

Gar nicht oberflächlich

Oberflächen bieten Chancen für die Klimaneutralität und die Energiewende.

Ulf Seyfert



Der Begriff Energiewende stammt aus den 1980er-Jahren [1] und beschreibt eines der globalen Brennpunktthemen dieses Jahrhunderts. Mit der strategischen Ausrichtung der EU und der Bundesregierung auf das Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 wurden die Bedingungen nochmals drastisch verschärft, auch wenn in vielen Bereichen noch nicht klar ist, wie dieses Ziel zu erreichen ist.

Das Thema Energiewende beinhaltet nicht nur, bis zum Jahr 2045 Energie hauptsächlich aus regenerativen Quellen wie Wind- und Wasserkraft, Sonnenenergie, Geothermie oder nachwachsenden Rohstoffen zu beziehen. Sondern es beinhaltet auch die Halbierung des Energieverbrauchs von 2008. Deutschland will dabei an beiden Enden des Energiesystems anpa-

cken. Der Verbrauch an Primärenergie soll durch eine höhere Energieeffizienz sinken. Auf der Erzeugerseite sollen fast zwei Drittel des Stroms aus erneuerbaren Quellen stammen (gegenüber 1990).

Energiewende ist ein vielschichtiges Thema mit einer Fülle von Herausforderungen, auch an die Infrastruktur [2]. Dabei ist neben dem Stromtransport von Norden nach Süden auch ein intelligentes Netzwerkmanagement zur Last- und Einsatzsteuerung von Energie und dem Einsatz von Speichern gemeint. Ziel ist es, fehlende Grundlastkapazität mit der zunehmend volatileren Energieeinspeisung auszugleichen. Hinzu kommt die Einbindung von Technologien wie Power-to-Gas (Wasserstoffsynthese), Power-to-Heat (Strom in Wärmenetze) oder Power-to-Transport (Elektromobilität) mit immer mehr Schnittstellen.

Eine weitere Herausforderung bezieht sich auf Ressourcen. So geht es in der Entwicklung auch darum, seltene und/oder unter umweltschädlichen Bedingungen gewonnene Materialien, wie sie heute noch in Solar- und Batterietechnologien gebraucht werden, zu ersetzen oder zu recyceln. Auch die Verlagerung umweltkritischer Produktion in andere Länder kann nicht die Antwort sein.

Der Erfolg der Energiewende hängt entscheidend von effizienter und anwendungsorientierter Forschung ab. Nur durch weitere erhebliche technologische Fortschritte auf allen Gebieten der verschiedenen Energieumwandlungs- und Speicherprozesse, aber auch der Verteilung und der effizienten Nutzung sind die Voraussetzungen für ein weltweit nachhaltiges Energiesystem gegeben. Die Wissenschaft muss ihre passive Rolle als Beobachter verlassen und ein Teil

der Transformation werden, muss Impulse setzen, international vernetzt agieren und mit Praxispartnern Entwicklungen schnell in praktikable Lösungen umsetzen.

Energiewende und Oberfläche

Was haben all diese Herausforderungen mit Oberflächen und Grenzflächen zu tun? Die Oberfläche bestimmt eine Vielzahl von Materialeigenschaften. Kontakt- und Übergangswiderstände ebenso wie das Korrosionsverhalten spielen in der Brennstoffzelle, in Schaltanlagen von Umspannwerken oder in Batteriezellen eine Rolle. Optische Eigenschaften wie Absorption, Transparenz und Reflektion sind über einen breiten Wellenlängenbereich entscheidend für die Effizienz der Energieumwandlung oder wichtig für Wärmeschutzverglasungen in Gebäuden. Hochtemperaturbeständige Oberflächen von Turbinenschaufeln steigern deutlich den Wirkungsgrad von Gasturbinen. Beschichtungen können all diese Eigenschaften in einem sehr breiten Umfang beeinflussen, auch wenn sie teils nur wenige Nanometer dick sein müssen (**Abb. 1**).

Auch bei Wasserstofftechnologien ist die Oberflächenbeschaffenheit von Materialien oftmals der Schlüssel zur Effizienz eines bestimmten Verfahrens. Die Oberflächentechnik nimmt als Querschnittstechnologie eine wichtige Rolle ein, die den Erfolg erneuerbarer Technologien wie Brennstoffzellenfahrzeuge oder Batterien und Korrosionsschutz von Windenergieanlagen mitentscheiden wird. Das Oberflächenengineering ist der Schlüssel für Innovationen. Dies erstreckt sich über alle drei Säulen der Energiewende:

- Nutzung regenerativer Energieträger,
- Energiespeicherung,
- effiziente Energienutzung.

Beispiele für die ersten zwei Säulen werden in den folgenden Abschnit-

ten ausgeführt. Die Chancen der Oberflächen für effiziente Energienutzung würden den Rahmen dieses Artikels überschreiten.

An der Oberfläche

Photovoltaik

Von allen Energiequellen hat die Sonne das größte Potenzial. Auch wenn die Sonnenenergie, welche die Erde erreicht, zehntausendmal mehr Energie bereitstellt, als der gesamte Weltbedarf an Primärenergie beträgt und je nach Energiemix ein

bis zwei Prozent der Landfläche dafür nötig wären, sind die Bedingungen in unseren Breiten nicht optimal und wetter- und jahreszeitenbedingt sehr schwankend. Trotz dieser Einschränkungen könnte allein die verfügbare Dachfläche in Deutschland mit günstigen Einstrahlbedingungen Platz für rund 1000 GWhp bieten [3] – das entspricht dem Bedarf einer Viertelmillion Vier-Personen-Haushalte (mit durchschnittlich 4000 kWh Stromverbrauch im Jahr).

Derzeit haben wir in Deutschland eine installierte Photovolta-



Abb. 1 Oberflächen und Grenzflächen beeinflussen das Energiesystem auf vielfältige Weise, auch wenn sie dafür teils nur sehr dünn sein müssen.

ik-Leistung von 60 GW_p .¹⁾ Je nach Szenario und Anteil der Photovoltaik müsste die verfügbare PV-Leistung bis 2035 laut einer Studie der HTW Berlin [3] verzehnfacht werden, um das $1,5^\circ$ -Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens zu erreichen. Dies würde eine erhebliche Steigerung des Zubaus von 6 auf $45 \text{ GW}_p/\text{Jahr}$ für Deutschland bedeuten.

$45 \text{ GW}_p/\text{Jahr}$ entspricht, vereinfacht betrachtet, einer Anzahl von ca. 129 Millionen Modulen, rechnet man mit einer aktuell üblichen Modulleistung von 350 W_p mit 21,5 % Wirkungsgrad und 72 Zellen pro Modul. Unter der Annahme, dass für 1 kW_p eine Netto-Fläche von $5,5 \text{ m}^2$ nötig ist, entspricht dies einer Flächennutzung von rund 250 km^2 Dach- und Freifläche pro Jahr. Das entspricht ziemlich genau der Fläche der Insel Malta oder 35 000 Fußballfeldern.

Bei einer Effizienzsteigerung auf 30 % und mehr, wie es bei aktuellen Entwicklungen von Tandemzellen durchaus realistisch ist, würden sich diese Zahlen rein rechnerisch auf ca. 92 Millionen Module und 177 km^2 Flächenverbrauch reduzieren. Wenn man dabei bedenkt, dass PV-Module vor 20 Jahren mit 12 % Spitzen-

Wirkungsgrad noch weniger als die Hälfte der Leistung heutiger Module hatten, zeigt sich der gewaltige Fortschritt auf diesem Gebiet.

Auch hier sind die Oberflächeneigenschaften entscheidend, neben den innovativen Entwicklungen bei der Silizium-Waferbearbeitung, Dotierung und Kontaktierung. Wesentliche Verlustmechanismen bei der Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie sind elektronischer und optischer Natur. Ein wichtiger Faktor der Leistungsminderung ist die Rekombination von Ladungsträgern im Wafer, bevor sie den Kontakt erreichen. Aber auch Verluste bei der Einkopplung des Lichts durch Reflexion, Abschattung oder Absorption spielen eine wichtige Rolle. Hier haben Dünnschichtstapel auf einer vortexturierten Waferoberfläche große Fortschritte bewirkt und die Marktanteile für verschiedene Photovoltaik-Systeme verschoben (Abb. 2).

So sind PERC-Zellen (Passivated Emitter and Rear Cell) mittlerweile Standard. Bei ihnen ist die Rückseite des Wafers mit einer dünnen dielektrischen Schicht versehen und mittels Laser perforiert. Die anschließend aufgedampfte Aluminium-Metallisierung führt nur noch

zu einem punktwoisen Kontakt mit dem Wafer. Dadurch werden Lichtwellen, die den Wafer passieren, auf der Rückseite wieder reflektiert und können weitere Ladungsträger bilden. Das betrifft vorrangig den langwelligigen Spektralanteil, der den Wirkungsgrad signifikant steigert. Bisherige BSF-Solarzellen (Back Surface Field), die diesen Effekt nicht ausnutzen (können), sind fast spurlos vom Markt verschwunden.

Mit den Heterojunction-Solarzellen (HJT, Abb. 3a) ist bereits die nächste Generation am Markt angekommen. Auch hier sind zusätzliche Schichtfolgen auf dem Wafer wesentlich. HJT-Zellen zeichnen sich durch einen n-leitenden Siliziumwafer aus, auf den beidseitig dünne Schichten aus dotiertem und intrinsischem amorphem Silizium sowie transparente, leitfähige Oxidschichten (TCO) aus Indium-Zinn-Oxid zur Aufnahme des erzeugten Stroms aufgebracht werden. Diese Zellen erzielen aufgrund der hohen Lichtausbeute und der guten Passivierungseigenschaften des amorphen Siliziums Wirkungsgrade von mehr als 24 Prozent und haben einen deutlich niedrigeren Temperaturkoeffizienten als konventionelle Siliziumsolarzellen. Zudem sind sie mit weniger Energie und in weniger Produktionsschritten herstellbar.

Bei TOPCon-Zellen wird auf der Rückseite ganzflächig ein dünnes Tunneloxid und danach eine hochdotierte polykristalline Si-Schicht aufgebracht, in die nur die relevanten Ladungsträger gelangen können (Abb. 3b). Das verhindert die Rekombination der Ladungsträger am Kontakt.

Als aussichtsreiches Material für eine neue Generation Solarzellen

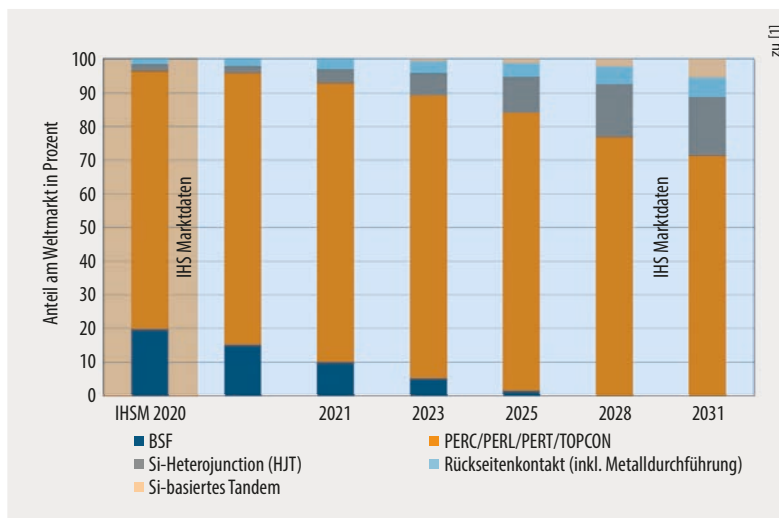


Abb. 2 Die technologische Entwicklung hat die Marktanteile für verschiedene auf Silizium basierende Photovoltaik-Zellkonzepte verändert.

1) Hier und im Folgenden bezeichnet W_p (Watt Peak) die unter den Standard-Testbedingungen der Photovoltaik (25°C Zelltemperatur, Bestrahlung der Stärke $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ unter einem Einfallswinkel von $48,2^\circ$) von Solarmodulen abgegebene elektrische Leistung.

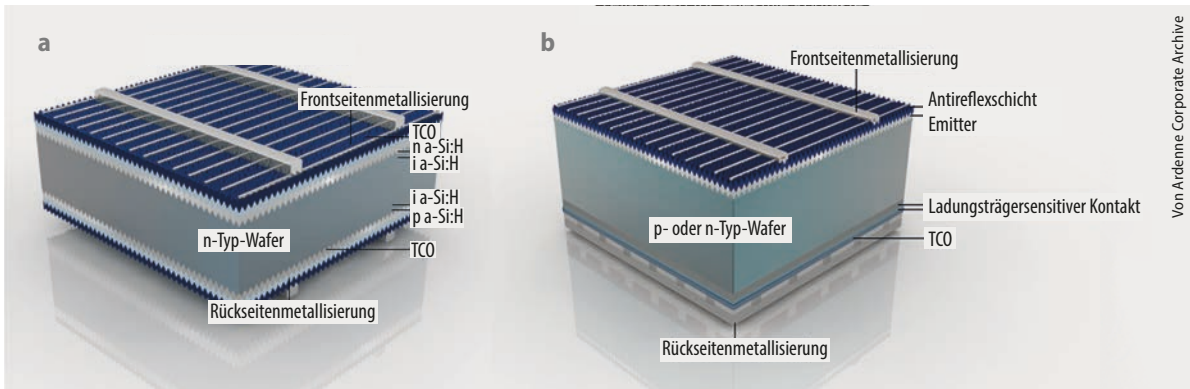


Abb. 3 Heterojunction-Solarzellen (a) besitzen einen n-leitenden Siliziumwafer, auf den beidseitig dünne Schichten aus Silizium bzw. Indium-Zinn-Oxid aufgebracht sind. Sog. TOPCon-Zellen besitzen selektive Kontakte (b).

gelten Hybridmaterialien aus organischen und anorganischen Materialien (Perowskite). Trifft Sonnenlicht auf den Perowskit-Absorber, lösen sich dort Elektronen aus dem gebundenen Zustand und werden energetisch angeregt. Gleichzeitig bleiben positiv geladene Fehlstellen als „Löcher“ zurück. Um Energie aus der Solarzelle zu entnehmen, müssen die Elektronen und Löcher an unterschiedlichen Seiten des Absorbers abgeführt werden. In Perowskit-Solarzellen geschieht dies durch selektive Ladungsträgerschichten, also Membranen, die entweder nur die Elektronen oder nur die Löcher passieren lassen. Diese halborganischen Halid-Perowskite haben ihren Namen von ihrer Grundstruktur, die der des Minerals Perowskit ähnelt.

2009 lag der Wirkungsgrad von Metallhalogenid-Perowskiten noch bei 3,8 %, nur zehn Jahre später waren es im Labor 25 %. Diese Materialien nutzen den gesamten Spektralbereich des sichtbaren Lichts aus und wandeln ihn in elektrischen Strom um. Dieser Effekt wird ausgenutzt, indem ultradünne Schichten dieses Materials auf herkömmliche Silizium-Solarzellen aufgebracht werden. Dabei dringt nahes Infrarot-Licht durch die Schicht und wird in der darunter liegenden Zelle in elektrischen Strom umgewandelt. Diese Tandem-Zellen kön-

nen realistisch die oben genannten 30 % Wirkungsgrad erreichen (**Abb. 4**). Bis zu 40 % sind theoretisch möglich.

Noch sind die erreichbaren Lebensdauern dieser Materialien weit entfernt von den 20 Jahren, die bei Silizium-Solarzellen üblich sind. Durch Entwicklungsarbeit auf breiter Front ist aber davon auszugehen, dass diese Konzepte in absehbarer Zukunft Standard am Markt sein werden. Für all diese Beschichtungstechnologien existieren bereits hocheffiziente und industriell erprobte Vakuum-Beschichtungsanlagen, in denen sich mittels Magnetron-Sputtertechnologie pro Anlage und Stunde 10 000 und mehr Photovoltaik-Wafer beschichten lassen (**Abb. 5**). Für die Perowskit-Verdampfung werden gegenwärtig entsprechende hochproduktive Konzepte entwickelt.

Solarthermie

Auch für die Solarthermie spielen die optisch wirksamen Schichten auf Solarspiegeln und Absorbern eine entscheidende Rolle. Eine mittels PVD abgeschiedene und optisch selektiv wirkende Schicht aus einem keramischen Material auf dem Wärmeträger-Rohr absorbiert das sichtbare Licht und hemmt die Abstrahlung von Wärme. Dabei hilft, dass sich der Wellenlängenbereich des einstrahlenden Lichtes

von dem der abgestrahlten Wärme unterscheidet. Die Schicht wirkt wie ein optischer Filter, der das einstrahlende Licht durchlässt, für die Wärmestrahlung aber nicht transparent ist. Auch die Spiegel erreichen ihre Wirkung nur durch die Beschichtung. Entweder erhalten die Glasscheiben in der Vakuumbeschichtung Silber- oder Aluminiumschichten oder die verwendeten Metallplatten erhalten zusätzliche, reflexionsverstärkende Beschichtungen, um die Spitzenwirkungsgrade der solarthermischen Kraftwerke von 20 bis 30 % zu erreichen.

Windkraft

Windkraft ist in unseren Breiten der zweite wichtige Energieträger für die Energiewende. Auch hier spielen Oberflächenfunktionalitäten eine wichtige Rolle. Rotorblätter

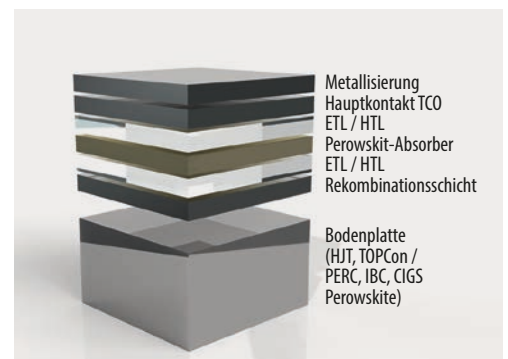


Abb. 4 Perowskit-Solarzellen bestehen aus verschiedenen mittels PVD applizierten Schichten.

von Windkraftanlagen bestehen meist aus Verbundwerkstoffen mit Kohle- oder Glasfasern. Neben der technischen Konstruktion der Rotorblätter ist ihre Beschichtung gegen Umwelteinflüsse von größter Bedeutung. Zum Vergleich: Ein Kraftfahrzeug, das ununterbrochen mit 200 Kilometern pro Stunde durch den Regen fährt, würde bereits nach wenigen Monaten Oberflächenschäden aufweisen. Rotorblätter müssen unter erheblich härteren Bedingungen bis zu 20 Jahre ohne Schaden durchhalten.

Die Belastungen, denen ein Rotorblatt in rund 90 Metern Höhe ausgesetzt ist, sind enorm. Bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 Kilometern pro Stunde wirken enorme Kräfte auf die Blattspitzen, die sich dabei um mehr als einen Meter verformen können [4]. Gleichzeitig zehren Witterungseinflüsse wie Schnee, Regen, Salzwasser, Hitze und UV-Strahlung an den Flügeln. Regentropfen wirken wie Geschosse. Gerade Offshore ist eine enorme Widerstandskraft gegen die Naturgewalten und korrosiven Umgebungsbedingungen bei gleichzeitiger Verlängerung der Lebensdauer erforderlich, um die aufwändige Wartung auf See zu minimieren. Hierbei kommen in

der Regel Hochleistungsbeschichtungen auf Lackbasis zum Einsatz, teilweise auch mit Nanopartikeln versetzt. Aber auch Dünnschichttechnologien finden hier Anwendung. Insbesondere in kälteren Regionen, in denen jahreszeitenbedingt Windkraftwerke wegen Vereisung abgeschaltet werden müssen, sind vereisungsfreie Oberflächen wichtig. Dabei werden verschiedene Beschichtungsansätze für hydrophobe oder aktiv heizbare Oberflächen getestet. In den Lagern und Antriebsaggregaten sind Hartstoff-Schutzschichten auf PVD-Basis essenziell für die Reibminderung und den Verschleißschutz.

Oberflächliche Energiespeicher

Da die Verfügbarkeit von Strom aus Photovoltaik und Windkraft stark schwankt und sich die Arten der Stromerzeuger am Netz immer weiter ändern werden, steigt die Bedeutung der verschiedenen Speichermöglichkeiten, um die erneuerbaren Energien in das Gesamtsystem zu integrieren [5].

Stromspeicher

Batterien als elektrochemische Energiespeicher eignen sich aufgrund ihres hohen Energiewir-

kungsgrades optimal, um Stromquellen wie Photovoltaik oder Windenergie zu puffern. Sie fangen Spannungsschwankungen ab und erlauben die Nutzung in netzunabhängigen Anwendungen. Stromspeicher ermöglichen Mobilität auf Basis elektrischer Energie und können bei einer weitgehend elektrifizierten Fahrzeugflotte als großer dezentraler Stromspeicher fungieren.

In der Vergangenheit war die Batterieherstellung eine Domäne der nasschemischen Abscheidung dicker Schichten. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an Speicherdichte, Schnellladefähigkeit und Ladezyklen, in erster Linie bedingt durch die Elektromobilität und mobile Endgeräte, sind die Oberflächen und Grenzflächen in der Batteriezelle immer mehr in den Fokus gerückt. Denn verschiedene Vorgänge dort können zu verminderter Leistung, Bränden oder frühzeitigem Ausfall führen (Abb. 6).

Dem wirken PVD-Schichten effizient entgegen. Auf Kohlenstoff basierende Beschichtungen der Oberfläche von Stromableiter-Kontaktfolien verringern den Kontaktwiderstand und erhöhen damit die Stromtragfähigkeit und den Korrosionsschutz. Dies ist bei neuen Elektrolyt-Materialien in Feststoffbatterien interessant. Viele Entwicklungsarbeiten beschäftigen sich mit Silizium als Anodenmaterial, insbesondere wegen der höheren Ionen-Speicherfähigkeit gegenüber herkömmlichem Graphit. Dabei kommt es durch geeignete Strukturen darauf an, die mit dem Laden verbundene Volumenausdehnung abzufedern, um die Vorteile nicht auf Kosten der Ladezyklen zu verlieren [6]. Eine geeignete Prelithierung der Anode oder die Verwendung von Li-Metall wirkt der SEI-Bildung (solid electrolyte interface) und damit verbundenen Kapazitätsverlusten entgegen. Auch wird in diesem Zusammenhang verstärkt



Abb. 5 Silizium-Wafer-Vakuumbeschichtungsanlagen können bis zu 10 000 Wafer pro Stunde beidseitig beschichten.

Christoph R. Birkl et al., J. Power Sources, 341 (2017) 373; DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011

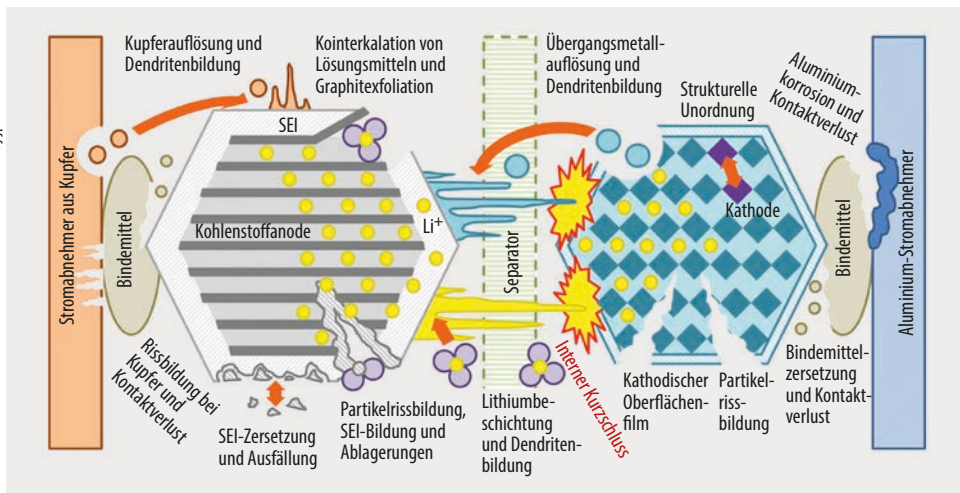


Abb. 6 Verschiedene Vorgänge an den Ober- und Grenzflächen beeinflussen die Lebensdauer und Performance von Lithium-Ionen-Batterien.

nach einer industriell umsetzbaren Beschichtungsmöglichkeit der für die Elektroden eingesetzten Pulvermaterialien gesucht.

Eine weitere Anwendung für die Vakuumbeschichtung ist die beidseitige Metallisierung von Kunststofffolien mit Aluminium oder Kupfer als Ersatz für die bisherigen metallischen Stromleiter auf Anoden- und Kathodenseite [7]. Dies spart Material und Gewicht, da die Dicke der leitfähigen Schicht nur noch von der Stromtragfähigkeit abhängt, nicht mehr von der minimal walzbaren Foliendicke. Bedeutender ist aber wohl die höhere Sicherheit der Batterie, da bei einem Kurzschluss in der Zelle die schmelzende Folie zu einer Selbstlöschung führt und den thermischen Durchbruch verhindert [8].

Chemische Speicher

Ähnliche Beschichtungslösungen sind auch bei den Brennstoffzellen im Vormarsch. Bipolarplatten sorgen als Kernkomponente einer Brennstoffzelle für die elektrochemische Umwandlung von Wasserstoff und Luft zu Wasser und sind meist zu mehreren hundert Stück in einem Block verbaut (**Abb. 7**).

Insbesondere bei den für Mobilitätsanwendungen benötigten PEM-Brennstoffzellen (Polymer-Elektrolyte-Membran) lösen Bipo-

larplatten aus Edelstahl zunehmend die bisherigen aus Graphit ab. Das spart deutlich an Gewicht und Volumen bei gleichbleibender Leistung. Möglich ist dies durch industriell skalierfähige und wirtschaftlich darstellbare PVD-Beschichtungen, um die Oberfläche gegen Korrosion zu schützen und den Kontaktwiderstand so weit zu reduzieren, dass er mit dem Standard einer Goldbeschichtung oder Bipolarplatten aus Titan vergleichbar wird [9].

Da Wärme mehr als die Hälfte der Energienutzung in Deutschland betrifft, spielen Wärmespeicher für die Energiewende eine signifikante Rolle. Auch wenn bei ihnen eine thermische Isolation und Korrosionsschutz wichtige Anforderungen sind, sind diese aus Sicht der Oberflächentechnik weniger relevant.

Großes Potenzial steckt in der „stofflichen“ Speicherung von Ener-

gie, indem unter Einsatz von Energie ein Energieträger produziert wird, der die Energie über einen beliebigen Zeitraum speichert. Mit diesem Power-to-X-Verfahren lässt sich etwa durch Wasserelektrolyse nicht nutzbarer Wind- oder Solarstrom chemisch als Wasserstoff speichern. Dieser steht zur netzunterstützten Rückverstromung und/oder als Kraftstoff zur Verfügung. Der Wasserstoff lässt sich auch mit CO₂ in synthetisches Methan umwandeln und ins Erdgasnetz einspeisen. Dieses Konzept erlaubt es, riesige Energiemengen über beliebige Zeiträume zu speichern und vorhandene Treibhausgase abzubauen.

Momentan stehen jedoch die auf dem Elektrolyse-Wege erreichbaren geringen Wirkungsgrade einer breiteren Anwendung entgegen. Einen Schlüssel dabei besitzen katalytisch wirkende Oberflächen.

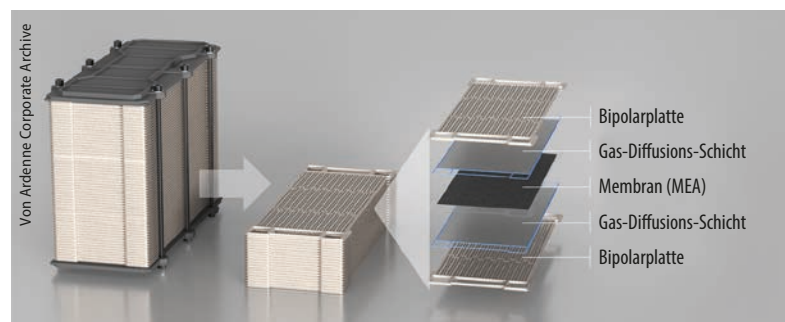


Abb. 7 Brennstoffzellen-Stacks enthalten meist hunderte metallischer Bipolarplatten.

So entsteht etwa Wasserstoff bei der Elektrolyse an der negativ geladenen Elektrode (Kathode), während sich an ihrem positiven Gegenstück (Anode) Sauerstoff bildet. Lanthannickelat (LaNiO_3) ist ein etablierter Katalysator, der die elektrolitische Bildung von Sauerstoff begünstigt. In seiner Kristallstruktur wechseln sich Nickeloxid- und Lanthanoxid-Schichten ab. Beide Vorgänge können nur gemeinsam ablaufen, sodass eine erleichterte Bildung von Sauerstoff die Wasserstoffproduktion vermehrt [9]. Normalerweise ist es Zufall, welche Schicht die Oberfläche der Anode bildet. Ein deutsch-amerikanisches Forscherteam hat ein Verfahren entwickelt, mit dem es genau einstellen kann, ob eine Schicht aus Lanthanoxid oder aus Nickeloxid oben liegt [10]. Die Forschenden stellten fest, dass eine Anode mit Nickeloxid-Oberfläche in der gleichen Zeit doppelt so viel Sauerstoff produziert wie die andere Variante. Denn während der Elektrolyse entsteht nur bei ihr eine ungeordnete, katalytisch sehr aktive Schicht, welche die Sauerstoffbildung begünstigt. Auch diese Grundlagenuntersuchungen zeigen bereits das große Potenzial im nanoskaligen „Oberflächendesign“.

Auch für den Transport und die Speicherung des Wasserstoffs sind die Oberflächeneigenschaften der Behälter, Rohre und Verbindungen entscheidend. Aufgrund

der geringen atomaren Größe kann Wasserstoff als Atom oder Ion besser als andere Gase in metallische Oberflächen eindiffundieren und zu einer Versprödung des Materials und nachfolgend zu Rissen und Brüchen führen. Auch die Dichtigkeit ist hiervon betroffen. Verschiedene Entwicklungsgruppen testen mit großem Erfolg PVD-Beschichtungen aus MAX-Phasen-Materialien [11]. MAX-Phasen sind nanolaminare Schichtstapel aus ternären Nitriden und Karbiden (**Abb. 8**), wobei M für frühe Übergangsmetalle, A für Elemente der Gruppe A im Periodensystem (z. B. Aluminium) und X für Kohlenstoff oder Stickstoff steht.

Diese Systeme kombinieren metallische Eigenschaften wie Bearbeitbarkeit und Leitfähigkeit mit keramischen Eigenschaften wie hohem Schmelzpunkt und Steifigkeit. Mittels Sputtern abgeschiedene dünne Schichten aus diesen Materialien konnten das Eindringen von Wasserstoffatomen deutlich reduzieren. Bis zur Applizierung auf technischen Oberflächen und im Innenbereich von Rohren oder Behältern ist es jedoch noch ein weiter Weg.

Fazit

Diese Beispiele verdeutlichen, dass Grenzflächenreaktionen und deren Beeinflussbarkeit durch nanometerdünne Schichten eine Schlüsselrolle spielen, um die Herausforderungen der Energiewende und der damit verbundenen Klimaneutralität zu lösen. Dabei konnte der Artikel nur punktuell auf die Erzeugerseite des Energiesystems eingehen. Nicht erwähnt bleibt der Beitrag der Dünnschichttechnologien bei Energieeffizienz und -einsparung. Angesichts steigenden Strombedarfs für Elektromobilität und Datenkommunikation sind die Ziele, den Strombedarf um ein Viertel zu senken, sehr ambitioniert. Auch hier wirken

Oberflächentechnologien, neue Materialien und Dünnschichten in der Mikro- und Leistungselektronik aktiv mit, um Leistungsverluste im Mobilfunk und in Rechenzentren zu reduzieren.

Energiewende ist und bleibt ein vielschichtiges Thema. Die Herausforderungen bieten jedoch hohe Innovationspotenziale. Das betrifft insbesondere Oberflächen- und Dünnschichttechnologien. Vielleicht ist Klimaneutralität am Ende doch erreichbar.

- [1] F. Krause, H. Bossel und K.-F. Müller-Reismann, Energie – Wende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran, S. Fischer (1980)
- [2] M. Fischedick, Energiewende – das sind die sechs größten Herausforderungen, Wirtschaftswoche, 27. April 2013
- [3] V. Quaschnig et al., Solarstromausbau für den Klimaschutz, HTW-Studie der Forschungsgruppe Solarspeichersysteme, HTW Berlin; <https://solar.htw-berlin.de/studien/solarstromausbau>
- [4] Deutsches Lackinstitut, Unter härtesten Bedingungen: Beschichtungen von Windkraftanlagen, <https://bit.ly/3ZySOyq>
- [5] FVEE Forschungsverbund Erneuerbare Energien: Forschungsthemen Speicher; www.fvee.de/forschung/systemkomponenten/energiespeicher
- [6] H. Althues, Siliziumanoden zur Steigerung der Energiedichte von Lithium-Batterien, Jahresbericht des Fraunhofer IWS (2016), S. 120; <https://bit.ly/46nU9tV>
- [7] PolySafe: Lithium-Ionen-Batterien sicherer machen, Magazin der TU Braunschweig, 9. September 2021
- [8] M. T. M. Pham et al., Cell Rep. Phys. Sci. **2**, 3 2021
- [9] HZwo e. V., Sächsischer Innovationscluster für Brennstoffzellen und Wasserstoff, Großserienbipolarplatte; <https://bit.ly/48qfHie>
- [10] F. Frick, Mehr Wasserstoff durch ultradünne Schicht, effzett (2021); <https://bit.ly/3LxaC7d>
- [11] L. Gröner et al., Materials **13**, 2085 (2020)

Der Autor

Dr. Ulf Seyfert, VON ARDENNE GmbH, Am Hahnweg 8, 01328 Dresden, Seyfert.Ulf@vonardenne.biz

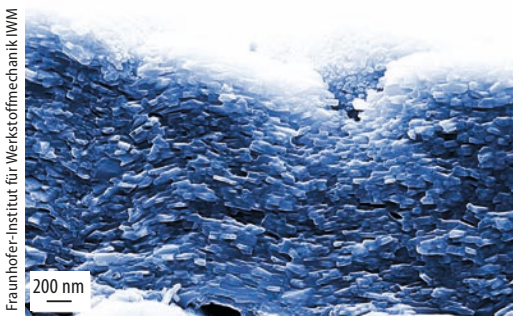


Abb. 8 Die REM-Aufnahme zeigt die Bruchkante einer Ti_2AlN -Schicht mit plättchenartigem Gefüge.