

DEUTSCHLAND AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT: EINE KOSTENOPTIMALE STRATEGIE FÜR EINE TREIBHAUSGASNEUTRALE ENERGIEVERSORGUNG

Thomas SCHÖB^{1(*)}, Peter MARKEWITZ¹, Leander KOTZUR¹, Detlef STOLTEN^{1,2}

Inhalt

Deutschland verpflichtet sich mit dem im Jahr 2021 angepassten Bundes-Klimaschutzgesetz [1] bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu werden. Aufgrund der verschärften Reduktionsziele und der Verkürzung des Transformationszeitraums gegenüber bisherigen Regelungen stellt dies eine ambitionierte Herausforderung dar. Diese modellgestützte Analyse zeigt eine kostenoptimale Strategie auf, wie Deutschland seine Klimaschutzziele erreichen kann und welche Umstrukturierungen in allen Sektoren des Energiesystems dafür notwendig sind.

Methodik

Die Analyse kostenoptimaler Emissionsminderungsstrategien bis hin zur Treibhausgasneutralität erfolgt mit der Modellfamilie ETHOS (Energy Transformation Pathway Optimization Suite), welche am Institut für techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3) des Forschungszentrum Jülichs entwickelt wurde und eine Sammlung von Modellen darstellt, mit denen Energiesysteme in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung abgebildet werden können [2]. Mittelpunkt dieser Analyse ist das Optimierungsmodell FINE-NESTOR [3], welches das deutsche Energiesystem abbildet. Dieses integrierte Energiesystemmodell bildet die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr detailliert stündlich aufgelöst durch ein Netzwerk aus Energiequellen, Transformationsprozessen, Speichern und Energienachfragen ab [4]. Die zentralen Randbedingungen für die Analyse sind die übergeordneten Treibhausgasreduktionsziele aus dem Klimaschutzgesetz.

Ergebnisse

Diese Analyse zeigt, dass für das Erreichen der Treibhausgasneutralität bis 2045 tiefgreifende Transformationen in allen Sektoren der deutschen Energieversorgung notwendig sind.

Primärenergieverbrauch

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Primärenergieverbrauch im Jahr 2020 noch zu 85% durch den Einsatz fossil basierter Energieträger dominiert wird. Bis zum Jahr 2045 findet dann eine sukzessive Defossilisierung der deutschen Energieversorgung statt, wobei der Primärenergieverbrauch gleichzeitig um etwa 39% sinkt. Weiterhin zeigen die Analysen, dass die Bedeutung von Energieimporten in einer treibhausgasneutralen Energieversorgung abnimmt. Die Importquote von heute über 74% [5] verringert sich bis zum Jahr 2045 auf ca. 22% bei einem deutlich verringerten Primärenergieverbrauch von ca. 2164 TWh. Wesentliche Importenergieträger sind Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe, die im Jahr 2045 einen Anteil von ca. 80% ausmachen. Der Großteil des Wasserstoffbedarfs in Höhe von ca. 412 TWh entfällt dabei auf den Industriesektor (ca. 267 TWh) und den Verkehrssektor (ca. 117 TWh), wobei hier vor allem die Nachfrage durch den Lkw-Transport überwiegt.

Stromverbrauch

Der Stromverbrauch steigt im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2045 aufgrund der Substitution fossiler Energieträger in allen Sektoren auf etwa 1216 TWh an, was mehr als dem Doppelten des heutigen Stromverbrauchs entspricht (vgl. Abbildung 1). Wesentlicher Treiber für diesen Anstieg ist der zusätzliche Strombedarf für PtX-Anwendungen. Im Jahr 2045 entfällt ein Viertel des gesamten

¹ Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, +49 171 4979702, t.schoeb@fz-juelich.de, https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Home/home_node.html

² Lehrstuhl für Brennstoffzellen, RWTH Aachen University c/o Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich

Stromverbrauchs auf die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff, wodurch 53% des Wasserstoffbedarfs durch inländische Produktion gedeckt wird.

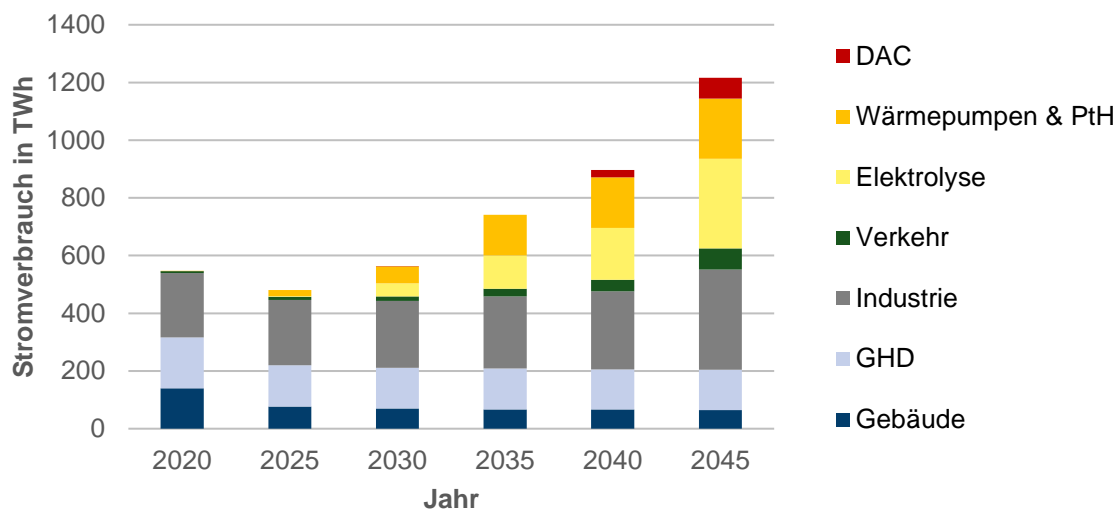


Abbildung 1: Stromverbrauch Deutschlands vom Jahr 2020 bis zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045

Weitere Ursachen für den steigenden Stromverbrauch sind der Betrieb von Wärmepumpen und industriellen Power to Heat (PtH) Anwendungen, die ca. 208 TWh Strom benötigen. Außerdem steigt durch den zunehmenden Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen der Stromverbrauch im Verkehrssektor auf etwa 73 TWh an. Ebenso erfordert der Einsatz von Direct Air Capture Anlagen (DAC), die zur Kompensation, der im Jahr 2045 noch verbleibenden Restemissionen benötigt werden, einen signifikanten Stromeinsatz (ca. 74 TWh). Demgegenüber stehen besonders zu Beginn der Transformationsphase erhebliche Stromeinsparmaßnahmen, vor allem in den Sektoren Gebäude sowie GHD, die einem deutlichen Anstieg des Stromverbrauchs bis zum Jahr 2030 entgegenwirken.

Stromerzeugung

Um den steigenden Stromverbrauch zu decken, ist ein starker Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen notwendig. Im Jahr 2045 beträgt die installierte Onshore-Windkraftleistung ca. 213 GW, die installierte Kapazität von Offshore-Windkraftanlagen erreicht ca. 72 GW. Zusammen erzeugt die Windenergie 55% der produzierten Strommenge im Jahr 2045. Dachflächen- und Freiflächenphotovoltaik tragen mit 37% zur Stromerzeugung bei, wofür ca. 450 GW installierte PV-Kapazitäten benötigt werden. Zum Ausgleich der Schwankungen der Erneuerbaren Stromerzeugung kommen ca. 105 GW regelbare Kraftwerke zum Einsatz, die mit Biomethan, Biomasse oder Wasserstoff betrieben werden. Zudem werden ca. 562 GWh an kurz- und mittelfristiger Speicherkapazität (Pump-, Batterie- und Druckluftspeicher) und ca. 35,4 TWh an langfristiger Speicherkapazität in Form von Wasserstoffkavernenspeichern benötigt, um Dunkelflauten zu überbrücken.

Referenzen

- [1] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S.2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.
- [2] D. Stolten, P. Markewitz, T. Schöb, F. Kullmann et al., „Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045,“ (Kurzfassung) Forschungszentrum Jülich GmbH, 2021.
- [3] P. Lopion, P. Markewitz, D. Stolten und M. Robinius, „Cost Uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects,“ *Energies*, vol. 12, no. 20, p. 4006, Okt. 2019.
- [4] M. Robinius, P. Markewitz, P. Lopion et al., „Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050,“ *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt*, Band 499, 2020.
- [5] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), „Bilanz 2019,“ <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.htmlx> (Aufgerufen 25. November, 2021)