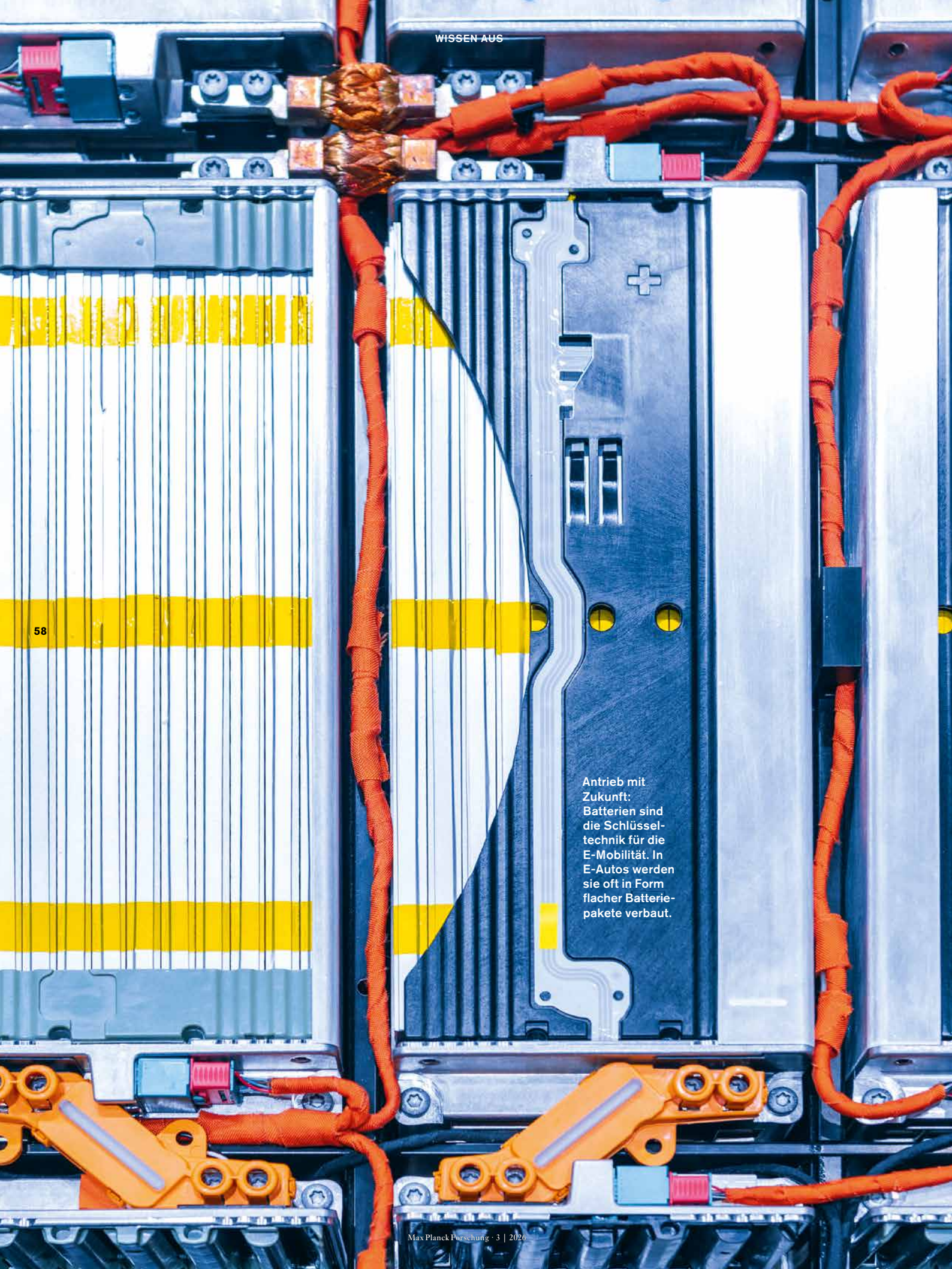


Antrieb mit Zukunft: Batterien sind die Schlüsseltechnik für die E-Mobilität. In E-Autos werden sie oft in Form flacher Batteriepakete verbaut.

Geballte Ladung

Leistungsfähige und kostengünstige Stromspeicher sind entscheidend, damit die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen wie Windkraft und Photovoltaik umgestellt werden kann. Daher sind Batterien Gegenstand der Hightech-Strategie der Bundesregierung, und weltweit – auch an verschiedenen Max-Planck-Instituten – versuchen Forschende, mehr aus Batterien herauszuholen und ganz neue Konzepte zu entwickeln.

Text:
Peter Hergersberg

Es ist ein Rennen, bei dem es mehrere Sieger geben wird. Weltweit arbeiten Wissenschaft und Industrie daran, Batterien immer leistungsfähiger, preiswerter, nachhaltiger und sicherer zu machen. Denn Batterien sind unverzichtbar, wenn es darum geht, von fossilen Brennstoffen wegzukommen und die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen, vor allem auf Wind und Sonne, umzustellen. Sie werden für die E-Mobilität und als stationäre Speicher sowohl im Stromnetz als auch in Privathaushalten gebraucht.

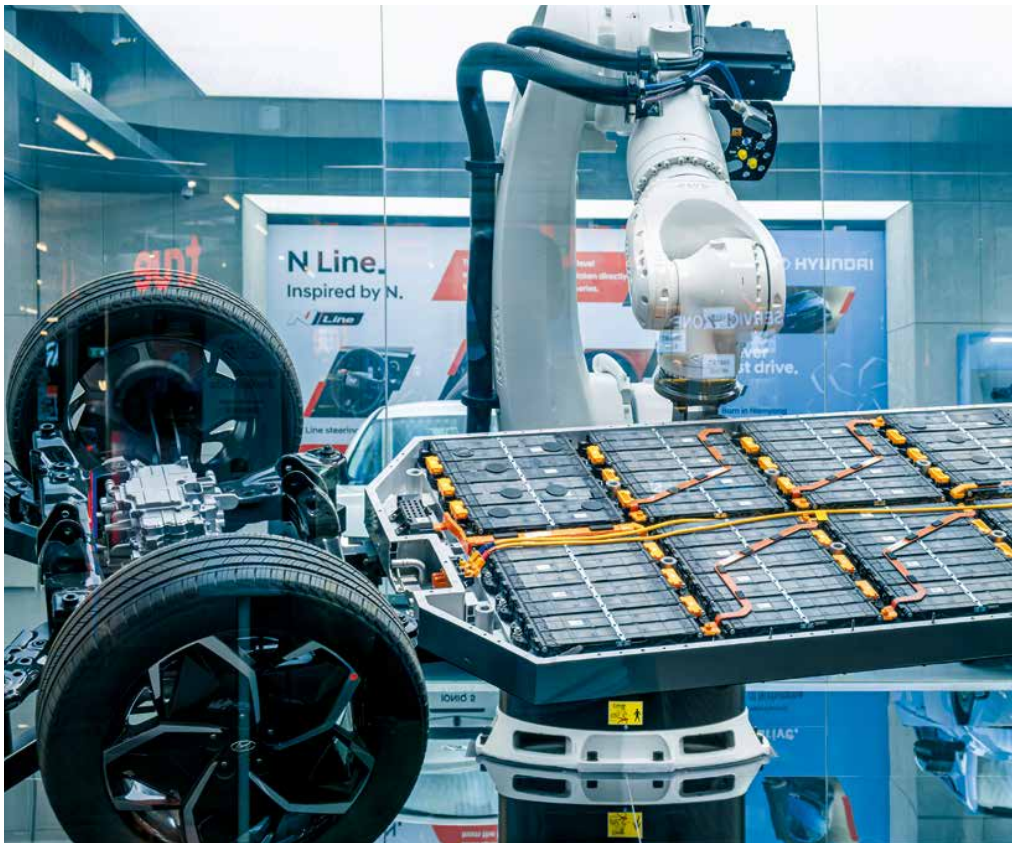
Derzeit setzt die Industrie auf verschiedene Batterietypen, und Forschende in der ganzen Welt versuchen, die Stromspeicher immer besser zu machen. Sie tüfteln aber auch an neuen Konzepten. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an verschiedenen Max-Planck-Instituten beteiligen sich daran mit jeweils speziellem Fokus. Einen umfassenden Blick auf die Batterieforschung hat Joachim Maier, emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Er hat besonders Batterieprozesse auf der Nanoebene untersucht, die für unterschiedliche Batterietypen relevant sind. Gewissermaßen seine Nachfolgerin ist Raphaële Clément, seit Juli 2026 Direktorin am Stuttgarter Institut. Sie untersucht unter anderem, welche Prozesse in den Elektroden und an den Grenzen zwischen Elektroden und Elektrolyt ablaufen, vor allem solche, die die Batterie schädigen.

Jeder Batterietyp hat seine Vor- und Nachteile. Ein wichtiges Merkmal ist dabei zum einen die Energiedichte bezogen auf die Masse, die ein Maß für die Speicherkapazität darstellt. Zum anderen wird die Güte einer Batterie von der Leistungsdichte bestimmt. Sie gibt an, wie schnell sich eine Batterie laden und entladen lässt. Aber natürlich spielen auch Sicherheit, Haltbarkeit, die Verfügbarkeit der Materialien und die Kosten eine große Rolle. Raphaële Clément und Joachim Maier sind sich daher einig, wie das Rennen um bessere Batterien ausgehen wird: Für verschiedene Anwendungen wird es unterschiedliche Batterien geben. Denn bei stationären Speichern spielen Gewicht und Volumen keine so große Rolle wie im E-Auto oder Elektrorad, und nicht jedes E-Auto muss eine Reichweite von rund 500 Kilometern schaffen. So weit kommen kommerzielle Fahrzeuge derzeit nur, wenn sie von den momentan leistungsfähigsten und verbreitetsten Batterien angetrieben werden:

Lithium-Ionen-Batterien

Sie sind heute erste Wahl als Stromspeicher in Elektrofahrzeugen, aber auch in stationären Anwendungen. Sie heißen so, weil in ihnen beim Entladen und Laden Lithiumionen zwischen Minus- und Pluspol durch →

FOTO: ADOBE STOCK



Gut und sicher verstaut: Die Batteriepakete von E-Autos, die jeweils aus vielen übereinandergestapelten Zellen bestehen, werden heute mit einem besonders unfallsicheren Rahmen im Boden des Fahrzeugs untergebracht.

den Elektrolyten wandern. Der Minuspol, also die negative Elektrode, vereinfacht Anode genannt, besteht in heutigen Lithium-Ionen-Batterien aus Grafit als Aktiv- oder Speichermaterial und einer Kupferfolie als Stromsammler. Grafit nimmt beim Laden Lithiumionen auf, die mit Elektronen aus dem äußeren Stromkreis in elementares Lithium umgewandelt und so gespeichert werden. Beim Entladen geben die Lithiumatome jeweils ein Elektron an den äußeren Stromkreis ab und strömen durch den Elektrolyten zum Pluspol, der positiven Elektrode oder vereinfacht Kathode, die aus Aktivmaterial sowie Aluminiumfolie als Stromsammler besteht.

60 Die Lithium-Ionen-Batterien, die heute bereits im großen Stil eingesetzt werden, unterscheiden sich untereinander im Aktivmaterial am Pluspol. Den Goldstandard setzt hier ein Oxid aus Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt (NMC) als Aktivmaterial am Pluspol, denn NMC-Kathoden verhelfen Batterien zu besonders hoher Energie- und Leistungsdichte. NMC-Batterien haben aber ein Ressourcenproblem: Vor allem Kobalterze sind vergleichsweise selten und teuer, zudem ist ihre Lieferkette fragil, weil sie heute zu fast 75 Prozent in der Demokratischen Republik Kongo gewonnen werden, und das oft unter menschenverachtenden und umweltschädlichen Bedingungen. Daher haben Batteriehersteller den Kobaltanteil in den vergangenen Jahre peu à peu reduziert. Sie setzen aber zunehmend auch auf Lithiumeisenphosphat (LFP) statt NMC als Speichermaterial am Pluspol. LFP-Batterien erreichen zwar nicht so hohe Energiedichten wie NMC-Batterien, die führenden Hersteller haben diesen Nachteil aber durch einen veränderten Aufbau der Zellen wettgemacht, der es ihnen erlaubt, mehr Aktivmaterial in die Batteriezellen zu packen. LFP-Batterien dominieren bereits den weltweiten Markt, selbst europäische Automobilhersteller setzen sie inzwischen ein, eher bei Klein- und Kompaktwagen. Auch wenn NMC- und LFP-Batterien bereits im großen Stil verbaut werden, sind sie auch in der Grundlagenforschung noch ein Thema. „Beim Entladen finden an den Pluspolen chemische Prozesse statt, die wir noch nicht vollkommen verstehen“, sagt Raphaële Clément. Clément möchte sie systematisch untersuchen, um aus Lithium-Ionen-Batterien noch mehr rauszuholen.

Lithium gibt eines seiner Elektronen nur zu gerne ab, und es besitzt unter den Metallen die geringste Atommasse. Die Masse, die in einer Batteriezelle pro Ladung bewegt und gespeichert werden muss, ist also deutlich kleiner als beim gut dreimal so schweren Natrium. Daher ist Lithium heute für Batterien das Metall der Wahl. Das könnte sich aber ändern, denn es wird im großen Stil nur in Australien, das alleine rund die Hälfte des weltweit verwendeten Lithiums liefert, in Chile und in China gewonnen. Bolivien und Argentinien verfügen zwar über immense Vorkommen, die wirtschaftlich ausgebeutet werden könnten, und selbst in Deutschland gibt es nennenswerte Reserven. Die Lithiumproduktion ist aber immer kompliziert, energieaufwendig und umweltschädlich. Daher dürfte ein anderer Batterietyp in Zukunft immer wichtiger werden:

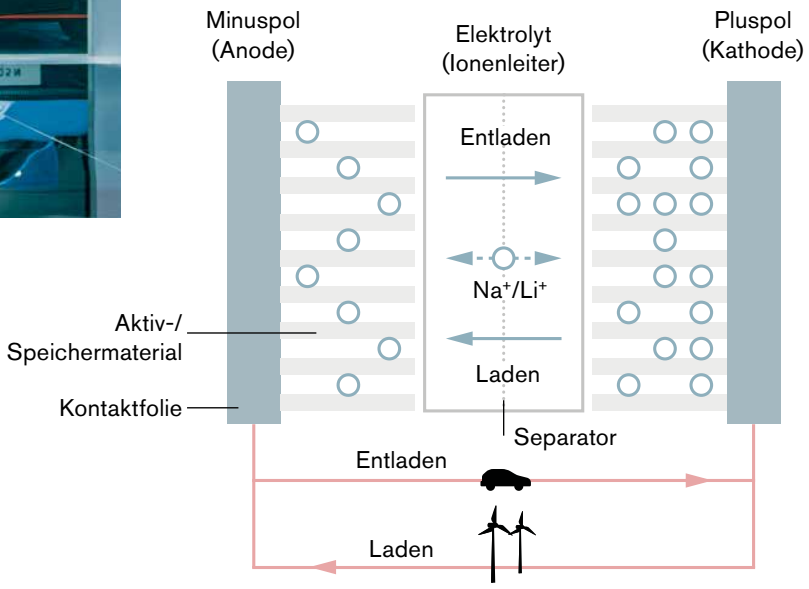
Natrium-Ionen-Batterien

„In der wissenschaftlichen Literatur herrschte lange das Missverständnis vor, Natrium sei per se nicht so gut für Batterien geeignet wie Lithium“, sagt Joachim Maier. „Dafür gibt es letztlich keinen wirklichen Grund, deshalb könnte sich Natrium in der nächsten Generation von Batterien durchaus durchsetzen.“ Hier sind noch ganz unterschiedliche Typen im Rennen. In einer Natrium-Ionen-Batterie transportieren, analog zur Lithium-Ionen-Batterie, Natriumionen die Ladung zwischen den beiden Polen hin und her. Dabei sind erste Natrium-Ionen-Batterien schon zur Marktreife gelangt, und 2026 markiert dafür ein wichtiges Jahr:

FOTO: ADOBE STOCK

CATL, einer der führenden chinesischen Batteriehersteller, verkündete 2026 nicht nur, dass er einen Großauftrag über Natrium-Ionen-Batterien als Netzspeicher erhalten hat. Auch das erste Serienfahrzeug mit einer Natrium-Ionen-Batterie soll in diesem Jahr vom Band laufen.

Natrium-Ionen-Batterien schaffen zwar pro Kilogramm nicht die Energiedichte der leistungsfähigsten Lithium-Pendants. CATL hat aber angekündigt, bald zumindest die Energiedichte von Lithium-LFP-Batterien zu erreichen. Der Vorteil von Natrium liegt darin, dass es sich auf der Erde viel häufiger findet als Lithium und viel einfacher zu gewinnen ist. Eine Tonne batterietaugliches Natriumkarbonat kostet daher nur rund 200 Euro, während für eine Tonne Lithiumkarbonat das Hundertfache aufgerufen wird. Natrium-Ionen-Batterien könnten in der Massenproduktion also wesentlich billiger sein. So könnten sie Lithium-Ionen-Batterien vor allem als stationäre Stromspeicher ausstechen. Sie könnten aber auch Elektroautos, die nur eine Reichweite von wenigen 100 Kilometern brauchen, viel kostengünstiger machen.



GRAFIK: GCO

Blaupause einer Batterie: Beim Entladen geben im Aktivmaterial gespeicherte Lithium- oder Natriumatome am Minuspol, auch Anode genannt, jeweils ein Elektron an den Stromabnehmer ab und wandern als Ionen zum Pluspol, der Kathode. Dort werden sie zusammen mit Elektronen aus dem äußeren Stromkreis etwa in Metalloxiden untergebracht. Beim Laden wird der Vorgang umgekehrt.

Welche Elektrodenmaterialien sich in Natrium-Ionen-Batterien durchsetzen werden, ist noch offen. CATL verwendet am Pluspol laut einem Bericht des Fachmagazins *Nature* aktuell eine ungiftige Verbindung namens Preußisch Weiß, die aus Natrium und Eisencyanid besteht. Aber auch mit Eisenphosphat und Metalloxiden, die Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid ähneln, aber möglichst keine kritischen Metalle wie Kobalt enthalten, wird experimentiert. Raphaële Clément untersucht zudem Fluoride als Kathodenmaterial.

Auf den Punkt gebracht

Für die Elektromobiltät sowie für stationäre Speicher im Stromnetz und in Privathaushalten werden verschiedene Batterietypen entwickelt.

Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlicher Zellchemie dominieren heute den Markt, Natrium-Ionen-Batterien dürften aber immer wichtiger werden, weil sie nachhaltiger und kostengünstiger sein könnten.

Natrium-Metall- und Feststoffbatterien, aber auch ganz neue Konzepte wie anionische Batterien werden derzeit erforscht.

Bei Natrium-Ionen-Batterien ist auch noch nicht endgültig entschieden, welches Speichermaterial am Minuspol das Rennen machen wird. Grafit, der an der Anode von Lithium-Ionen-Batterien die Lithiumatome speichert, kommt für das größere Natrium nicht infrage. In aktuellen Entwicklungen wird stattdessen ein weniger geordnetes hartes poröses Kohlenstoffmaterial verwendet. „Die Herstellung dieser Materialien vor allem in großen Mengen ist aber keine triviale Sache“, sagt Joachim Maier. Er hat daher mit seinen Mitarbeitern ein Anodenmaterial entwickelt, das mit einem anderen Speichermechanismus als den herkömmlichen Kohlenstoffanoden arbeitet. Das Material von Maiers Team speichert die Ionen und die beim Laden zur Verfügung gestellten Elektronen separat. „Wir nennen das Jobsharing“, sagt Maier. „Das funktioniert ähnlich wie bei einem Kondensator.“ Und wie ein Kondensator kann das Material →

FOTO: PICTURE ALLIANCE/DPA | KLAUS-DIETMAR GABBERT

Reserve für die Dunkelflaute: Großbatterien können überschüssigen Strom aus Windkraft und Sonne speichern und wieder abgeben, wenn weder der Wind weht noch die Sonne scheint. Diese Netzspeicher-Anlage in Förderstedt in Sachsen-Anhalt soll 716 Megawattstunden speichern – das entspricht dem durchschnittlichen Stromverbrauch von rund 75 000 Zwei-Personen-Haushalten pro Tag – und 2027 ans Netz gehen.

sehr schnell ge- und entladen werden, erreicht also hohe Leistungsdichten. Die Forschenden melden derzeit ein Patent auf ihre Entwicklung an.

Natrium-Metall-Batterien

Um die Energiedichte von Natriumbatterien zu erhöhen, verfolgen Forschende auch Konzepte mit metallischem Natrium als Minuspol. Das könnte zum Beispiel mit Schwefel als Pluspol funktionieren. Natrium-Schwefel-Batterien wurden bereits vor rund 50 Jahren entwickelt und erreichen hohe Energiedichten pro Kilogramm. Trotzdem führen sie allenfalls ein Nischendasein. Das liegt auch daran, dass sie bislang nur bei Temperaturen von ein paar Hundert Grad funktionieren, bei denen Natrium und Schwefel flüssig vorliegen. Außerdem finden darin chemische Prozesse statt, die ihre Lebensdauer so sehr begrenzen, dass sie etwa als Netzspeicher unbrauchbar sind. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam hat jedoch ein Material aus Schwefel und Kohlenstoff erzeugt, das sich bei Raumtemperatur laden und entladen lässt und in dem die zerstörerischen Aktivitäten unterbunden werden. Die Forschenden entwickeln das Material nun mit dem australisch-britischen Batteriehersteller Gelion weiter. Joachim Maier, der selbst an Schwefelmaterialien für Lithium-Schwefel-Batterien geforscht hat, weist darauf hin, dass die elektrochemischen Eigenschaften der schwefelhaltigen Materialien noch optimiert werden müssen.

Metallisches Natrium ermöglicht zwar Batterien mit beachtlichen Energiedichten, für die Produktion ist es aber ein Graus. Es reagiert mit kleinsten Spuren Feuchtigkeit und Sauerstoff und geht dabei leicht in Flammen auf. Wie bekommt man Natriummetall bei der Produktion also unbeschadet in eine Batterie? Eine Lösung lautet: gar nicht. Sogenannte anodenfreie Natrium-Metall-Batterien enthalten anfangs gar kein Natriummetall. Stattdessen wird am Pluspol ein Material mit beweglichen Natriumionen verbaut. Diese sollen beim ersten Ladeprozess zum Minuspol, heute meist eine Aluminiumfolie, strömen und sich dort als metallisches Natrium abscheiden. Das klingt elegant, in der Praxis ordnet sich das Natrium aber meist nicht ordentlich auf der Folie an. Stattdessen wächst es oft in Form metallischer Bäume, sogenannter Dendrite, zum Pluspol, und es kommt zum Kurzschluss. Außerdem sind am Pluspol Materialien gefragt, die reichlich Natriumionen enthalten, aber stabil bleiben, wenn diese abwandern. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik in Halle und des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme in Freiburg versucht daher, das Natrium mit einer Polymermembran auf der Kontaktfolie zu einer geordneten Ansiedlung zu bringen, zudem sucht es nach nachhaltigen natriumreichen und chemisch geeigneten Materialien für den Pluspol.

Feststoffbatterien

Gerade in Natrium-Metall-Batterien macht aber auch eine weitere Komponente Schwierigkeiten: der Elektrolyt. Dieser besteht heute aus einem organischen Lösungsmittel und leitfähigen Salzen. „In der Regel reagiert der Elektrolyt chemisch mit dem Elektrodenmaterial“, sagt Joachim Maier. „Dabei kommt es darauf an, dass die Reaktionsprodukte eine passivierende Schicht auf der Elektrode bilden, damit eine weitere Reaktion unterbunden wird.“ Gerade beim Natrium bilden sich meist aber keine glatten Passivierungsschichten. Außerdem sind die organischen Lösungsmittel der wesentliche Grund dafür, dass bei Batterien und E-Autos immer wieder über die Brennbarkeit gesprochen wird. Statistiken etwa aus den USA zeigen, dass entgegen landläufiger Meinung E-Autos deutlich seltener brennen als Verbrenner. Feuerwehren müssen allerdings geschult werden, die Brände zu löschen. Sowohl die Reaktionsfreudigkeit des Elektrolyten als auch die Brennbarkeit ließen sich zudem mit geeigneten festen Elektrolyten in den Griff bekommen. In Kombination mit metallischen Anoden erreichen sie auch sehr hohe Energiedichten. Daher entwickeln vor allem Automobilhersteller und ihre Partner entsprechende Feststoffbatterien für E-Autos und -Lkw, und zwar nicht nur in der Natrium-, sondern auch in der Lithiumvariante.

Feststoffbatterien haben aber auch ihre Baustellen. Zunächst muss der Elektrolyt Ionen gut leiten. Für Natriumionen gab es schon seit Längerem entsprechende Keramiken, für Lithium sind solche Materialien erst seit jüngster Zeit bekannt. Zudem lässt sich ein fester Elektrolyt nur schwierig in engen Kontakt mit den Elektroden bringen, damit der Ladungstransport über die Grenzfläche funktioniert. Damit wird sich künftig auch Raphaële Clément beschäftigen. Sie wird auch untersuchen, wie sich das vielleicht größte Problem der Feststoffbatterien in den Griff bekommen lässt: „Das Volumen der Elektroden verändert sich beim Laden und Entladen leicht", sagt die Max-Planck-Direktorin. „Zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten entstehen dann Lücken, die weder Elektronen noch Ionen überbrücken können." Derzeit werden Feststoffbatterien deshalb oft in Gehäusen mit einem Druck von 500 bis 700 bar zusammengepresst, oder in die Batteriezellen wird doch ein bisschen flüssiger Elektrolyt geschummelt, um den Kontakt sicherzustellen. Raphaële Clément untersucht daher Kompositmaterialien aus einem gummiartigen Kunststoff, der sich an die Volumenänderungen der Elektroden anpasst und in den ein leitfähiges Keramikpulver eingebettet wird.

Alternative Batteriedesigns

Das Start-up Batene variiert nicht die Batteriematerialien, um Batterien leistungsfähiger und kostengünstiger zu machen (siehe *MaxPlanckForschung 1/2025*). Die Ausgründung aus dem Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg setzt vielmehr beim Aufbau von Batterien an, genauer gesagt bei den Metallfolien, die in den Elektroden als Stromsammler dienen. Heute bringen die Hersteller die Aktivmaterialien, die die Ladung speichern, in einem schwierigen und teuren Verfahren in mikrometerdünnen Schichten auf den Kontaktfolien auf. Die Elektroden stapeln sie in hauchdünnen Zellen übereinander. Das ist nötig, weil die besten Speichermaterialien der Elektroden sehr schlecht Strom leiten. Das Team von Batene ersetzt die Folien durch filigrane Metallvliese. So können die Forschenden in einem viel einfacheren Prozess rund zehnmal dickere Zellen produzieren und sparen Materialien ein, die nicht zur Speicherung beitragen. Unterm Strich könnte die Energiedichte ganz unterschiedlicher Batterietypen deutlich steigen, und die Herstellungskosten könnten um bis zu 50 Prozent sinken.

In allen Batteriezellen, die derzeit in oder kurz vor der Anwendung stehen, wandern beim Laden und Entladen positiv geladene Metallionen zwischen Plus- und Minuspol hin und her. Es geht aber auch anders. Anionen, zum Beispiel Fluoride, könnten die Ladung ebenfalls transportieren. Den Pluspol würden dann Metallfluoride bilden und nicht Metalloxide wie in einigen heutigen Batterien. „Solche Batterien ermöglichen theoretisch höhere Energiedichten", sagt Raphaële Clément. Ebenfalls mit der Aussicht auf hohe Energiedichten hat Joachim Maiers Gruppe einen völlig anderen Speichermechanismus für den Minuspol untersucht. Als Minuspol von Lithium- und Natrium-Ionen-Batterien wird heute Grafit beziehungsweise poröser Kohlenstoff verwendet, die Metallionen gewissermaßen in gelöster Form aufnehmen. Viel mehr Metall kann ein Material speichern, wenn es damit chemisch reagiert. Dass solche chemischen Wandlungen in beide Richtungen möglich sind, hat Maiers Gruppe mit Nanoplättchen aus Molybdändisulfid in Kohlenstoffnanoröhrchen gezeigt. Solche Ideen aus der Grundlagenforschung scheinen im Rennen um die leistungsfähigen Batterietechniken noch ziemlich weit abgeschlagen. Und welche davon überhaupt die Anwendung erreichen, ist unklar. „Letztlich beruhen die großen Sprünge in der Batterieentwicklung jedoch auf Erkenntnissen der Grundlagenforschung", sagt Joachim Maier.

FOTO: ZHANG YIXI / GETTY IMAGES / VISUAL CHINA GROUP

Akkus der nächsten Generation: Im chinesischen Luoyang werden Natrium-Ionen-Batterien aus Rundzellen produziert. Diese Zellform wird als Alternative zu sogenannten prismatischen Zellen verwendet, die die Form flacher Kästen besitzen und heute in den meisten E-Autos genutzt werden.

Glossar

AKKU UND BATTERIE
werden heute synonym gebraucht, die Unterscheidung, dass Erstere wiederaufladbar sind, Letztere nicht, wird kaum noch getroffen.

ANODE
heißt in der Batterieforschung immer der Minuspol, obwohl dieser streng genommen nur beim Entladen eines Akkus die Anode darstellt.

KATHODE
wird der Pluspol genannt, obwohl auch diese Bezeichnung eigentlich nur bei der Entladung zutrifft.