

WIE KANN DAS ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT AUSSEHEN?

DIE BMWI-LANGFRISTSZENARIOEN BILDEN EINE WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGE FÜR DIE ABLEITUNG EINER GESAMTSTRATEGIE ZUR ENERGIEWENDE

Deutschland hat sich ambitionierte Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen gesetzt: Bis 2030 sollen die Emissionen um mindestens 55 % gegenüber 1990 zurückgehen, und bis 2050 soll Treibhausgasneutralität erreicht sein. Zudem sieht der European Green Deal vor, dass die EU bis 2050 klimaneutral wird.

Die energie- und klimapolitischen Ziele erfordern einen grundlegenden Umbau des Energiesystems, der nahezu alle Bereiche der Volkswirtschaft betrifft. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie lässt in dem Forschungsvorhaben „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ untersuchen, wie Deutschland seine Klimaziele erreichen kann.

Ein Energieszenario beschreibt eine mögliche zukünftige Entwicklung des Energiesystems. Energieszenarien sind aber keine Prognosen der zukünftigen Entwicklung. Eine verlässliche Prognose wäre auch gar nicht möglich. Angesichts des langen Zeithorizonts von Energieszenarien, die den Zeitraum bis 2050 untersuchen, bestehen erhebliche Unsicherheiten. Dies betrifft neben den politischen Rahmenbedingungen unter anderem technologische und ökonomische Entwicklungen. Wer hätte z. B. vor 20 Jahren geahnt, wie kostengünstig Photovoltaikanlagen werden? Gerade im Energie-

system, wo im Zuge der Energiewende dynamische technologische Entwicklungen und Innovationen stattfinden, sind auch andere Entwicklungen möglich, als in aktuellen Szenarien dargestellt.

Trotz dieser Unsicherheiten müssen in Energieszenarien zwangsläufig diverse Annahmen getroffen werden, beispielsweise zu verfügbaren Technologien und ihren Kosten und zu Klimaschutzambitionen außerhalb Europas. Die Rechenmodelle, die den Szenarien zu Grunde liegen, suchen dann nach möglichen Wegen bzw. den kostengünstigsten Optionen, um vorgegebene Klimaziele zu erreichen. Naturgemäß können die Annahmen unterschiedlich ausfallen, und dies kann



IN KÜRZE

Energieszenarien analysieren Wege für den Umbau des Energiesystems.



große Auswirkungen auf die Szenarienergebnisse haben. Wichtig ist es daher, die Annahmen sehr transparent auszuweisen und gemeinsam mit den Szenarienergebnissen zur Diskussion zu stellen.

Die vorstehenden Ausführungen bedeuten nicht, dass aus Energieszenarien keine Erkenntnisse abgeleitet werden können. Angesichts der erheblichen Unsicherheiten im Betrachtungszeitraum bis 2050 wäre die Modellierung eines einzelnen zentralen „Leitszenarios“, an dem sich die Politik orientieren sollte, wenig sinnvoll. Deshalb werden in den BMWi-Langfristszenarien diverse Szenarien modelliert, um auf Basis des derzeitigen Wissensstands die Bandbreite möglicher Transformationspfade sowie deren jeweilige Vor- und Nachteile abzubilden.

SZENARIEN BILDEN DIE GRUNDLAGE FÜR EINE STRATEGIE

Auf diese Weise sollen möglichst robuste Handlungsempfehlungen für den weiteren Transformationsprozess des Energiesystems abgeleitet werden. Durch den Vergleich verschiedener Szenarien lassen sich beispielsweise Entwicklungen erkennen, die weitgehend unabhängig von einem spezifischen Szenario sind bzw. in nahezu allen plausiblen Szenarien zu beobachten sind. Solche robusten Entwicklungen können somit aus heutiger Sicht als in jedem Fall sinnvolle Maßnahmen (sogenannte „No-regret-Maßnahmen“) eingeordnet werden.

„LOCK-IN-EFFEKTE“: HIER GILT ES, FEHLINVESTITIONEN ZU VERMEIDEN.

Umgekehrt können mit Szenarien auch potenzielle „Lock-in-Effekte“ identifiziert werden, die mit bestimmten Entscheidungen verbunden sind. Ein „Lock-in-Effekt“ bezeichnet eine Situation, in der nach einer Entscheidung für einen bestimmten Transformationspfad nicht mehr ohne Weiteres auf einen alternativen Pfad gewechselt werden kann. In diesem Fall werden möglicherweise Investitionen getätigt, die sich im Nachhinein als nicht zielführend erweisen bzw. die Kosten der Energiewende erhöhen. Ebenso können durch Szenarien von vornherein Fehlinvestitionen, die mit langfristigen Klimazielen nicht vereinbar sind, erkannt und auf diese Weise vermieden werden.

Durch die sachgerechte Interpretation von Szenarien kann eine Strategie für die weitere Ausgestaltung der Energiewende entwickelt werden, welche die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sektoren und Komponenten des Energiesystems – z. B. zwischen der Energieerzeugung und den Energienetzen – adäquat berücksichtigt. Ein solcher Plan für die Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems („Systementwicklungsplan“) könnte die Grundlage für weitere Prozesse zur Planung und Umsetzung der Energiewende bilden. So könnte unter anderem eine stärkere Koordinierung zwischen den Planungsprozessen für die verschiedenen Netzinfrastrukturen (Strom-, Gas- und Wasserstoffnetze) erfolgen. →

DER ERHALT VON OPTIONEN IST EIN WICHTIGER BESTANDTEIL DER STRATEGIE

Dabei kann es auch Bestandteil der Strategie sein, bewusst bestimmte Entscheidungen durch die Schaffung von Optionen offenzuhalten. Dies ist insbesondere in Bereichen sinnvoll, wo eine hohe Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung besteht und die Kosten für das Offenhalten von Optionen gering sind. Dies gilt z. B. für Schwerlastverkehr, wo die zukünftige Bedeutung von alternativen Technologien (Batterie-, Brennstoffzellen-, Oberleitungs-Lkw) aus heutiger Sicht sehr unsicher ist und die alternativen Technologien mit unterschiedlichen Anforderungen an die jeweils erforderlichen Infrastrukturen einhergehen. Durch die Verschiebung von Entscheidungen können technologische und ökonomische Entwicklungen sowie neue Erkenntnisse berücksichtigt werden.

In bestimmten Fällen können die Verschiebung von Entscheidungen und der Erhalt von Optionen jedoch mit Kosten einhergehen, die gegen den Wert zusätzlicher Optionen abzuwägen sind. In weiteren Fällen kann es sich unter Berücksichtigung von Investitionszyklen sowie der Realisierungszeiten und Lebensdauern von Assets sogar um

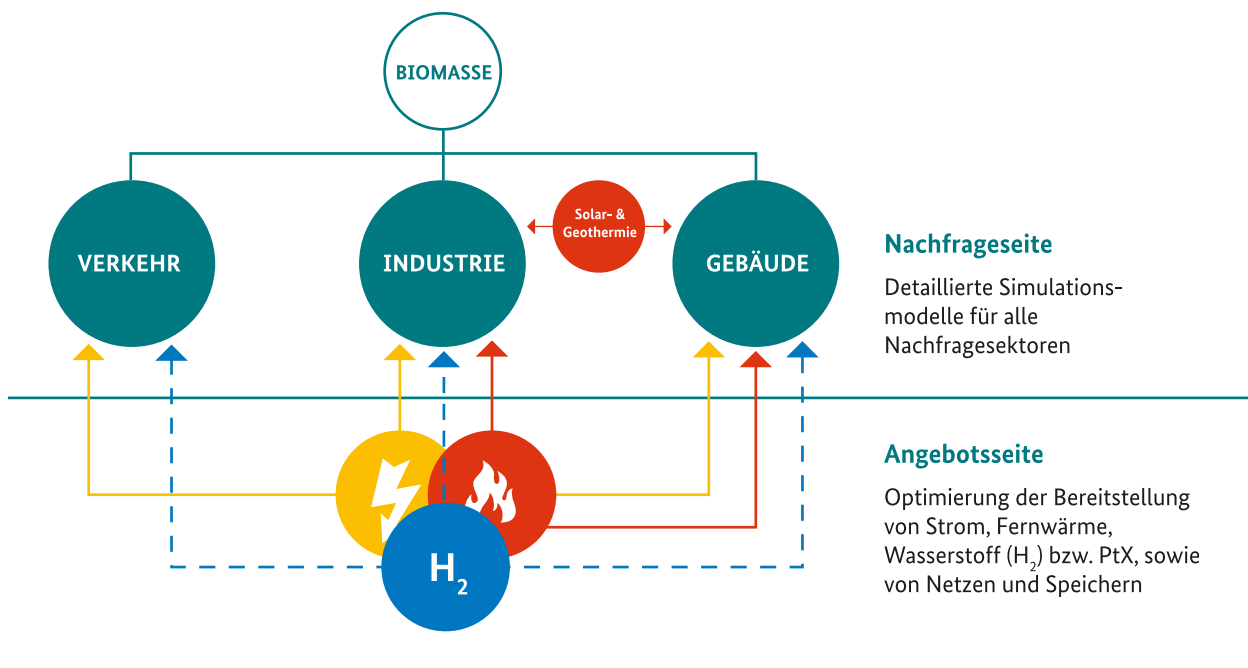
zeitkritische Konstellationen handeln, in denen Entscheidungen auf Basis des heute verfügbaren Wissens getroffen werden müssen, um die Klimaziele erreichen zu können.

Im Ergebnis können auf der Grundlage von Energieszenarien informiertere politische Entscheidungen getroffen werden. Insbesondere können Langfristfolgen sowie nicht intendierte Nebenwirkungen einzelner Entscheidungen besser abgeschätzt werden. Die Szenarien treffen indes keine Aussage dazu, welche Entscheidungen politisch leichter durchsetzbar sind oder welche praktischen oder rechtlichen Umsetzungsprobleme entstehen könnten.

IN DEN BMWI-LANGFRISTSZENARIOEN WIRD DAS GESAMTE ENERGIESYSTEM DETAILLIERT BETRACHTET

In den Langfristszenarien des BMWi wird das gesamte Energiesystem bis zum Jahr 2050 modelliert. In einem Modellverbund werden zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Modelle für die verschiedenen Sektoren gekoppelt. Dies umfasst zum einen die Energie nachfragenden Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr sowie weitere Energie-

ABBILDUNG 1: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES MODELLVERBUNDS



SAUBERERE ENERGIE FÜR DAS LANGFRISTZIEL „KLIMANEUTRALITÄT“



verbräuche von Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen und privaten Haushalten. Zum anderen wird der Umwandlungssektor, in dem die Energieerzeugung bzw. -bereitstellung erfolgt, stundenscharf für ganz Europa modelliert. Die Modellierung des Umwandlungssektors umfasst neben dem Stromsektor auch die Wärmebereitstellung in den Wärmenetzen und die Bereitstellung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern (Abbildung 1).

Darüber hinaus werden in den BMWi-Langfristszenarien im Gegensatz zu vielen anderen Gesamtsystemstudien die Netzinfrastrukturen modelliert. In den aktuell in Bearbeitung befindlichen Szenarien umfasst dies neben den Stromnetzen auch die Gas- und Wasserstoffinfrastruktur. Dadurch werden die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten des Energiesystems

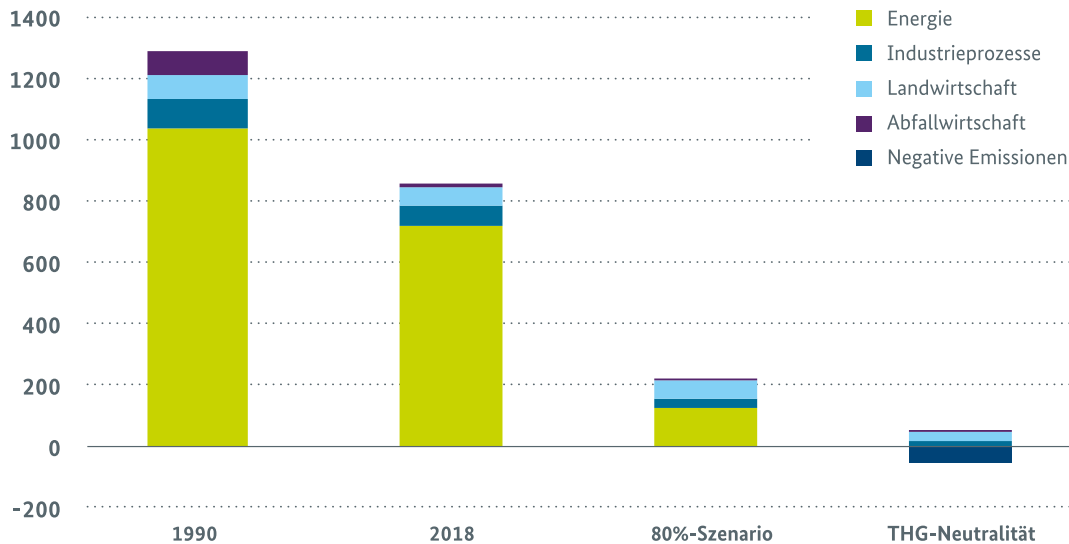
(Energieerzeugung und -verbrauch) und die Auswirkungen auf die Infrastrukturen adäquat abgebildet. Dies erlaubt beispielsweise Aussagen zu der aus Sicht des Gesamtsystems optimalen räumlichen Verteilung von Stromerzeugungskapazitäten und Elektrolyseuren, die für die Erzeugung von Wasserstoff erforderlich sind.

DAS ZIEL DER TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT ERFORDERT EINEN GRUNDLEGENDEN UMBAU DES ENERGIESYSTEMS

Im Vergleich zu Szenarien, die eine Emissionsreduktion um 80 % verfolgen, sind Szenarien mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 nochmals deutlich ambitionierter. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in den Modellen sämtliche Potenziale zur Minderung →

ABBILDUNG 2: HISTORISCHE EMISSIONEN IN DEUTSCHLAND UND ERFORDERNISSE FÜR TREIBHAUSGAS-NEUTRALITÄT

Emissionen in Mt CO₂-eq. (Megatonnen CO₂-Äquivalent)



Quelle: Daten 1990 und 2018 nach: UBA (2020): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2018

der CO₂-Emissionen ausgeschöpft. Es zeigen sich erhebliche Herausforderungen, die einen grundlegenden Umbau des Energiesystems erfordern. Es sind auch Lösungen für Bereiche erforderlich, in denen in 80%-Szenarien aufgrund des dort in 2050 verbleibenden Emissionsbudgets von rund 250 Mio. t CO₂-Äquivalenten noch fossile Brennstoffe genutzt bzw. Treibhausgasemissionen toleriert werden können. Dies betrifft beispielsweise bestimmte Hochtemperaturprozesse in der Industrie, den Luft-, See- und Schwerlastverkehr und nur schwer sanierbare Gebäude.

Doch selbst in treibhausgasneutralen Szenarien werden vor allem außerhalb des Energiesektors bestimmte Emissionen verbleiben, die aus heutiger Sicht kaum zu vermeiden sind. Hierbei handelt es sich insbesondere um Emissionen der Landwirtschaft und einige prozessbedingte Emissionen in der Industrie wie z. B. bei der Zementherstellung. Diese Emissionen müssen durch „negative Emissionen“ kompensiert werden. Mögliche Quellen für „negative Emissionen“ sind zum einen natürliche Senken wie z. B. Aufforstung oder die Wiedervernässung von Mooren. Zum anderen können

technologische Senken wie z. B. die Abscheidung und Speicherung von CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung von Biomasse entstehen, genutzt werden (Abbildung 2).

IN DEN LANGFRISTSZENARIEN SIND WINDENERGIE UND PHOTOVOLTAIK (PV) DIE GRUNDLAGE DER ZUKÜNFTIGEN ENERGIEVERSORGUNG

In einem treibhausgasneutralen Energiesystem wird Strom aus erneuerbaren Energien zukünftig die wichtigste Energieform sein. Es wird zunehmend erneuerbarer Strom in den Sektoren Verkehr und Wärme eingesetzt. Im Rahmen der sogenannten Sektorkopplung wird zum einen Strom direkt genutzt, z. B. durch Elektromobilität oder Wärmepumpen. Zum anderen kann erneuerbarer Strom in strombasierte Energieträger wie grünen Wasserstoff oder synthetische Energieträger (Power-to-Gas, Power-to-Liquid) umgewandelt werden. Infolge der Sektorkopplung steigt in den Langfristszenarien der jährliche Stromverbrauch in Deutschland trotz Einsparungen bei klassischen Stromverbrauchern (z. B. Beleuchtung) langfristig

deutlich an – von gegenwärtig rund 550–580 Terawattstunden (TWh) auf mindestens 800–900 TWh im Jahr 2050.

In allen Szenarien mit ambitionierten Klimazielen erfolgt ein starker Ausbau der Windenergie und der Photovoltaik. Dies liegt an den deutlich niedrigeren Kosten dieser Technologien im Vergleich zu anderen Optionen CO₂-freier Stromproduktion. Insbesondere der Ausbau der Windenergie ist in den Modellen zentral für die Energiewende. Zum einen ist angesichts der Sonnenscheindauer in Deutschland auch bei sehr hohen PV-Leistungen der Beitrag von PV-Anlagen zur gesamten Stromerzeugung begrenzt. Zum anderen nehmen bei ho-

AUF MIND.

800

Terawattstunden (TWh) wird der Stromverbrauch voraussichtlich bis 2050 ansteigen.

hen PV-Leistungen die Herausforderungen für die Systemintegration zu. Dies betrifft sowohl die Integration in die Stromverteilnetze als auch das zeitliche Erzeugungsprofil. Die PV-Stromerzeugung konzentriert sich nicht nur tageszeitlich auf die Mittagszeit, sondern auch saisonal auf den Sommer. Im Winter ist der Beitrag der Photovoltaik zur Stromerzeugung hingegen gering. Diese saisonale Problematik kann auch durch Batteriespeicher nicht überwunden werden.

In Zeiten einer geringen Stromerzeugung aus Windenergie und PV-Anlagen kann über das europäische Verbundnetz Strom aus den europäischen Nachbarländern importiert werden. Zudem sind in erheblichem Umfang Wasserkraftwerke erforderlich, um auch in solchen Zeiten die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

ENERGIEEFFIZIENZ UND DIE DIREKTE NUTZUNG VON STROM BEGRENZEN DEN ENERGIEBEDARF

Energieeffizienz ist neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien die zweite Säule der Energiewende. Die Rolle der Energieeffizienz wandelt sich im Zeitverlauf. Während sie heute vor allem dazu dient, durch die Einsparung fossiler Brennstoffe CO₂-Emissionen zu vermeiden, begrenzt eine effiziente Energienutzung zukünftig den Bedarf an Erzeugungskapazitäten und Netzinfrastrukturen für den Energietransport. Dies ist wichtig, weil die für erneuerbare Energien verfügbaren Flächen in Deutschland begrenzt sind und z. B. Windenergieanlagen und Stromleitungen oft mit Akzeptanzproblemen verbunden sind. →

WINDENERGIE IST ZENTRAL FÜR DIE KÜNFTIGE ENERGIEVERSORGUNG.



*an Strom benötigt ein Elektroauto
im Vergleich zu einem Fahrzeug,
das synthetische Kraftstoffe nutzt.*

Zentrale Ansatzpunkte für Energieeffizienz sind in den Langfristszenarien die energetische Gebäudesanierung und eine höhere Energie- und Materialeffizienz in der Industrie. Zudem geht der Energieverbrauch durch Technologiewechsel zurück – insbesondere bei der direkten Nutzung von Strom im Rahmen der Sektorkopplung. Beispielsweise nutzen batterieelektrische Fahrzeuge Energie wesentlich effizienter als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. So beträgt der Strombedarf eines Elektroautos nur ein Viertel bis ein Fünftel im Vergleich zum Energiebedarf eines Fahrzeugs, das synthetische Kraftstoffe nutzt. Wärmepumpen nutzen die Umgebungswärme und verringern ebenfalls im Vergleich zu alternativen Technologien den Energiebedarf.

WASSERSTOFF UND SEINE FOLGEPRODUKTE WANDERN IN BEREICHE, DIE SICH ANDERS KAUM DEKARBONISIEREN LASSEN

Trotz der zunehmenden Bedeutung von Elektromobilität und Wärmepumpen bleiben stoffliche Energieträger in den Langfristszenarien wichtig. So gibt es Bereiche, in denen die direkte Nutzung von Strom nicht sinnvoll möglich ist, z. B. im Luft- und Seeverkehr. Ebenso besteht in der Industrie ein hoher Bedarf an Wasserstoff und Kohlenstoffen. Im Umwandlungssektor wird Wasserstoff insbesondere in Zeiten einer geringen erneuerbaren Stromerzeugung benötigt werden.

Zugleich ist das nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial begrenzt. Insofern werden selbst in einem Szenario, das stark auf Energieeffizienz und die direkte Nutzung von Strom setzt, in erheblichem Umfang Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe (Power-to-Gas/Power-to-Liquid) benötigt. In den BMWi-Langfristszenarien liegt der diesbezügliche Mindestbedarf bei über 250 TWh in 2050. Die Entwicklung und großskalige Anwendung von Wasserstofftechnologien, die für die Dekarbonisierung des Energiesystems erforderlich sind und zudem erhebliche industriepolitische Chancen bieten, wird durch die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie vorangetrieben.

DEUTSCHLAND WIRD AUCH ZUKÜNFTIG ENERGIE IMPORTIEREN

Derzeit deckt Deutschland rund drei Viertel seines Energieverbrauchs durch den Import von Energieträgern (z. B. Erdgas, Mineralöl, Steinkohle). Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und steigende Energieeffizienz dürfte dieser Importbedarf zwar abnehmen. Gleichwohl wird Deutschland auch zukünftig umfangreich Energie importieren müssen. Zum einen sind die Flächenpotenziale zur Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energien in Deutschland begrenzt. Zum anderen ist der Import von Energie kosteneffizient, da im Ausland oftmals günstigere Standorte für erneuerbare Energien vorhanden sind. Deshalb wird Deutschland in den meisten Szenarien langfristig zu einem Nettoimporteur von Strom. Vor allem aber werden strombasierte Energieträger wie Wasserstoff in erheblichem Umfang im Ausland produziert.

DER AUSBAU DER STROM- UND WÄRMENETZE SOWIE DER AUFBAU EINER WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR SIND ZENTRAL

Die BMWi-Langfristszenarien zeigen, dass sich auch die Anforderungen an die Infrastrukturen im Rahmen der Energiewende ändern.

Bei den Stromübertragungsnetzen besteht auch langfristig ein hoher Ausbaubedarf. Durch ein leistungsfähiges Stromnetz können witterungsbedingte Schwankungen bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien großräumig ausgeglichen werden. Ebenso besteht bei den Stromverteilnet-



DIE SOLARENERGIE WIRD AUCH KÜNFTIG EINEN GROSSEN BEITRAG LEISTEN.

zen ein hoher Ausbaubedarf, um die Windenergie- und PV-Anlagen sowie neue Stromverbraucher wie Elektromobilität und Wärmepumpen zu integrieren.

WÄRMENETZE ERLEICHTERN DIE INTEGRATION VON ERNEUERBAREN INS ENERGIESYSTEM.

Die Nutzung von Wasserstoff erfordert den Aufbau einer Transportinfrastruktur, wofür in erheblichem Umfang bestehende Gasleitungen genutzt werden können. Insbesondere bei der inländischen Erzeugung von Wasserstoff mit Elektrolyseuren erfordert eine systemverträgliche Lösung ferner großvolumige Wasserstoffspeicher zur Zwischenspeicherung, wofür Kavernenspeicher in Norddeutschland genutzt werden können. Mit der Wasserstoffinfrastruktur kann der Wasserstoff zu den Verbrauchszentren in Mittel- und Süddeutschland transportiert werden. Dagegen würde eine umfangreiche Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseuren in Mittel- und Süddeutschland den ohnehin erforderlichen Ausbaubedarf der Stromnetze nochmals

deutlich erhöhen, da in diesem Fall der erneuerbare Strom aus dem windreichen Norden zunächst zu den Elektrolyseuren transportiert werden müsste.

Ferner sollte in dicht besiedelten Regionen der Aus- und Umbau von Wärmenetzen vorangetrieben werden. In Verbindung mit Großwärmepumpen und Wärmespeichern sind Wärmenetze eine wichtige Flexibilitätsoption für das Energiesystem und erleichtern die Integration erneuerbarer Energien. —

MEHR ZUM THEMA

Weitere Informationen zu den BMWi-Langfrist-szenarien finden Sie unter:

www.bmwi.de/langfrist-und-klimaszenarien

KONTAKT

DR. JAN PETER KLATT

Referat: Ökonomische Fragen der Energiewende, Energieszenarien, Sektorkopplung und energiepolitische Fragen des Emissionshandels

schlaglichter@bmwi.bund.de