

# Speicherung elektrischer Energie am Meeresboden

## Das Meer-Ei

HORST SCHMIDT-BÖCKING | GERHARD LUTHER | CHRISTOPH LAY | JOCHEN BARD

*Der wachsende Anteil schwankender erneuerbarer Energiequellen im Netz erfordert mehr Stromspeicherkapazität. Ausgereift sind bislang nur Pumpspeicherkraftwerke. Eine neue Speichertechnologie wäre für Offshore-Windparks besonders geeignet: Das „Meer-Ei“ nutzt den hohen Druck im tieferen Wasser als „Reservoir“. Erste Pilotprojekte sind in Vorbereitung.*

Der völlige Umstieg von unseren herkömmlichen Energieträgern für die Stromerzeugung, fossilen Brennstoffen und Kernenergie, auf erneuerbare Energiequellen wie Wind und Sonne kann nur gelingen, wenn man Wege findet, elektrischen Strom in großen Mengen und hinreichend lange zu speichern. Wind und Sonnenlicht stehen in praktisch unbegrenzter Menge zur Verfügung, aber leider nicht zu jeder Zeit.

In Deutschland bringt es die Photovoltaik jährlich auf rund 1000 Volllaststunden, ist jedoch starken täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Beim Wind sind die zeitlichen Schwankungen geringer ausgeprägt, es können aber längere Flauteperioden auftreten. Insgesamt kommen Windenergieanlagen in Deutschland an Land auf etwa 1700 und auf See (Offshore) auf durchschnittlich 3800 Volllaststunden pro Jahr. Eine industrielle Gesellschaft wie Deutschland kann Windkraft und Sonnenstrahlung daher nur dann als verlässliche Energiequelle verwenden, wenn man die so erzeugte elektrische Energie in ausreichendem Maße über den Zeitraum von einigen Tagen oder Wochen speichern kann.

Zurzeit werden verschiedene Wege der Speicherung diskutiert und erprobt. Neben Wärmespeichern sind dies vor allem elektrochemische Stromspeicher, also wieder aufladbare Akkumulatoren, Erzeugung von Wasserstoff ( $H_2$ ) durch Elektrolyse, eventuell mit nachfolgender Umwandlung in Methan, sowie Druckluftspeicher. Schon lange bewährt sind Pumpspeicherkraftwerke. Diese können nicht nur riesige Mengen an Energie speichern, sondern arbeiten auch sehr wirtschaftlich, mit einem hohen Wirkungsgrad von etwa 80 % in der Wiedergewinnung der gespeicherten elektrischen Energie.

Herkömmliche Pumpspeicherkraftwerke bestehen grundsätzlich aus zwei Wasserreservoirien auf unterschiedlicher Höhe. Beim Speichern der elektrischen Energie wird über eine Rohrleitung Wasser aus einem unteren Becken in

ein oberes Becken gepumpt, und bei der Rückgewinnung aus dem oberen Becken über eine Turbine wieder in das untere Becken abgelassen. Der über die Turbine abfallende Wasserdruck bestimmt die auf die Turbine wirkende Kraft. Das Produkt aus dieser Druckdifferenz mal der pro Sekunde durchströmenden Wassermenge bestimmt die elektrische Leistung der Turbine.

Solche Pumpspeicherkraftwerke sind an geographische Bedingungen geknüpft, die in Deutschland nur an wenigen Stellen in den Alpen und Mittelgebirgen passen. Unter anderem wegen des Landschaftsschutzes stehen jedoch Flächen für neue Kraftwerke kaum mehr zur Verfügung. In Norwegen mit seiner Fjordlandschaft könnte diese Speichertechnologie jedoch noch stark ausgebaut werden.

Es gibt bisher wenige Vorschläge, den geographischen Engpass bei Pumpspeicherkraftwerken aufzulösen. Ein Vorschlag besteht darin, in ebenen Landschaften künstliche Strukturen herzustellen. Diese sogenannten Ringwallspeicher bestehen aus einem künstlichen Hügel mit dem oberen Wasserspeicher. Beim Aufschütten wird um ihn eine ringförmige Vertiefung ausgehoben, die dann als unteres Wasserreservoir dient [1]. Dieser mutige Vorschlag setzt allerdings die Verfügbarkeit großer Landflächen voraus, von den Baukosten ganz zu schweigen.

Ein weitere Idee besteht darin, alte Bergwerke als unterirdische Pumpspeicherkraftwerke auszubauen, das im Jahre 2012 stillgelegte Bergwerk Saar beispielsweise besitzt immerhin eine maximale Teufe von 1800 m. Als untere Wasserspeicher ließen sich entweder bereits bestehende, bergmännisch erschlossene Hohlräume nutzen, oder man baut dafür neue Blindschächte. Die enormen Höhenunterschiede erlauben schon bei relativ kleinen Reservoirs eine vergleichsweise hohe Speicherkapazität [2].

Als Druckluftspeicher sind leergespülte Salzstöcke eine interessante Option. Man könnte damit im Prinzip auch Pumpspeicherkraftwerke unter dem Nordseeboden errichten, da dort viele Salzstöcke liegen und das obere „Speicherbecken“ in Form der Nordsee schon in technisch unbegrenzter Größe vorhanden wäre.

### Das Meeres-Druckspeicherkraftwerk

Wir wollen hier eine weitere visionäre Idee vorstellen, die zwar eine enorme Herausforderung darstellt, technisch jedoch realisierbar ist: Das Meeres-Druckspeicherkraftwerk in der Tiefe von Meeren oder großen Seen nutzt ein dem Pumpspeicherkraftwerk ähnliches Prinzip, das die Kon-

struktion eines rein physikalischen Speichers für große Energiemengen erlaubt. Diese Idee ist nicht neu: Bereits in den 1970er Jahren wurden in Japan und Deutschland Patente eingereicht, Hohlstrukturen auf dem Meeresboden als Reservoir für Pumpspeichersysteme zu verwenden [3]. Der Schlüssel ist dabei der hohe Umgebungsdruck des Wassers. Zunächst in Unkenntnis dieser Pionierarbeit wurde der Grundgedanke in den letzten Jahren in den USA und in Deutschland unabhängig voneinander neu entwickelt [4-7]. Die entscheidenden Vorteile solcher Meeres-Druckspeicherwerke wären:

- Die Tiefsee bietet hohe Druckdifferenzen und eine fast unbegrenzte Wassermenge.
- Geeignete Flächen auf dem Meeresboden stünden in großer Zahl und ohne Konflikte mit Nachbarn und Anliegern zur Verfügung.

Falls das Meeres-Druckspeicherwerk zu vernünftigen Kosten realisierbar ist, ist das Speicherpotenzial enorm. Das Speicherproblem ließe sich in Harmonie mit der Umwelt technisch lösen, ohne das empfindliche Ökosystem in der Tiefsee nennenswert zu stören. Kleinere Anlagen könnten zunächst die täglichen Fluktuationen und Tagesgänge des Stromverbrauchs ausgleichen, bei weiterer Kostensenkung könnten eines Tages sogar Großanlagen für einen saisonalen Ausgleich gebaut werden. Es lohnt sich also, diese Möglichkeiten genau zu erforschen und die technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen anzugehen.

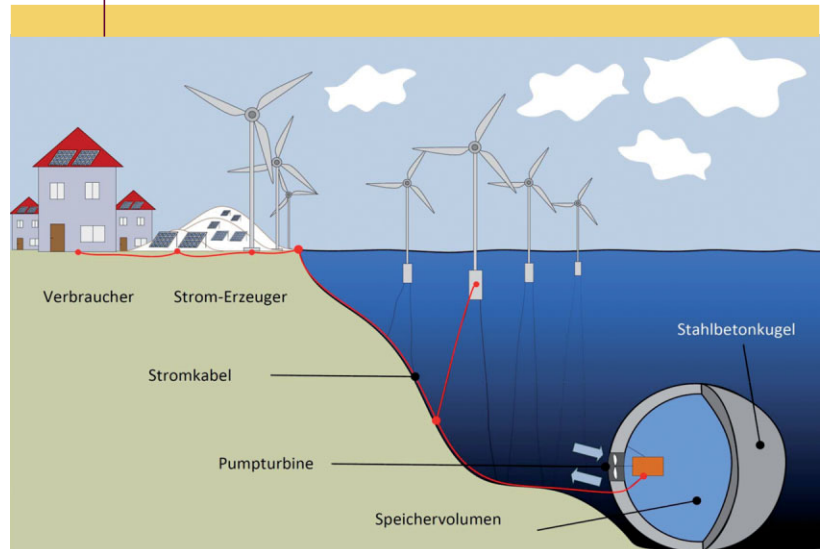
### Arbeitsprinzip

Das Energiespeicherkonzept ähnelt wie gesagt demjenigen herkömmlicher Pumpspeicherwerke und ist daher grundsätzlich einfach. Man versenkt auf den Meeresboden einen Hohlraum, zum Beispiel eine hohle, aus Beton hergestellte Kugel. In ihre Wand wird eine Kombination aus Pumpe und Turbine, eine Pumpturbine, eingebaut. Diese produziert bei hereinströmendem Wasser Strom, in umgekehrter Laufrichtung pumpt sie mit elektrischer Energie Wasser aus dem Hohlraum in das umgebende Meer. Dabei erzeugt sie wie eine „Vakuumpumpe“ im Hohlraum einen Unterdruck, der im Vergleich zum hohen Umgebungsdruck des Meeres als Energiespeicher wirkt – zum Beispiel für umgewandelten Windstrom.

Der Druckunterschied zwischen umgebendem Meer und dem Innerem des Hohlraums ist gewaltig: je nach Meerestiefe herrscht ein Außendruck zwischen 20 und 1000 bar, während in der leergepumpten Kugel ein Innendruck unter einem Bar verbleibt. Bei 4000 m Wassertiefe entspricht dies einem Druckunterschied von 400 bar. Die in der Kugel speicherbare Energiemenge ist proportional zum umgebenden Wasserdruck in der Tiefe des Meeres.

In Analogie zum herkömmlichen Pumpspeicherkraftwerk wird beim Meeres-Druckspeicherkraftwerk, dessen voller Projektname Stensea (Stored Energy in the Sea) [8] lautet, aber salopp auch „Meer-Ei“ genannt wird, das Meer selbst als oberes Speicherreservoir genutzt, das untere Speicherbecken wird allgemein durch einen Hohlkörper mit

ABB. 1 | MEERES-DRUCKSPEICHERKRAFTWERK



Funktionsprinzip eines Meeres-Druckspeicherkraftwerks (Grafik: Fraunhofer IWES).

dem Volumen  $V_0$  auf dem Meeresgrund gebildet. Nur eine Kabelverbindung zwischen Kugel und Meeresoberfläche wird benötigt, die den Windstrom zum Hohlkörper und den dort erzeugten Strom zum Verbraucher leitet.

Die Menge der gespeicherten Energie  $E$  ist das Produkt aus dem Meeresdruck  $p_M$  und dem Hohlraumvolumen  $V_0$ :

$$E = p_M \cdot V_0. \quad (1)$$

Hierbei wird das als Arbeitsfluid dienende Meerwasser als inkompressible Flüssigkeit aufgefasst. In dem leer gepumpten Hohlkörper befindet sich nur noch etwas Restwasser der Temperatur  $T_M$  im Pumpensumpf und Wasserdampf mit dem Sättigungsdruck  $p_S(T_M)$ . Bei einer Meerestemperatur von 5 °C gilt etwa

$$p_S(T_M) = 0,005 \text{ bar} = 50 \text{ N/m}^2,$$

also herrscht in dem Hohlkörper praktisch Vakuum.

Im allgemeinen Fall muss man allerdings von einem kompressiblen Fluid ausgehen, dessen Dichte  $\rho(p)$  merklich vom Druck abhängt. Man sollte möglichst auch vermeiden, dass in dem Hohlraum sich neben Wasserdampf andere, nicht kondensierende Gase wie Luft befinden; denn diese Restgase vermindern unter anderem die Speicherkapazität. Eine Luftblase wirkt nämlich wie ein eigener, jedoch gegengekoppelter Speicherkreis: Beim Entladen des Speichers, bei dem das Wasser in die Kugel über die Turbine einströmt, wird die Luftblase komprimiert. Sie verringert durch ihren Gegendruck so die Ausbeute an teurem Spitzenstrom. Beim Laden des Speichers, also dem Auspumpen mit Billigstrom, hilft sie zwar mit. Sie tut dies aber zum falschen Zeitpunkt, da Strom nun ja billig ist.

Weiterhin muss man berücksichtigen, dass neben dem Dampfdruck  $p_S(T_M)$  auch die Flüssigkeitssäule innerhalb der

**TAB. 1 | SPEICHERDICHTEN IN VERSCHIEDENEN MEERESTIEFEN**

Meerestiefe/m	250	500	1000	2000	4000	10000
Druck/bar	25	50	100	200	400	1000
Speicherdichte/kWh/m <sup>3</sup>	0,7	1,4	2,8	5,6	11,1	27,8

Kugel einen kleinen Gegendruck von etwa 1,5 bar aufbaut, weil der Wasserspiegel höher als der unten sitzende Pumpeneintritt steht.

Da in dem Hohlraum beim Auspumpen ständig Wasser verdampft, wird dem verbleibenden Wasser Wärmeenergie entnommen. Damit könnte das Wasser im Restsumpf theoretisch gefrieren. Berechnet man jedoch die gesamte Verdampfungsenergie, so zeigt sich, dass die Temperatur des verbleibenden Wassers nur um etwa ein bis zwei Grad fällt, die aber durch die Wärmeabgabe der Pumpen mehr als kompensiert wird. Damit kann man selbst bei einer Wassertemperatur von 4 °C, wie sie in der Tiefsee herrscht, die Vereisungsgefahr praktisch ausschließen.

### Speicherbare Energiemenge

In großen Meerestiefen herrschen hohe Drücke, so dass sich deutlich höhere Speicherichten als bei Pumpspeicherkraftwerken auf dem Festland ergeben. Tabelle 1 gibt für das Einheitsvolumen 1 m<sup>3</sup> die Speicherichten in verschiedenen Meerestiefen an.

Als Faustformel kann man sich merken: In 4000 m Tiefe, also in der durchschnittlichen Tiefe des Ozeanbodens, speichert das Druckspeicherkraftwerk so viel Energie wie ein gleichvolumiger Erdgasspeicher unter Normaldruck. Die Speichermenge hängt natürlich von dem Gesamtvolumen der untermeerischen Bauwerke, also der Hohlkörper, ab. Eine anschauliche Vorstellung erhält man, wenn man sich die in Kugeln unterschiedlichen inneren Durchmessers speicherbaren Energiemengen vor Augen führt (Tabelle 2). Hier ist zusätzlich noch angegeben, wie dick die Kugelschale aus Beton (Dichte  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) sein müsste, um den Auftrieb der leeren Kugel gerade zu kompensieren.

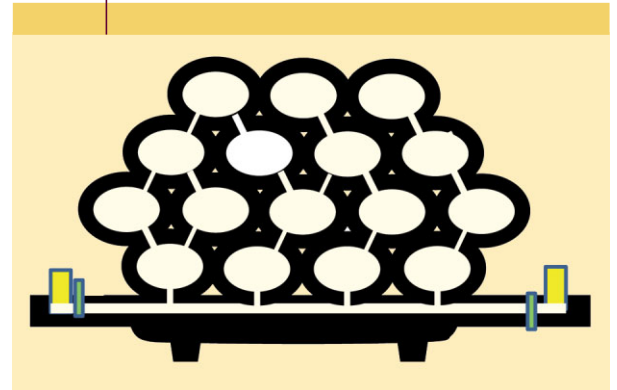
Ein gutes Gefühl für die Kapazität solcher Energiespeicher vermittelt das Beispiel eines Kugeltanks mit 100 m Durchmesser und einem Volumen von rund 500 000 m<sup>3</sup>. Liegt er in der Biskaya in 4000 Meter Tiefe, dann speichert er in einem Auspump- und Füllzyklus etwa 5 GWh. Damit könnte er fünf Stunden lang die elektrische Energie eines durchschnittlichen Kernkraftwerks liefern.

**TAB. 2 | SPEICHERINHALT VON BETONKUGELN IN 4000 M MEERESTIEFE**

Innendurchmesser/m	1	2	5	10	20	50	100
Volumen/m <sup>3</sup>	0,524	4,189	65,450	524	4.189	65.450	523.599
Kugelschalendicke <sup>1</sup> /m	0,098	0,197	0,492	0,984	1,968	4,920	9,841
Speicherenergie/MWh	0,006	0,047	0,727	5,82	46,54	727	5818

<sup>1</sup> Die angegebene Dicke der Kugelschale ist zur Kompensation des Auftriebs erforderlich (Betondichte:  $\rho_{\text{Beton}} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ).

**ABB. 2 | ERSENKBARES SCHIFF**



**Beton-Containerschiff mit Kugeln als Modulbaustein. Am Heck und Bug ist jeweils eine Pumpenturbine mit Ventil angebracht.**

Zum jetzigen Zeitpunkt wird aber eher mit einer Wassertiefe unter 1000 Meter geplant, da für diese Tiefen schon entwickelte Pumpenturbinen erhältlich sind. In einer Tiefe von ungefähr 750 m ließe sich somit eine Energiemenge von 20 MWh pro Kugel mit 100 m Durchmesser speichern.

### Bau, Betrieb und Wartung

Neben der prinzipiellen Machbarkeit eines solchen Speichers spielt die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die Herstellungs- und Betriebskosten und letztlich bezüglich der Stromspeicherkosten eine wichtige Rolle. Eine Kugel als Hohlraum hat bei einem Innendurchmesser von 100 m im Leerzustand eine Gesamtmasse von etwa 500 000 t. Sie würde nur in der Nähe des späteren Lagerplatzes auf dem Meer hergestellt werden können. Obwohl die Kugel die ideale Geometrie besitzt, die dem Außendruck am besten Stand halten kann, gibt es eine Reihe von technischen Herausforderungen bei ihrer Herstellung und Nutzung.

Das Herauspumpen des Wassers erfordert es, dass die Pumpe am tiefsten Ort der Kugel sitzt und dann noch einen ausreichenden Wasservordruck haben muss. Da man bei einer Kugel die Pumpenturbinen nur von oben oder der Seite montieren kann, ist deren Montage und Wartung daher schwierig und aufwendig. Eine Alternative zur großen Kugel wäre ein Kugelträger in der Form eines aus Beton gebauten „Containerschiffs“ (Abbildung 2). In einem Hafen wird in einem Dock mit beweglicher Schalung ein großes Containerschiff aus Beton hergestellt, das bei gleicher Speicherkapazität wie eine 100-Meter-Kugel etwa 350 m lang

und 50 m breit wäre. Sein Rumpf erbringt einen wesentlichen Anteil am Sinkgewicht, er enthält nur Wasserverbindungsrohre zu den Pumpenturbinen, die an Heck und Bug montiert werden. Auf diesem Rumpf werden in modularer Form Hohlräume zusammengesetzt, mit Öffnungen verbunden und dann die Zwischenräume mit Beton vergossen. Diese Hohlräume könnten kleinere Kugeln oder Rohre sein.

Ein solch großes Containerschiff könnte sogar einige 100 000 m<sup>3</sup> Hohlraum zur Verfügung stellen. Das Gewicht des leeren Schiffs muss immer kleiner als der Auftrieb sein, zum Sinken wird es erst durch Befüllen mit etwas Wasser gebracht. Das in einem Dock an Land hergestellte Containerschiff kann zu jeder Lagerstätte im Meer transportiert werden.

Die Turbinen könnten so außerhalb des Schiffes montiert sein, dass sie zur Wartung leicht an die Meeresoberfläche gebracht werden können. Eleganterweise könnte man den hohen Druck unten am Meeresboden zu ihrer Montage nutzen: Durch Abpumpen würde sie sich ansaugen und so selbst befestigen. In der Tiefsee ist außerdem der Sauerstoffgehalt sehr klein, und die Wassertemperatur liegt nur bei wenigen Grad Celcius, was die Korrosion der Turbine sehr verlangsamt. Die Wartungszeiten sollten im Bereich einiger Jahre liegen.

Der Energiespeicher auf dem Meeresboden braucht also nur eine elektrische Verbindung (Kabel für einige 10 kV Wechselspannung) zur nächsten Trafostation, die zum Beispiel zum Strom liefernden Offshore-Windpark gehört. Das Betonsystem selbst sollte völlig wartungsfrei sein.

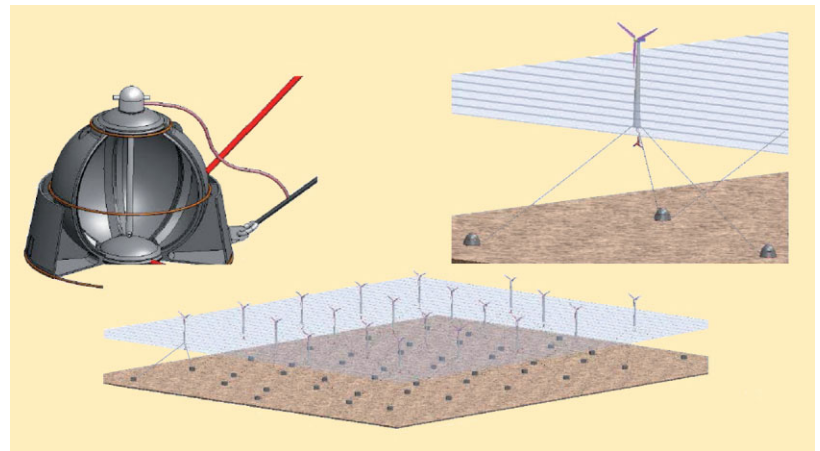
### Umwelteinfluss

Natürlich stellt sich die Frage der Umweltverträglichkeit, zumal die Ökosysteme in der Tiefsee empfindlich sind. Es ist selbstverständlich, dass die Turbineneingänge durch Drahtnetze abgesichert werden müssen, damit keine Fische, Krebse und andere Tiere hineingelangen. Wir hoffen sogar, dass eine noch ausstehende Untersuchung der Umweltverträglichkeit ergibt, dass Betonkörper als künstliches Riff wie ein Wrack eher einen positiven Einfluss auf die lokale Umwelt haben. Muscheln und andere Meerestiere finden auf ihr den Halt, den der schlammige Meeresboden nicht bietet.

Eine etwaige Lärmbelästigung durch das einströmende Wasser muss durch die Geometrie optimiert werden. Sie sollte im Containerschiff typ kleiner als bei einer großen Kugel sein.

### Schwimmende Windräder gehören dazu

Der ideale Speicherplatz wären Meerestiefen von mehr als 2000 m, also dort, also in Regionen, wo auch die stärksten regelmäßigen Winde wehen. Allerdings braucht man Windräder, die bei dieser großen Meerestiefe stabil auf dem Meer „verankert“ werden können. Eine Möglichkeit wären schwimmende Windräder, die mit Kabeln an Ankern oder schweren Körpern auf dem Meeresgrund befestigt werden. Einen solches Konzept, allerdings noch bei deutlich niedri-



**Abb. 3 Schwimmendes Windradsystem mit Unterwasserkugeln als Anker und Stromspeicher [6].**

geren Meerestiefen, will man am MIT in Boston realisieren, wo in wenigen hundert Meter Tiefe große Betonkugeln als Anker dienen sollen (Abbildung 3). Diese Kugeln sollen auch als Stromspeicher genutzt werden. Die geringe Wassertiefe reduziert jedoch deren Speicherkapazität. Der aktuelle Stand im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten schwimmender Windanlagen liegt zurzeit noch bei Wassertiefen bis einige hundert Metern.

In Tiefen von mehr als 1000 m Wassertiefe sollte man jedoch Windräder einsetzen, die keine statische Verankerung mehr benötigen. Hierzu eignen sich schwimmende Windrad-Plattformen. Derzeit wird an verschiedenen Konzepten geforscht, zum Beispiel an Plattformen, die gegen die Wellenbewegung und Umkippen dynamisch stabilisiert werden.

Die Herausforderung einer globalen Energiewende ist so gewaltig, dass auch unkonventionelle Überlegungen nötig sind. Dynamisch stabilisierte Windräder über der Tiefsee zusammen mit den hier beschriebenen Unterwasserspeichern könnten eine lösbare Vision der zukünftigen nachhaltigen Energieversorgung Europas werden. Alle technologisch notwendigen Schritte erscheinen als durchaus machbar. Aus heutiger Sicht muss jedoch die Wirtschaftlichkeit noch verbessert werden. Hieraus resultiert ein Bedarf an Forschung und Entwicklung, den die Politik aufgreifen und unterstützen muss. Partner aus Industrie und Forschung, etwa am Fraunhofer Institut für Windenergieforschung in Kassel, arbeiten bereits an einem kleinen Pilotsystem eines Meeresenergie-Druckspeichers mit Nachdruck. Noch in diesem Jahr soll die erste 3–6 m große Betonkugel in einem süddeutschen See getestet werden.

### Zusammenfassung

*Der wachsende Anteil schwankender erneuerbarer Energiequellen im Netz erfordert mehr Stromspeicherkapazität. Ausgereift sind bislang nur Pumpspeicherkraftwerke. Besonders für schwimmende Offshore-Windparks in Meeren mit viel Wind und großer Wassertiefe könnte eine radikal neue Spei-*



chertechnologie geeignet sein: das Meeres-Druckspeicher-kraftwerk. Das Funktionsprinzip dieses auf den Meeresboden versenkten „Meer-Eises“ ähnelt dem eines Pumpspeicher-kraftwerks. Es ersetzt eines der beiden Reservoirs durch den hohen Wasserdruck in der Umgebung. Die technische Machbarkeit sollen Pilotprojekte zeigen.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Professor Alex Slocum vom M.I.T. in Boston und Dr. Andreas Garg von der Firma Hochtief für Diskussionen und Ideenbeiträge.

### Stichworte

Meeres-Druckspeicherkraftwerk, Meer-Ei, Pumpspeicher-kraftwerk, schwimmende Windräder.

### Literatur

- [1] M. Popp, Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien, Springer Verlag, Heidelberg 2010, sowie deutsches Patent DE 10 2009 005360 von 2010.
- [2] G. Luther, H. Schmidt-Böcking, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2011 105307 von 2011.
- [3] H. Morishige, Japanisches Patent 2755778 von 1971; R. Grüb (1978), deutsches Patent DE 2843675 von 1978; japanisches Patent JP 0000 03188395A von 1991.
- [4] A. G. Fennell, A. Greenlee, Patent WO 2011/112561 A2.
- [5] H. Schmidt-Böcking, G. Luther, deutsche Patentanmeldungen DE 10 2011 0133329 und DE 10.2011 118206 von 2011.
- [6] A. H. Slocum, et al., bei Proc. IEEE eingereicht.
- [7] A. H. Slocum et al., Large Scale Manufacture and Development of Offshore Renewable Energy Harvesting and Storage System, Proc. of the 12th euspen International Conference, Stockholm, Juni 2012.
- [8] [www.cef.nrw.de/\\_database/\\_data/datainfoopool/IRES-Programm-2012.pdf](http://www.cef.nrw.de/_database/_data/datainfoopool/IRES-Programm-2012.pdf).

### Die Autoren



V. l. n. r.: **Horst Schmidt-Böcking**, geb. 1939, war bis zu seiner Emeritierung 2004 Professor für Atom- und Molekülphysik an der Goethe-Universität in Frankfurt/Main. Für die Entwicklung des COLTRIMS-Reaktionsmikroskops erhielt er 2008 den Davisson-Germer-Preis der APS und 2010 die Stern-Gerlach-Medaille der DPG. Mit Erneuerbarer Energie beschäftigt er sich seit fünf Jahren. **Gerhard Luther**, geb. 1943, ist promovierter Physiker und leitete bis zu seinem Ruhestand an der Universität des Saarlandes die Forschungsstelle Zukunftsenergie in der Experimentalphysik. Dort forscht er noch mit Schwerpunkt Energieeffizienz und „Thermodynamisch optimiertes Heizen“. Er ist Stellvertretender Vorsitzender des Arbeitskreises Energie (AKE) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG). **Christoph Lay** ist Diplomingenieur und hat 2003 einen Master of Science erworben. Nach einer beruflichen Laufbahn bei der Robert Bird Group ist er seit Anfang 2011 Senior Projektleiter in der Konzernentwicklung bei der Hochtief AG in Essen. Nebenher absolviert er einen MBA-Studiengang (Global Business) in Louisville / USA. **Jochen Bard**, geb. 1967, ist promovierter Physiker. Nach dem Studium an den Universitäten Karlsruhe und Kassel kam er 2000 zum Fraunhofer Institut IWES nach Kassel. Seine Arbeitsgebiete sind Erneuerbare Energie und Energiespeicherung, insbesondere Meeresenergie-technologien, Offshore-Windenergie und Energiespeichertechnologien. Seit 2012 ist er Leiter der Abteilung Energie-wandlung und Energiespeicher am IWES.

### Anschrift

Prof. Dr. Horst Schmidt-Böcking, Institut für Kernphysik,  
Goethe-Universität Frankfurt  
D-60438 Frankfurt. [hsb@atom.uni-frankfurt.de](mailto:hsb@atom.uni-frankfurt.de)