

# Klimaneutralität schon 2040?

Thomas Unnerstall

*Das Pariser Abkommen bedeutet für Deutschland streng genommen Klimaneutralität bereits 2040, nicht erst 2050. Analysiert man unter Zugrundelegung der wichtigsten aktuellen Studien die realistischen Handlungsoptionen im Inland bis 2040 – v.a. Ausbau Photovoltaik/Windenergie, Senkung des Energieverbrauchs (Energieeffizienz, Elektrifizierung) –, so bleibt eine erhebliche Lücke bis zur Klimaneutralität. Sie kann nur durch Importe von Wasserstoff/synthetischen Brennstoffen in einer Größenordnung von etwa 1.000 TWh/a geschlossen werden. Bei näherem Hinsehen erscheint dieses Ziel durchaus erreichbar.*

Im Oktober 2020 wurde die Studie „CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035“ des Wuppertal-Instituts im Auftrag von Fridays-for-Future der Öffentlichkeit vorgestellt [1]. Die Studie benennt die aus Sicht der Autoren zentralen Eckpunkte, wie ein klimaneutrales Energiesystem – nicht erst 2050 (gemäß aktueller Beschlusslage der Bundesregierung), erst nach dem – sondern bereits 2035 erreicht werden kann. Einige der wichtigsten Punkte lauten:

- Ausbau der PV/Windenergie-Kapazitäten bis 2035 um jährlich 25-30 GW (von durchschnittlich 7 GW im letzten Jahrzehnt);
- Steigerung der jährlichen Sanierungsrate bei Gebäuden auf ca. 4 % (von ca. 1 % im letzten Jahrzehnt);
- Weitgehende Verhaltensänderungen im Verkehr (u.a. 50 % Reduktion des PKW-Verkehrs);
- Installation von Wärmepumpen in der Größenordnung von 800.000 pro Jahr (aktuell etwa 100.000).

Die Studie ist recht einhellig kritisiert worden, auch von Protagonisten der Energiewende: Die aufgezeigten Wege seien nicht realistisch. Diese Kritik ist m.E. berechtigt – das Problem ist dabei primär nicht die technologische oder finanzielle, sondern vielmehr die prozessuale Machbarkeit: Meinungsbildungs- und politische Entscheidungsprozesse, Dauer von Planungs- und Genehmigungsverfahren, Handwerker- und Fachkräftemangel etc. Hinzu kommt, dass für einen solchen Weg natürliche Investitionszyklen durchbrochen, d.h. erhebliche stranded investments bei Industrieanlagen, Heizungen, LKW etc. in Kauf genommen und auch Eingriffe in die entsprechenden Eigentümer-Entscheidungen vorgenommen werden müssten.

Bei all dieser einleuchtenden Kritik ist aber aus dem Blickfeld geraten, was die Motivation für die Wuppertal-Studie war: Die Tatsache



2040 klimaneutral - wie kann das gehen?

Bild Adobe Stock

nämlich, dass das mittlerweile weitgehend akzeptierte politische Ziel „Klimaneutralität bis 2050“ – so ambitioniert, wenn nicht utopisch es vielen noch erscheinen mag – mit dem Pariser Abkommen streng genommen nicht kompatibel ist.

Klimaneutralität bis 2050 bedeutet (bei linearer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen über die nächsten 30 Jahre) einen gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoß von etwa 10-11 Mrd. t; und das entspricht ziemlich genau der Einhaltung des 2°-Ziels (Tab. 1). Das Pariser Abkommen verpflichtet die Unterzeichner aber dazu, beim klimawandelbedingten Temperaturanstieg eine Marke „deutlich unter 2° C“ anzustreben. Nimmt man demzufolge einen Temperaturanstieg von 1,75°C als Zielmarke, dann bedeutet das, dass Deutschland bereits um das Jahr 2040 herum klimaneutral werden muss.

Man kann wohl davon ausgehen, dass diese Forderung nach strikter Einhaltung des Pariser Abkommens (wenn denn schon das 1,5°-

Ziel aufgegeben wird) in den nächsten Jahren in der öffentlichen Diskussion an Bedeutung gewinnen wird – angesichts der wahrscheinlich zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels, global und auch bei uns, sowie angesichts des erwartbar weiterhin steigenden Drucks durch die junge Generation.

## 2040 klimaneutral – wie kann das gehen?

Im Folgenden wird diese Frage beschränkt auf das Energiesystem beantwortet, das für über 90 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich ist [2].

### Ausgangssituation

Deutschland verbraucht aktuell [3] etwa 3.300 TWh Energie pro Jahr; davon gehen 800 TWh im Umwandlungssektor (v.a. Kraftwerke und Raffinerien) verloren, so dass der Endenergieverbrauch etwa 2.500 TWh beträgt. Dieser Energieverbrauch von 3.300 TWh wird folgendermaßen gedeckt:

	Budget Welt (ab 1.1.2018)*	Budget Deutsch- land (ab 1.1.2018)*	Budget Deutsch- land (ab 1.1.2021)*	Zeitraum bis Klimaneutralität**
Für 2° C-Ziel	1.170	12,8	10,7	ca. 30 Jahre
Für 1,75° C-Ziel	800	8,8	6,7	ca. 19 Jahre
Für 1,5° C-Ziel	420	4,6	2,5	ca. 7 Jahre

\*It. Anteil Deutschlands an der Weltbevölkerung;\*\* bei linearer Reduktion von aktuell ca. 0,7 auf 0 Gt; CO<sub>2</sub>-Budgets zur Einhaltung des jeweiligen Ziels mit einer Wahrscheinlichkeit von 66 %.

- fossile Energien: 2.550 TWh (davon 2.100 importiert);
- Kernenergie: 200 TWh;
- Erneuerbare Energien (EE) im Inland: 550 TWh [4];
- EE-Importe: 0 TWh.

Mit der Nutzung der fossilen Energieträger verbunden sind die aktuellen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Energiesystems von rund 650 Mio. t.

#### Optionen zur Klimaneutralität

Um das Energiesystem klimaneutral zu gestalten, gibt es im Prinzip fünf Optionen [5]:

- (1) Ausbau EE im Inland;
- (2) EE-Importe;
- (3) Senkung des Energiebedarfs/Energieeffizienz;
- (4) Negative CO<sub>2</sub>-Emissionen;
- (5) Abscheidung des CO<sub>2</sub> bei der Nutzung fossiler Energieträger (CCS – Carbon Capture and Storage, CCU – Carbon Capture and Utilization).

Schauen wir uns diese Optionen der Reihe nach näher an:

**(5) Abscheidung (CCS, CCU):** Diese Option spielt in den meisten einschlägigen Studien (z.B. [6, 7]) so gut wie keine Rolle. Wenn man diese Möglichkeit realisiert, dann in so gerin-

gem Umfang (< 50 Mio. t), dass die folgenden Ausführungen dadurch qualitativ nicht geändert werden.

**(4) Negative Emissionen:** Auch diese Option wird in den vorliegenden Studien zur Klimaneutralität nicht/kaum berücksichtigt. Dem schließe ich mich hier an, obwohl es aus meiner Sicht wahrscheinlich ist, dass die Option zumindest im globalen Maßstab ab 2035/40 eine erhebliche Rolle spielen könnte.

**(2) EE im Inland:** Hier besteht in den einschlägigen Studien [6, 7, 8] weitgehend Einigkeit, dass

- die realistische Obergrenze für PV/Windenergie/Wasser bis 2040 bei 750-800 TWh liegen dürfte;
- das maximale Potenzial für Holz, Solarthermie, Geothermie bei ca. 250 TWh liegt [9];
- die Kosten so hoch und die Ökobilanz von Energiepflanzen (aufgrund des hohen Flächenverbrauchs und der kaum vermeidbaren Monokulturen) so schlecht ist, dass sie perspektivisch maximal eine untergeordnete Rolle spielen werden (50 TWh);
- signifikante Potenziale in der Umweltwärme über die Nutzung von Wärmepunkten liegen – Umfang bis 2040 maximal ca. 100 TWh/a [10].

Der Ausbau von PV/Windenergie bis 2040 in der o.g. Größenordnung bedeutet einen Zubau von 13-15 GW pro Jahr, d.h. eine Verdopplung

der Geschwindigkeit des Ausbaus gegenüber dem letzten Jahrzehnt; dies und die damit einhergehenden Umstellungen im Energiesystem – Kohleausstieg, Neubau von Gaskraftwerken (ca. 50 GW), Bau von Speichern – liegt zweifellos an der oberen Grenze des Machbaren, sollte aber gerade noch realistisch sein.

Auf Grundlage dieser Überlegungen erhält man eine Obergrenze von EE im Inland in 2040 von rund 1.200 TWh. Gleichzeitig sinken in diesem rein EE-basierten Stromsystem die Umwandlungsverluste um 500-550 TWh. Für die beiden letzten Optionen – Energieeffizienz und EE-Importe – bleibt damit eine Deckungslücke von etwa 1.600 TWh.

#### Energieeffizienz oder EE-Importe?

Die Kernfrage für die Zukunft lautet damit: Wie kann/wie sollte das Verhältnis von Energieeffizienz und EE-Importen bei der weiteren Umsetzung der Energiewende aussehen? Je nachdem, welche Fortschritte man bei der Senkung des Endenergieverbrauchs für möglich erachtet [11], bleibt eine mehr oder weniger große Lücke bis zur Klimaneutralität, die dann nur noch mit EE-Importen gedeckt werden kann.

Was ist also realistisch bezüglich der Senkung des Endenergiebedarfs bis 2040? Folgende Entwicklungen werden in den o.g. Studien [6, 7, 8] weitgehend übereinstimmend als bis 2040 auf jeden Fall machbar angenommen:

- weitgehende Umstellung des PKW-Verkehrs auf Elektrofahrzeuge (Folge: Energiebedarf 450 TWh → 100-150 TWh, d.h. 300-350 TWh weniger);
- Sanierungsrate von Gebäuden bei 1-1,5% (Folge: Energiebedarf 750 TWh [12] → 550-600 TWh, d.h. 150-200 TWh weniger);
- leichte Senkung des Energieverbrauchs der Industrie um 5-10% (Folge: Energiebedarf ca. 50 TWh weniger).

Berücksichtigt man diese drei Entwicklungen zusammen, so kann man mit ziemlicher Sicherheit davon ausgehen, dass der (End-)Energiebedarf bis 2040 um 500-600 TWh niedriger liegen wird als heute.

Damit bleibt aber weiterhin eine Lücke bis zur Klimaneutralität von (mindestens) 1.000-

	Produktionskosten	Transportkosten	Importkosten
H <sub>2</sub>	20-25	30	50-55
synthetisches Methan	45-55	12	57-67
PtL (z.B. synth. Kerosin)	53-63	2	55-65
<b>Mix*</b>	–	–	<b>55-65</b>

\*20-30% H<sub>2</sub>, 70-80 % PtL/Methan; angenommene Stromkosten: 1-1,5 ct/kWh; angenommene CO<sub>2</sub>-Kosten (Direct Air Capture): 50-75 €/t

1.100 TWh im Jahr 2040. Sie kann nur geschlossen werden durch

■ sehr ambitionierte, damit aus heutiger Sicht nur schwer machbare und/oder teure weitere Energieeffizienz-Maßnahmen (weitere Erhöhung der Sanierungsrate bei Gebäuden, weitgehende Umstellungen im Güterverkehr/Ausbau des Schienennetzes, drastische Investitionen in neue Produktionstechniken in der Industrie, substantielle Verhaltensänderungen) oder

■ EE-Importe von Wasserstoff/synthetischen Brennstoffen [13].

Mit anderen Worten: Selbst wenn man bis 2040 mit großen Anstrengungen (und trotz der prozessualen Gegebenheiten in Deutschland) noch weitere 100-200 TWh an Energieverbrauch einsparen kann – für die EE-Importe bleibt in jedem Fall ein sehr substanzieller Beitrag.

### Zwischenfazit

Klimaneutralität in 2040 ist nur machbar, wenn man bis dahin EE (synthetische Brennstoffe, Wasserstoff) in der Größenordnung von etwa 1.000 TWh importieren kann. Aber ist das wirklich realistisch?

Gerade die neue Agora-Studie zur Klimaneutralität bis 2050 [6] erteilt dieser Vorstellung eher eine Absage – synthetische Brennstoffe bzw. Wasserstoff seien auch in 20,30 Jahren noch knapp und teuer. Schauen wir uns also beide Aspekte genauer an: Kosten und Verfügbarkeit.

### Kosten und Verfügbarkeit synthetischer Brennstoffe

Die aktuellen Kostenschätzungen für Wasserstoff bzw. synthetische Brennstoffe sind kürzlich sehr umfassend und transparent in [14] zusammengestellt worden. Ausgehend von 1-1,5 ct/kWh für PV-Strom mit 2.000-2.500 Volllaststunden in sonnenreichen Ländern (die aktuellsten Auktionspreise liegen schon jetzt bei 1,5 ct/kWh), schneller Skalierung (Szenario „Durchbruch“ [15]) und einem CO<sub>2</sub>-Preis aus Direct Air Capture von 50-75 €/t [16] erhält man für 2040 die in Tab. 2 aufgeführten Importkosten. Man kann also von spezifischen Kosten in der Größenordnung von 60 €/MWh, mithin beim Import von 1.000 TWh von etwa 60 Mrd. €/a ausgehen [17].

Zu teuer? Nun, die durchschnittlichen jährlichen Importkosten für Erdöl, Erdgas und Kohle im letzten Jahrzehnt betragen rund 70 Mrd. €. Wo also ist das Problem?

Bleibt das Thema Verfügbarkeit. Die Produktion von 1.000 TWh an synthetischen Brennstoffen/Wasserstoff erfordert in den produzierenden Ländern eine Stromerzeugung von rund 1.600 TWh/a [18] – fast dreimal so viel wie die gesamte deutsche Stromproduktion. Das sei, so wird oft argumentiert, kaum vorstellbar. Kann man also eine Stromerzeugung in diesem Umfang in 20 Jahren aufbauen? Doch, das geht:

■ Viele sonnen- und windreiche Regionen stehen global für einen solchen Aufbau zur Verfügung, mit de facto unbegrenzten Flächenressourcen – Nordafrika, Naher Osten, Südeuropa, Australien, Teile Südamerikas.

■ Für eine Stromproduktion von 1.600 TWh in diesen Regionen ist eine zu installierende PV-Leistung von 700-800 GW [19] erforderlich. Also müssten – wenn man einen nötigen Vorlauf von 6-7 Jahren unterstellt – ab 2026/28 jährlich 50-60 GW PV-Module installiert werden. Nicht machbar? Die chinesische Firma GCL-SI baut gerade eine Fabrik, die ab 2023 jährlich 60 GW PV-Module produzieren wird. Ja, eine einzige (!) Fabrik würde für diesen gesamten deutschen Importbedarf ausreichen (geschätzte Investitionskosten für die Fabrik: 2,3 Mrd. €).

Natürlich braucht man zudem auch Elektrolyseure in der Größenordnung von einigen 100 GW, Methanisierungsanlagen usw. – aber das geht ganz genauso, wenn man will, langfristig plant und das führende deutsche Know-how bei diesen Technologien in großskalige Produktion umsetzt. Übrigens gab es eine ähnliche Entwicklung schon einmal: in nur 15 Jahren, zwischen 1955 und 1970, wurden die deutschen Erdölimporte von 0 auf 1.300 TWh/a entwickelt.

### Fazit

In Deutschland denken wir m.E. in der Tendenz zu kleinteilig, streiten jahrelang, wie wir die Sanierungsraten für Gebäude auf 1,4 oder 1,6 % bringen, ob wir noch einmal ein paar Milliarden in das Schienennetz stecken sollen, ja ob wir das Verkehrsverhalten der Bevölkerung zu ändern versuchen müssten – andere

Länder in der Welt denken groß, strategisch und haben die zukünftigen Weltmärkte im Blick.

Die Zukunft der Energie liegt im Kern nicht im Energiesparen, erneuerbare Energien gibt es doch im Überfluss; sie liegt primär in extrem billigem PV-Strom/Windstrom, in damit erzeugtem sehr billigen Wasserstoff, und – jedenfalls für eine Übergangszeit von 2-5 Jahrzehnten – in synthetischen Brennstoffen, mit denen die jetzige Energieinfrastruktur (Erdgasnetze, Flugzeugmotoren, industrielle Produktionsanlagen, Heizungen) fast komplett weiterhin nutzbar ist.

Und ja, Klimaneutralität bis 2040 ist keine unrealistische Utopie – nicht auf dem Weg, der in der Fridays-for-Future-Studie skizziert wird, sondern indem man mutig, strategisch und global in die zukünftigen Energieweltmärkte investiert.

### Anmerkungen

- [1] Wuppertal Institut: CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht. Wuppertal 2020.
- [2] Für eine Diskussion der übrigen Emissionen (Landwirtschaft, Industrieprozesse) siehe [6].
- [3] Natürlich sind die folgenden Zahlen ohne die Corona-Sondersituation zu verstehen – es handelt sich um die Daten von 2019, gemäß dem allgemeinen Trend leicht nach unten angepasst. Alle folgenden Zahlen und Ausführungen verstehen sich zudem ohne den sog. nicht-energetischen Verbrauch.
- [4] Ca. 200 TWh PV/Windenergie/Wasser, 140 TWh Holz, 120 TWh Energiepflanzen (Biogas), 90 TWh Sonstige (Solarthermie, Geothermie, Umweltwärme).
- [5] Die theoretische Option „Ausbau der Kernenergie“ ist für Deutschland nicht realistisch.
- [6] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. 2020.
- [7] Dena: Leitstudie Integrierte Energiewende. Berlin 2018.
- [8] BDI-Studie: Klimapfade für Deutschland. Berlin 2018.
- [9] Die in [6] anvisierte Option, etwa 100 TWh aus Kurzumtriebsplantagen zu gewinnen, erscheint mir aus Gründen der Ökobilanz zweifelhaft und wird hier deshalb nicht berücksichtigt. Diese Flächen kann man für PV-Anlagen und nachgeschaltete H<sub>2</sub>-Produktion besser nutzen, vgl. Fn. [17].
- [10] Dies entspricht etwa 7-8 Mio. Wärmepumpen (WP) in 2040 und damit einem konstanten Zubau von 300-350.000 WP im Jahr (aktuell rund 100.000 pro Jahr)

– das ist bereits sehr ambitioniert. Noch weitergehende Ziele wie in [1]) sind m.E. nicht realistisch.

- [11] Die Senkung des Endenergiebedarfs hängt – nicht ausschließlich, aber zu einem erheblichen Maße – an der Frage, wie stark die Hauptbereiche des Endenergieverbrauchs – Industrie, Verkehr, Raumwärme – elektrifiziert werden können, denn Strom stellt die mit Abstand effizienteste Endenergieform dar. Hierbei bilden jedoch die Stromnetze (vor allem im NS-Bereich) eine prinzipielle Grenze – sie können über die gegenwärtige Situation (Strommenge 450 TWh, Spitzenlast 80 GW) hinaus nur in begrenztem Umfang belastet werden.
- [12] Gemeint ist hier der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Haushalten und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen. Ich folge hier der Kategorisierung in [6, 8].
- [13] Der Import von EE-Strom aus dem benachbarten Ausland kann keine Rolle spielen, da der Strombedarf bereits durch EE im Inland gedeckt ist.
- [14] Öko-Institut: Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe. Berlin 2020.
- [15] Das Szenario „Durchbruch“ bedeutet insbesondere eine Kostenreduktion für Elektrolyseure bis 2040 von ca. 90 %. Die Preise für PV-Module und für Batterien sind in nur zehn Jahren um ca. 90 % gesunken und es gibt keinen Grund, warum dies bei Elektrolyseuren bei entsprechendem schnellem Ausbau nicht auch möglich sein sollte.
- [16] Siehe dazu: Fasihi, M.; Efimova, O.; Breyer, C.: „Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants“. Journal of Cleaner Production, 224 (2019).
- [17] Für Wasserstoff sind lt. [14] die Transportkosten auch perspektivisch sehr hoch. Wenn das wirklich so bleibt (was ich persönlich allerdings bezweifle: angesichts der überragenden Bedeutung von H<sub>2</sub> in der Zukunft werden die Transportkosten m.E. deutlich sinken) und wir gleichzeitig in Deutschland bereit wären, die durch den absehbaren Rückgang des Energiepflanzen-Anbaus für Biogas freiwerdenden Flächen für große

PV-Anlagen zu nutzen (auf ca. 6.000 km<sup>2</sup>), dann könnten wir (zwar nicht Power-to-Liquids oder synthetisches Methan, aber) den Wasserstoff auch zu ähnlichen Kosten selbst herstellen.

- [18] Der Wirkungsgrad in der Kette Strom – H<sub>2</sub> per Elektrolyse – Power-to-X liegt perspektivisch in der Größenordnung von 60 %.
- [19] Die erforderliche Fläche für diese PV-Module sind max. 10.000 km<sup>2</sup>. Das sind – als Beispiel – 0,5 % der Landesfläche von Saudi-Arabien, 1,5 % der Landesfläche Marokkos oder 0,13 % der Landesfläche Australiens.
- [20] IPCC: Special Report (2018): Global Warming of 1,5°, Chapter 2. (<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/>).

**T. Unnerstall, Selbständiger Berater, Autor, Redner, Stockstadt**  
**tunner@online.de**

## NEWS | MAGAZINE | JOBS | MARKTPARTNER | TERMINE

[www.ew-magazin.de](http://www.ew-magazin.de)

**Fachinformationen für Entscheider**

**ew** Magazin für die Energiewirtschaft

Im Online-Verbund mit **energie.de**