

Fortsetzung von Seite 45

dem James-Webb-Weltraumteleskop», sagt Franco Perez vom europäischen Weltraumforschungszentrum Estec in den Niederlanden. «Der Asteroid verhält sich etwas merkwürdig.»

Eigentlich hatten Geologen gedacht, sie würden nach dem Einschlag von Dart einen Krater auf Dimorphos finden. Tatsächlich wurden aber mehr als 10 000 Tonnen Staub und Gesteinsmaterial ausgeworfen, was etwa einem Prozent der Gesamtmasse des Asteroiden entspricht. Im Schlepptau des 150 Meter grossen Asteroiden bildete sich eine Art Schweif, der sogar von der Erde aus zu beobachten war.

Laut Simulationen von italienischen und spanischen Forschern könnten einige der ausgeworfenen Partikel in den nächsten Jahren den Mars und die Erde erreichen und in der Erdatmosphäre verglühen. Damit hatte man vorher nicht gerechnet. «Bei der Umformung des Asteroiden wurde mehr Material ausgeworfen, als wenn nur ein kleiner Krater entstanden wäre», erklärt Martin Jutzi vom Physikalischen Institut der Universität Bern. Jutzi gehört zu einem internationalen Forscherteam, das mit Computerhilfe den Einschlag der Sonde simuliert hat. Bei den Modellrechnungen kam heraus, dass der Einschlagkrater so weit gewachsen sein muss, dass er schliesslich den gesamten Körper umfasste – mit dem Ergebnis, dass Dimorphos komplett umgestaltet wurde und eine neue Form erhielt.

«Hera wird wahrscheinlich keinen Krater mehr entdecken», sagt Sabina Raducan, die ebenfalls an der Universität Bern forscht. Die Simulationen deuteten darauf hin, dass die ursprüngliche Untertassenform von Dimorphos auf der Einschlagsseite abgestumpft wurde. «Anfangs sah Dimorphos aus wie M&M-Schokolinsen – jetzt sieht er aus, als hätte er einen Biss abbekommen.»

### Ein völlig anderer Kurs

Sollte sich irgendwann einmal ein Asteroid im Anflug auf die Erde befinden, würde es nicht ausreichen, ein Stück aus ihm «herauszubeissen». Das eigentliche Ziel einer Asteroidenabwehr besteht darin, den Kurs eines Asteroiden so zu ändern, dass er an der Erde vorbeifliegt.

Dafür ist in erster Linie der Impuls zuständig, der beim Aufprall auf den Asteroiden übertragen wird, so wie beim Zusammenstoss zweier Billardkugeln. Das alleine kann aber nicht erklären, warum Dimorphos seinen Kompagnon Didymos nun 33 Minuten schneller umkreist als vor dem Stoss. Der Rückstoss der ausgeworfenen Masse muss Dimorphos zusätzlichen Schub verliehen haben.

Dieser Verstärkungseffekt durch den Rückstoss erleichtert es im Prinzip, einen Asteroider aus seiner Bahn abzulenken. Die Berner Forscher sprechen aber auch eine Warnung aus. Eine Sonde vom Typ Dart könnte einen kleineren Asteroiden auch zerschmettern, wenn dieser aus lockerem Gestein besteht. Das könnte sich als Eigentor für die Menschheit herausstellen, da statt eines grossen Brockens dann womöglich viele kleine Kurs auf die Erde halten.

Eine der grossen Unbekannten ist, wie genau Dimorphos zusammengesetzt ist. «Besteht der Asteroid aus Sand oder aus festem Gestein?», fragt sich der Hera-Chefwissenschaftler Patrick Michel. Erst mit diesem Wissen lasse sich präzise berechnen, welche Auswirkungen der Einschlag des Impaktors 2022 gehabt habe. Diese Information soll Hera liefern. Sobald die Sonde bei Dimorphos eingetroffen ist, soll sie sich dem kleinen Asteroiden auf bis zu 30 Kilometer annähern und ihn aus der sicheren Distanz heraus scannen und untersuchen. Danach wird sie in nur einem Kilometer Entfernung an ihm vorbeifliegen, um noch genauere Messungen durchzuführen.

Dabei lässt es die ESA nicht bewenden. Nach der Ankunft bei Dimorphos wird Hera zwei Tochteronden aussetzen. Juventas soll mit einem Radar bis zu 70 Meter tief unter die Oberfläche von Dimorphos schauen. Milani wird sogar versuchen, auf dem Himmelskörper zu landen. Eines der Instrumente an Bord soll exakt bestimmen, wie stark Didymos und Dimorphos sich anziehen. Daraus wiederum können Forscher auf die Masse der beiden Gesteinsbrocken und ihren inneren Aufbau schliessen.

Vor dem Aufsetzen auf Dimorphos dürfte Milani aber erst einige Male von der Oberfläche des Asteroiden abprallen und wie ein Gummiball wieder zurückspringen ins All. Dabei werden wohl die stromerzeugenden Sonnensegel der kleinen Sonde zu Bruch gehen, so dass für Messungen auf der Oberfläche nur wenig Zeit bleibt.

Die Hera-Sonde soll frühestens am 7. Oktober mit einer Rakete von SpaceX auf ihre zweijährige Reise gebracht werden.

# Des Pudels Kern

Sonne und Wind sind flatterhafte Energiequellen, die das Stromnetz an seine Grenzen bringen. Lassen sie sich sinnvoll mit Kernkraft kombinieren? Von Sven Titz

Sie könnten unterschiedlicher kaum sein: Solaranlagen und Windkraftanlagen sind über das Land verteilt; sie generieren Strom, wenn gerade die Sonne scheint oder der Wind weht. Kernkraftwerke hingegen liefern permanent Strom, pro Anlage ist das Stromangebot wesentlich grösser als bei den beiden Quellen erneuerbarer Energien.

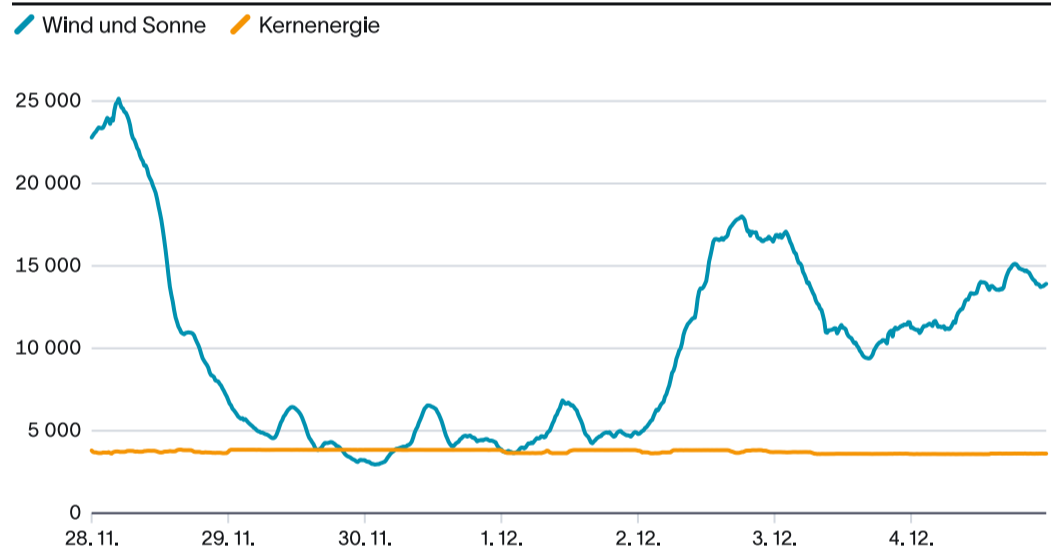
In der Schweiz, Deutschland und vielen anderen Ländern werden Solar- und Windkraftanlagen derzeit ausgebaut, um weniger Kohlendioxid auszustossen. Das bringt aber auch Herausforderungen mit sich. Das schwankende Stromangebot muss in das Stromnetz eingespeist werden, ohne Probleme zu verursachen. Und es muss mit dem Betrieb von permanent laufenden Kraftwerken vereinbar werden.

Kernkraftwerke sind eine konstante Energiequelle und ausserdem CO<sub>2</sub>-arm. Doch nicht überall wird die Kernenergie von der Bevölkerung akzeptiert. Deutschland ist ausgetieft, während die Schweiz sie weiterhin nutzt. Man will sie hier zwar auslaufen lassen, doch über diesen Entscheid wird derzeit neu diskutiert. Österreich hat nie ein Kernkraftwerk betrieben, andere europäische Länder sind der Kernenergie treu geblieben, manche bauen sie aus, manche wollen ganz neu in sie einsteigen.

Unabhängig davon, wie man nun zu der Energiequelle steht: In der Schweiz wie auch auf europäischer Ebene stellt sich die Frage, ob die fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen mit der Kernenergie vereinbar sind – und wie das funktioniert. Fachleute sehen zwar Schwierigkeiten, aber auch Lösungen, die noch nicht alle realisiert sind. Die Integration der beiden Energiequellen scheint mit Gewinn möglich zu sein, sofern man eine Reihe von Punkten beachtet.

Grundsätzlich ist eine fluktuierende Stromerzeugung eine Herausforderung für das Stromnetz. Um eine stabile Netzfrequenz von 50 Hertz zu gewährleisten, müssen Angebot und Nachfrage immer im Gleichgewicht sein. Die schwankende Stromproduktion durch Wind und Sonne muss also ausgeglichen werden, um die Energiequellen in das Stromnetz zu integrieren. Für diesen Ausgleich kommen zum Beispiel Wasserkraft- oder Gaskraftwerke infrage, aber auch Kernkraftwerke. Die Anlagen Gösgen und Leibstadt in der Schweiz seien im Prinzip darauf

Strom aus Wind und Sonne schwankt zuweilen stark. Leistung von Wind- und Solaranlagen sowie von Kernkraftwerken in Deutschland Ende 2022, in Megawatt



Quelle: Energy-Charts NZZ / sv.

ausgelegt, dass man sie im sogenannten Lastfolgebetrieb fahren könne, sagt der Physiker Andreas Pautz vom Paul-Scherrer-Institut (PSI). Er leitet dort das Zentrum für Nukleartechnologien und -wissenschaften.

Lastfolge bedeutet, dass die Einspeisung des Kraftwerks ins Stromnetz dem Strombedarf folgt. Es sei technisch möglich, sagt Pautz, die Leistung von Kernkraftwerken innerhalb von einer Minute um wenige Prozent zu senken oder zu steigern.

### Es kommt auf die Menge an

Allerdings ist es für Kernkraftwerke nicht gerade günstig, wenn sie ihre Auslastung temporär senken müssen, nur weil plötzlich sehr viel Solar- oder Windstrom ins Netz fliessen. Das verringert die Wirtschaftlichkeit der Kernkraftwerke, und der Verschleiss der Anlagen nimmt zu. Ideal wäre es, wenn sie 95 Prozent der Zeit unter Vollast betrieben werden könnten, sagt der Ingenieur Russell McKenna, ebenfalls vom PSI – dort leitet er das Labor für Energiesystemanalyse.

Konstant gelieferter Strom für den Grundbedarf wird als Bandenergie bezeichnet. Eine Reihe von Energiesystemanalysen zeige, dass ein extrem hoher Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen die Systemkosten enorm anhebe, sagt Pautz. «Dann muss man viel bei der Speicherung und beim Netzausbau machen.» Höhere Systemkosten bedeuten auch einen höheren Strompreis.

Der PSI-Wissenschaftler vermutet, dass es ein Optimum für die Anteile an Bandenergie und an fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen gibt. Seiner Ansicht nach ist ein Anteil von 20 bis 25 Prozent an Bandenergie vernünftig. Der Institutskollege McKenna sieht das genauso. Aus Kostensicht sei es nicht unbedingt optimal, auf 100 Prozent erneuerbare Energiequellen zu setzen.

Nicht nur in der Schweiz und Deutschland wird darüber gestritten, wie gut sich verschiedene Energiequellen vereinbaren lassen, sondern auch in vielen anderen europäischen Ländern. In Schweden zum Beispiel gebe es einen Kulturkampf zwischen Befürwortern der Windenergie und Befürwortern der Kernenergie, sagt Filip Johnsson, Professor für Energiesysteme an der Chalmers University of Technology in Göteborg, Schweden.

Die Stromversorgung des Landes beruht derzeit auf sechs Kernreaktoren, einer Menge Wasserkraft, wenigen fossilen Energiequellen, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Fernwärmesystemen und einer wachsenden Zahl an Windkraftanlagen. Es gebe aber Pläne, den Bestand an Kernkraftwerken auszubauen, sagt Johnsson. Was die Umsetzung angeht, ist er jedoch skeptisch. Die Kernenergie sei kostspielig und mit langen Vorlaufzeiten verbunden. Die drei anderen europäischen Kernkraftwerkprojekte – in Gross-



Die Kernkraftwerke Leibstadt und Gösgen sind darauf ausgelegt, mit der Einspeisung ins Netz dem Strombedarf zu folgen.

britannien, Frankreich und Finnland – hätten sich alle verzögert, die Kostenüberschreitungen seien hoch.

Europa und Nordamerika seien es nicht mehr gewohnt, so komplexe Projekte wie den Bau eines Kernkraftwerks zu stemmen. Hinzu komme, so Johnsson, dass in Schweden wie auch in anderen europäischen Ländern inzwischen das Fachpersonal fehle, das man für den Bau eines Kernkraftwerkes brauche: «Viele Fachleute sind gestorben oder in Rente.»

### Mehr Speicher, bitte

Die grösste Herausforderung bei der Aufgabe, verschiedene Energiequellen miteinander in Einklang zu bringen, seien jedoch nicht technische Hindernisse, sondern solche wie Ideologie, soziale Akzeptanz und finanzielle Risiken, sagt Filip Johnsson.

Für den Zuwachs an erneuerbaren Energiequellen ist es jedenfalls nötig, das Stromnetz in bestimmten Gebieten auszubauen, wie McKenna vom PSI erläutert. Darüber hinaus könnten spezielle Überwachungstechnologien helfen, bestehende Trassen maximal auszulasten, ohne eine Überlastung der Leitungen zu riskieren.

Ausserdem braucht es Speicher – nicht nur solche für wenige Stunden. Sondern auch saisonale Speicher, die den Überschuss aus dem Sommer in den Winter retten. Beispielsweise könnten sogenannte Power-to-X-Technologien zum Einsatz kommen, die Strom in einen anderen Energieträger umwandeln, Wasserstoff zum Beispiel. Dieses Prinzip ist theoretisch für die Deckung der «Winterlücke» durch Stromerzeugung in Brennstoffzellen geeignet, leidet aber unter niedriger Effizienz und sehr hohen Kosten.

Falls der Stromüberschuss nur in Wärme umgewandelt werden soll, sind Wärmepumpen in Verbindung mit saisonalen thermischen Energie-

speichern eine gute Kombination, wie McKenna sagt. Sie habe sich in Deutschland und Dänemark bereits bewährt. Grundsätzlich denkbar ist es auch, die Nachfrage der Industrie nach Strom flexibler zu gestalten. Diese Massnahme ist allerdings umstritten, weil sie die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen könnte. Besonders energieintensive Prozesse müssten auf angebotsreiche Stunden verlegt werden. Dafür braucht es finanzielle Anreize und eine geeignete Infrastruktur.

Eine wichtige Rolle, wenn man mehr Flexibilität in der Stromversorgung will, spielt auch das sogenannte intelligente Stromnetz (Smart Grid). Eine Idee ist, dass Elektroautos an Ladestationen nicht nur Strom beziehen, sondern manchmal auch Strom abgeben, wenn er gerade nicht zum Fahren gebraucht wird. Das könnte das Stromnetz stabilisieren helfen. Die für das Smart Grid nötigen Geräte fehlen aber vielerorts noch.

Theoretisch könnten Privathaushalte ihren Strombedarf an das Angebot anpassen. Der Ge-

schrirrspüler würde dann vielleicht nachts laufen, wenn der Strom billig ist. Doch laut McKenna sparen Privathaushalte derzeit nur sehr wenig, wenn sie flexibler bei der Stromnachfrage sind – 30 bis 40 Franken pro Jahr. So seien nur wenige Menschen zu dieser Verhaltensänderung bereit.

Eine lokale Lösung könnten sogenannte Energy-Communitys bieten. Das sind lokale Energiegemeinschaften von Haushalten, die zu einem flexibleren Stromnetz beitragen, etwa indem sie einen gemeinsamen Energiespeicher nutzen. Zum einen ist das für den einzelnen Haushalt günstiger, weil ein grosser Speicher billiger ist als viele kleine. Zum anderen treten Synergieeffekte auf, weil sich die Nachfrage wie auch das Angebot – über die gesamte Energy-Community betrachtet – zeitlich besser verteilen.

### Intelligenter werden

Auf der Gemeindeebene ist die Schweiz grundsätzlich gut auf die Aufgabe vorbereitet, das lokale Stromnetz in den nächsten Jahren flexibler zu gestalten. Die Verteilnetze, die den Strom lokal zu den Haushalten führten, seien hierzulande in der Regel überdimensioniert, sagt McKenna. «Da steht der typisch schweizerische Gedanke dahinter, dass das Netz sehr robust sein soll.»

Mittelfristig allerdings, etwa bis ins Jahr 2035, könnten zusätzliche Energiequellen wie Photovoltaik oder eine zusätzliche Nachfrage, zum Beispiel durch Elektroautos, häufiger zu Problemen im Netz führen. Das bedeutet laut McKenna aber nicht gleich, dass das Netz instabil würde. Stattdessen verzögerte sich der Netzanschluss vermutlich so lange, bis man die Netzinfrastruktur erweitert hätte.

Für die Netzbetreiber wäre es allerdings auch ein Problem, wenn sie nicht mehr so gut planen könnten wie früher. Diese Entwicklung zeichnet sich bereits ab: Mancherorts sinkt die Nachfrage nach Strom lokal, weil Haushalte den selbst generierten Strom, zum Beispiel von einem Solardach, auch gleich selbst nutzen. Eine Herausforderung für die Zukunft wird ausserdem sein, überhaupt genügend Fachkräfte für den Umbau des Stromnetzes zu finden.

Grundsätzlich findet McKenna, dass die Diversifizierung bei der Stromversorgung eine Stärke sei. Vor zwei Jahren hätten Kollegen vom PSI untersucht, wie es um die Versorgungssicherheit der nationalen Stromsysteme in Europa stehe. Frankreich habe da relativ schlecht abgeschnitten, weil dort die Kernenergie so dominant sei. Eine höhere Punktzahl erreichten Länder mit einer stärkeren Mischung der Stromquellen wie zum Beispiel Dänemark, Island, Schweden und die Schweiz.

Um ein Energiesystem mit netto null Emissionen zu erreichen, brauche man alle Massnahmen, die zur Verfügung stünden, sagt McKenna. «Schliessen wir einzelne Massnahmen aus, heisst das nur, dass wir noch mehr von den anderen brauchen.»