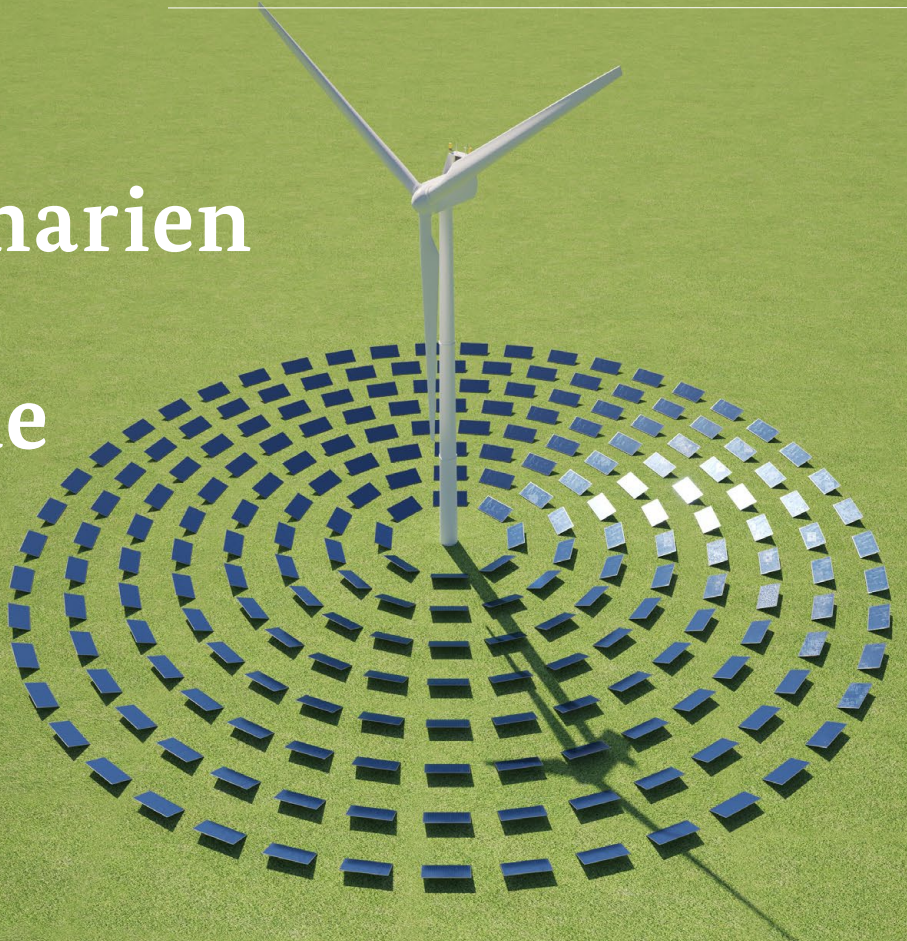


# Neue Langfristszenarien für die Energiewende



**D**eutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu werden. In der Europäischen Union (EU) soll dieses Ziel bis 2050 erreicht werden. Flankierend gibt es auf nationaler und europäischer Ebene eine Reihe von ergänzenden Zielen, beispielsweise für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Diese Ziele erfordern einen grundlegenden Umbau des Energiesystems (Strom, Wärme, Verkehr), der nahezu alle Bereiche der Volkswirtschaft betrifft. Denn um die Energiewende erfolgreich zu meistern, müssen letztendlich sowohl private Haushalte als auch Unternehmen und die öffentliche Hand in Zukunft ihre Energien aus nachhaltigen Quellen beziehen, d. h. im Kern aus erneuerbaren Energien. In dem Forschungsvorhaben „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ lässt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) untersuchen, wie Deutschland seine Klima- und Energieziele erreichen kann. Das Vorhaben wird von einem Konsortium um das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und das Beratungsunternehmen Consentec bearbeitet.

In den neu vorgestellten Szenarien haben sich viele Erkenntnisse aus den bisherigen Szenarien einmal mehr als robust erwiesen. Dazu gehören der Bedarf an einem starken Ausbau der Stromnetze sowohl auf Übertragungs- als auch auf Verteilnetzebene, der Aufbau eines Wasserstoffnetzes, die hohe Bedeutung von Elektrolyse, pipelinegebundenen Wasserstoffimporten, Wasserstoffspeichern und Wasser-

stoffkraftwerken sowie Großwärmepumpen und Wärmespeichern in Wärmenetzen. Weiterhin zeigen die neuen Szenarien, dass sich ein Photovoltaik (PV)-Ausbau über die bereits sehr ambitionierten Ziele des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) hinaus zunehmend schwer integrieren ließe – von der zusätzlichen Stromerzeugung könnte ein erheblicher Teil nicht genutzt und müsste abgeregelt werden. Batterien könnten dies zwar ein Stück weit abfedern, den hohen Umfang des abgeregelt PV-Stroms aber nur begrenzt verringern. Zwar reduziert die Kombination aus hohem Ausbau von PV und Batterien den Ausbaubedarf im Übertragungsnetz, jedoch ist dieser Effekt begrenzt und wird unter Kostengesichtspunkten durch den spürbar höheren Ausbaubedarf in den Verteilnetzen überkompensiert. Letztlich ist ein ausgewogener Mix an Erzeugungstechnologien für ein effizientes Gesamtsystem von hoher Bedeutung.

## PHILOSOPHIE DER BMWK-LANGFRISTSZENARIOEN

Vorweg ist festzuhalten: Niemand kann über einen Zeitraum von 20 bis 25 Jahren eine Entwicklung verlässlich prognostizieren, da diese mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. Beispielsweise lassen sich technologische Entwicklungen nur begrenzt abschätzen. Aber auch ökonomische, politische oder gesellschaftliche Entwicklungen können die Rahmenbedingungen stark verändern. So konnten frühere Szenarien den Ausstieg



aus dem Bezug von russischem Erdgas nicht voraussehen. Perspektivisch bestehen große Unsicherheiten, z. B. in Bezug auf die Frage, wann welche Mengen an Wasserstoff zu welchen Preisen verfügbar sein werden.

Vor diesem Hintergrund streben die BMWK-Langfristszenarien nicht an, im Sinne eines Leitszenarios die „richtige“ oder vermeintlich wahrscheinlichste Entwicklung in die Zukunft zu prognostizieren. Vielmehr verfolgen sie den Ansatz, verschiedene denkbare Entwicklungspfade aufzuzeigen, mit denen die Klimaziele erreicht werden können. So ist grundsätzlich eine klimaneutrale Welt denkbar, die stark auf Elektrifizierung setzt, also z. B. Elektromobilität und Wärmepumpen. Alternativ lässt sich Klimaneutralität aber auch mit einer stärkeren Nutzung von Wasserstoff erreichen. Auch bei den erneuerbaren Energien sind unterschiedliche Entwicklungen denkbar, z. B. mehr Strom aus Photovoltaik oder mehr Strom aus Wind. In diesem Sinne werden in den Langfristszenarien verschiedene mögliche Entwicklungspfade modelliert. Dabei erfolgt eine „techno-ökonomische“ Optimierung: Die eingesetzten Modelle ermitteln unter den jeweils vorgegebenen Rahmenbedingungen und getroffenen Annahmen den aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kostengünstigsten Entwicklungspfad. Vergleicht man die so ermittelten Entwicklungspfade miteinander, so lassen sich Schlussfolgerungen daraus ziehen, welche Entwicklungen „robust“ sind. Beispielsweise erhält man auf diese Weise ein besseres Bild davon, wie stark die Stromnetze ausgebaut werden müssen oder wie viel Wasserstoff künftig benötigt wird.

### KOMPLEXER MODELLVERBUND

In den BMWK-Langfristszenarien werden alle Bereiche des Energiesystems untersucht. Dies umfasst zum einen die Energienachfrage u. a. in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr sowie in den privaten Haushalten. Zum anderen wird das Energieangebot stundenscharf für ganz Europa modelliert und kostenoptimiert. Eine stundenscharfe Modellierung ist vor allem deshalb wichtig, weil die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sehr stark schwankt. Zum Energieangebot gehören neben dem Stromsektor auch die Wärmebereitstellung in den Wärmenetzen und die Bereitstellung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern. Zudem werden im Gegensatz zu vielen anderen Gesamtsystemstudien auch Strom-, Gas- und Wasserstoffnetze modelliert, d. h. die Modelle ermitteln unter den jeweiligen Rahmenbedingungen (z. B. stärkerer Ausbau der Photovoltaik oder stärkerer Ausbau der Windenergie) den jeweiligen Netzausbaubedarf. Diese Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Entwicklungspfade auf die Energieinfrastrukturen bildet einen Schwerpunkt der Langfristszenarien.

### NEUE LANGFRISTSZENARIOEN

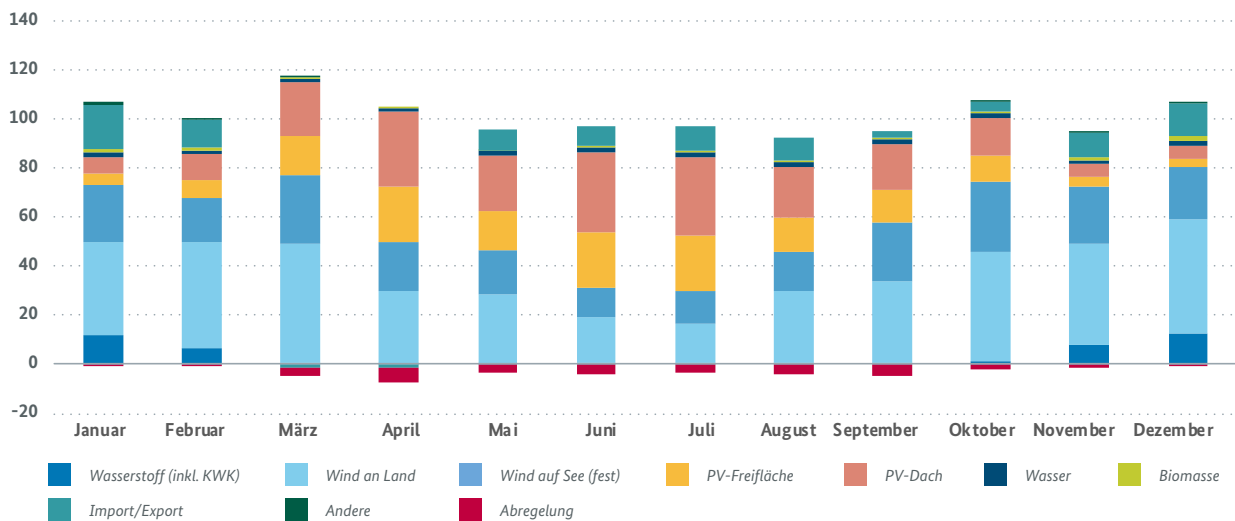
Am 15. Februar 2024 wurden vier neue Szenarien vorgestellt, welche die Erkenntnisse, die sich aus den bisherigen Szenarien ergeben, weiter verbessern:

- ein Szenario, in dem Klimaneutralität im Jahr 2045 durch eine starke direkte Nutzung von erneuerbarem Strom erreicht wird, das so genannte Szenario T45-Strom\*; gegenüber dem früheren Szenario T45-Strom wurden hier diverse Verbesserungen und Aktualisierungen in den Modellen implementiert, beispielsweise eine stärkere Berücksichtigung der Rückspeisung von Strom aus Batterien in E-Fahrzeugen ins Stromnetz („vehicle-to-grid“) oder eine Aktualisierung der Anlagenhöhe und des Rotordurchmessers von Windenergieanlagen;
- ein Szenario, in dem im Vergleich zu T45-Strom\* ein extrem hoher Ausbau der Photovoltaik unterstellt wird (Szenario T45-PV+)
- sowie darauf aufbauend ein Szenario mit hohem Zubau von Batteriespeichern (Szenario T45-Dezentral);
- ein Szenario, in dem im Vergleich zu T45-Strom\* ein deutlich geringerer Ausbau von Wasserstoffspeichern angenommen wird (T45-RedH2SP).

Die Ergebnisse der Modellierung im Szenario T45-Strom\* unterscheiden sich nur begrenzt von den Ergebnissen im Szenario T45-Strom. Beispielsweise ergibt sich ein etwas geringerer Ausbaubedarf der Stromnetze sowohl auf der Ebene der Übertragungsnetze als auch bei den Verteilnetzen. Auch der Ausbau der Photovoltaik (PV) fällt etwas geringer aus. Statt 428 Gigawatt (GW) im Szenario T45-Strom sind es im Szenario T45-Strom\* „nur“ 400 GW. Im Gegenzug wird aufgrund der aktualisierten Konfiguration bei Windenergieanlagen bei gleicher installierter Leistung mehr Strom aus Wind erzeugt. Im Wärmebereich bestätigt das Szenario T45-Strom\* die hohe Bedeutung von Großwärmepumpen und Wärmespeichern in Wärmenetzen, die zunehmend Strom aus erneuerbaren Energien nutzen.

Wichtig für das Verständnis des Gesamtsystems ist der Blick auf die saisonalen Schwankungen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien: Im Sommer wird viel Strom aus Photovoltaik erzeugt, im Winter dominiert die Windenergie. Dabei wird es zunehmend Phasen geben, in denen so viel Strom erzeugt wird, beispielsweise PV-Strom an sonnigen Sommertagen, dass dieser die Nachfrage deutlich übersteigt. Schon heute wird in solchen Phasen Strom exportiert oder abgeregelt, d. h. er



**ABBILDUNG 1: SAISONALE SCHWANKUNGEN IN DER STROMERZEUGUNG AUF LANGE SICHT (2045)**


Quelle: Fraunhofer ISI, [www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de); siehe S. 16 in der folgenden Präsentation: [www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3\\_T45\\_Webinar\\_Feb\\_2024\\_Dezentral\\_final\\_presented.pdf](http://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Webinar_Feb_2024_Dezentral_final_presented.pdf)

wird gar nicht ins Netz eingespeist, bleibt also ungenutzt. Daher ist eine hohe Flexibilität im System wichtig, um solche Abregelungen möglichst gering zu halten. Beispielsweise können Elektrolyseure bei hoher Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien Wasserstoff erzeugen, der gespeichert und im Winter bei geringer PV-Einspeisung zur Deckung des dann höheren Bedarfs (Wärmepumpen) wieder verstromt werden kann. Aber auch unter Berücksichtigung dieser Option kann eine hohe PV-Einspeisung unter Umständen nicht vollständig genutzt und muss dann abgeregelt werden. Dies wird in der Abbildung 1 deutlich, die zeigt, dass in den Monaten mit hoher PV-Stromerzeugung Abregelungen erforderlich sind (rote Fläche unterhalb der Nulllinie).

### DEZENTRALITÄTS-SZENARIEN

Schwerpunkt der neu vorgestellten Szenarien waren die Auswirkungen eines extrem hohen Ausbaus der Photovoltaik (Szenario T45-PV+) sowie darauf aufbauend eines hohen Zubaus von Batteriespeichern (Szenario T45-Dezentral). Zur Einordnung der Ergebnisse ist es wichtig festzuhalten, dass das Ausgangsszenario T45-Strom\* bereits einen sehr hohen PV-Ausbau beinhaltet. Dort sind die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegten Ausbauziele dem Modell als Mindestausbau vorgegeben, also z.B. eine installierte Leistung von 400 Gigawatt (GW) PV bis zum Jahr 2040. Im Szenario T45-PV+ wird dem Modell ab 2030 ein jährlicher PV-Zubau von 30 GW vorgegeben. Daraus ergibt sich

im Jahr 2045 eine installierte PV-Kapazität von 693 GW. Auch im europäischen Ausland wird ein entsprechend erhöhter PV-Zubau vorgegeben. Im Gegenzug wird der dem Modell vorgegebene Mindestausbau bei Wind an Land reduziert, in Deutschland von 160 GW gemäß EEG auf 128 GW. Das Modell hat zwar die Möglichkeit, über diesen Mindestausbau hinauszugehen, nutzt diese Möglichkeit aber aufgrund der sehr hohen PV-Strommengen nicht.

Im Szenario T45-Dezentral wird dem Modell zusätzlich zu diesem extremen PV-Ausbau ein hoher Ausbau von stationären Batterien sowie eine stärkere Nutzung der Rückspeisung von Strom aus Batterien von E-Fahrzeugen („vehicle-to-grid“) vorgegeben. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der derzeit zu beobachtende starke Ausbau von PV-Heimspeichern in den Langfristszenarien ohne entsprechende Vorgabe nicht abgebildet wird. Grund dafür ist der Ansatz der gesamtwirtschaftlichen Optimierung: PV-Heimspeicher können privatwirtschaftlich interessant sein, weil man damit höhere Anteile des selbst erzeugten PV-Stroms nutzen kann und dafür den kompletten Strompreis einschließlich Netzentgelten und Mehrwertsteuer spart. Diese private Ersparnis schlägt sich auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene aber nicht nieder. Das Modell wählt daher andere Flexibilitätsoptionen, die aus Systemsicht günstiger sind.



## AUSWIRKUNGEN DER SZENARIEN T45-PV+ UND T45-DEZENTRAL AUF DAS GESAMTSYSTEM

Wie wirken sich der starke Ausbau von PV beziehungsweise Batteriespeichern nun im Gesamtsystem aus? Das ist die Kernfrage, um die es bei diesen beiden Szenarien ging.

- Im Ergebnis führt der extrem hohe PV-Ausbau im Szenario T45-PV+ zu einem starken Anstieg der Stromerzeugung. Allerdings kann ein erheblicher Teil des zusätzlich erzeugten Stroms nicht genutzt werden. Die abgeregelten Strommengen steigen deutlich auf rund 200 TWh (siehe Abbildung 2, Fläche unterhalb der Nulllinie in der zweiten Säule), weil diese hohe PV-Stromerzeugung in vielen Phasen weder im Inland verbraucht oder gespeichert noch exportiert werden kann.
- Wird zusätzlich auch die Flexibilität im System erhöht, wie im Szenario T45-Dezentral durch starken Ausbau von Batteriespeichern, gelingt die Integration der hohen PV-Stromerzeugung zwar besser, auch hier werden aber noch gut 100 TWh abgeregelt (siehe Abbildung 2, Fläche unterhalb der Nulllinie in der dritten Säule).
- Positiv wirkt sich die Kombination aus starkem Ausbau von PV und Batteriespeichern im Szenario Bedarf an Strom aus Wasserkraftwerken aus, der gegenüber dem Szenario T45-Strom\* um ein Drittel sinkt.
- Der Ausbaubedarf im Übertragungsnetz ist im Szenario T45-PV+ gegenüber T45-Strom\* nahezu unverändert, im Szenario T45-Dezentral geht er um etwa 10 Prozent zurück, bleibt damit aber hoch. Ein starker Ausbau der

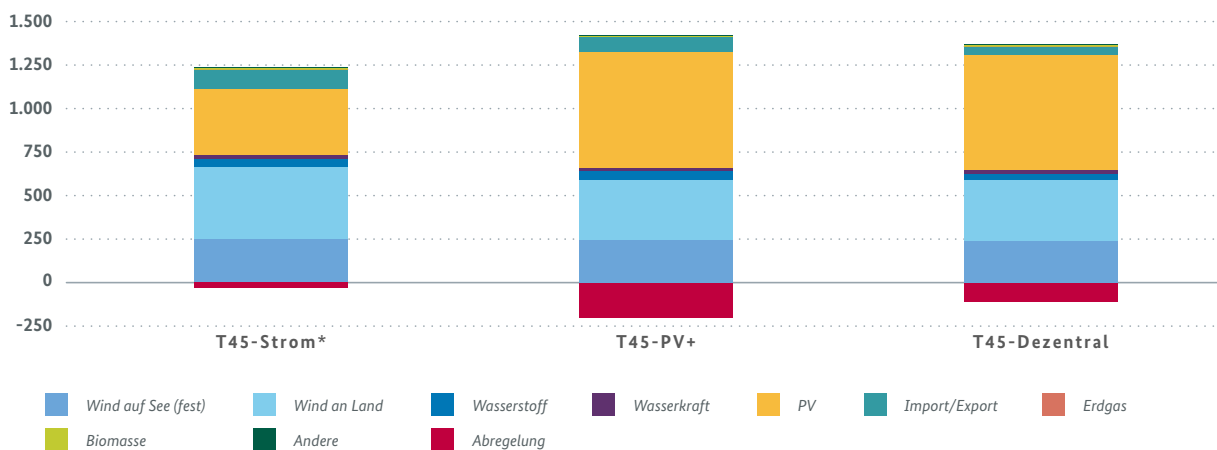
Übertragungsnetze ist also auch in diesen Szenarien erforderlich.

- Signifikant höher ist im Szenario T45-PV+ der Ausbaubedarf in den Verteilnetzen.
- Insgesamt weist das Szenario T45-Dezentral jährliche Systemkosten aus, die um 18 Milliarden Euro über den Kosten des Szenarios T45-Strom\* liegen, beim Szenario PV+ sind es 11 Milliarden Euro Mehrkosten pro Jahr. Beide Szenarien führen also im Vergleich zum Szenario T45-Strom\* zu erheblichen Mehrkosten im Gesamtsystem.

## BEDEUTUNG VON WASSERSTOFFSPEICHERN – SZENARIO T45-REDH2SP

Wasserstoffspeicher können insbesondere im Sommer Überschüsse in der Stromerzeugung nach erfolgter Umwandlung des Stroms in Wasserstoff (Elektrolyse) aufnehmen und so wichtige Beiträge zur Stromversorgung im Winter leisten (Verstromung des gespeicherten Stroms in Wasserkraftwerken), wenn der Strombedarf hoch (z. B. wegen der Wärmepumpen) und die Stromerzeugung aus PV gering ist (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus tragen Wasserstoffspeicher auch zur Versorgungssicherheit bei etwaigen Ausfällen von Wasserstoffimporten bei. Denn ein erheblicher Teil des künftigen Wasserstoffbedarfs wird Deutschland – wegen der begrenzten inländischen Potenziale zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren und zur Wasserstoffspeicherung, aber auch aus Kostengründen – importieren müssen.

ABBILDUNG 2: AUSWIRKUNGEN DER SZENARIEN T45-PV+ UND T45-DEZENTRAL AUF DIE STROMERZEUGUNG



Quelle: Fraunhofer ISI, [www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de); siehe S. 30 in der folgenden Präsentation: [www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3\\_T45\\_Webinar\\_Feb\\_2024\\_Dezentral\\_final\\_presented.pdf](http://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Webinar_Feb_2024_Dezentral_final_presented.pdf)

Die Langfristszenarien zeigen auf lange Sicht einen Bedarf von 70 bis 100 TWh an Wasserstoffspeichern auf. In einem neuen Szenario T45-RedH2SP wurde nun analysiert, wie das Ziel der Klimaneutralität auch bei einem geringeren Ausbau von Wasserstoffspeichern erreicht werden kann. Dazu wurde das Wasserstoff-Speichervolumen in Deutschland und Europa auf die bereits vorhandenen Erdgas-Kavernenspeicher begrenzt, was in Deutschland einem Wasserstoffvolumen von 31 TWh entspricht. Im Ergebnis fehlen durch diese Begrenzung erhebliche Mengen an Wasserstoff im Winter, die dann in dem Szenario zu temporär hohen Wasserstoffimporten aus dem außereuropäischen Ausland per Schiff führen. Im Sommer besteht dagegen an solchen Importen kein Bedarf. Dies bedeutet, dass die Speicherfunktion in diesem Szenario faktisch ins Ausland verlagert wird. Im Ergebnis unterstreicht das Szenario die hohe Bedeutung von Wasserstoffspeichern in einer Energieversorgung, die stark auf fluktuierende Energieträger setzt. —

#### KONTAKT & MEHR ZUM THEMA

Referat: KA3 – Ökonomische Fragen von Klimaschutz und Energiewende

[schlaglichter@bmwk.bund.de](mailto:schlaglichter@bmwk.bund.de)

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland:

[www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)