

Klar zur Wende?

Zur Problematik der Energiewende in Deutschland

Dr.-Ing. Norbert Aust

Berechnungsgang und Datenquellen

Ausgangspunkt:

Behauptung, CO₂-neutrale Energieversorgung unter alleiniger Verwendung regenerativer Energieträger möglich.

1 Energiebedarf [TWh]

Daten:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>

Datenextraktion (Berichtsjahr 2017):

Sektor	Total	Elektro	Fossil*	Regenerativ**	Fernwärme
Verkehr	765	12	723	30	
Gewerbe ...	401	147	214	27	13
Industrie	750	232	434	33	51
Haushalte	675	129	408	87	51
Summe	2591	520	1779	177	115

* „Fossil“ enthält die Kategorien

- Gase
- Mineralölprodukte
- Stein- und Braunkohle
- sonstige Energieträger

** „Regenerativ“ enthält folgende Kategorien:

- Biokraftstoffe (bei Verkehr)
- Erneuerbare Wärme

1.1 Direkte Stromerzeugung:

[Energiebedarf Strom direkt 520 TWh](#)

1.2 Verkehr: Ansatz Elektromobilität.

Daten: Verschiedene Daten Kraftfahrtbundesamt:

PKW:

Bestand: 46,5 Mio

Durchschnittliche Fahrleistung per PKW: 14.000 km / a

Energiebedarf Elektrobetrieb: 20 kWh / 100 km

(Verbrauchsangabe: Mittelwert aus ADAC-Test:
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>)

Bedarf Elektrische Energie: 130 TWh

LKW:

Fahrleistung deutsche LKW: 103 Milliarden km / a

Fahrleistung europäische LKW in D: 42 Milliarden km / a

Energiebedarf: 1,5 kWh / km

(Verbrauchsangabe: Grobe Schätzung auf Basis weniger Angaben in der Wikipedia:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolastkraftwagen> und

https://de.wikipedia.org/wiki/Tesla_Semi)

Bedarf Elektrische Energie: 220 TWh / a (gerundet)

Gesamtbedarf Verkehr: 350 TWh

offen dabei:

- Ersatz Dieselloks bei der Eisenbahn
DB Cargo 162 Mio l Dieselkraftstoff
DB Regio 372 Mio l Dieselkraftstoff (inkl. Bus, daher ggf. Doppelnennung)
DB Fernverkehr 12,4 Mio l. Dieselkraftstoff
Quelle: Deutsche Bahn, Integrierter Bericht 2017, Abschnitt „Entwicklung der Geschäftsfelder“,
https://www.deutschebahn.com/resource/blob/1262994/2fe77ccbefe70ef2364a884c4167b14f/ib2018_dbkonzern_de-data.pdf
Heizwert: 9,7 kWh / l (Wikipedia):
- Schifffahrt, Binnen und See
Bunker-C-Öl (Seeschifffahrt): Keine Angaben gefunden
Schiffsdiesel (kleinere Einheiten, Binnenschiffe): Keine Angaben gefunden
- Flugverkehr
Verbrauch Deutsche Fluggesellschaften 2017: 10,4 Milliarden Liter Kerosin
Quelle: <https://www.klimaschutz-portal.aero/faq/wie-viel-kerosin-verbrauchen-deutsche-fluggesellschaften-in-einem-jahr/>
Offen: Ausländische Fluggesellschaften, die in Deutschland tanken?

1.3 Wärme

Annahmen / Überlegungen:

- die fossilen Energieträger dienen außerhalb des Verkehrsektors zur Erzeugung von Hoch- und Niedertemperaturwärme
- Teilweise direkte Ersetzung durch Strom
- Fernwärme ist heute eine Auskopplung von Kraftwerken bzw. KWK-BHKW-Anlagen. Diese würden entfallen und wären ebenfalls zu ersetzen
- Vereinfachende Annahme: Wärmebereitstellung durchweg durch Wärmepumpen, praktische Leistungszahl 3 (=Leistungszahl x Gütegrad) nach Angaben Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/Wärmepumpe#Leistungszahl_und_Gütegrad).

Fossile Heizleistung: (1779 - 723 + 115 TWh) / 3 = 400 TWh elektrische Antriebsleistung für WP

1.4 Speicherverluste

Überlegungen / Annahmen

- Wegen des zeitlich nicht dem Bedarf entsprechenden Angebots muss ein großer Anteil elektrischer Energie gespeichert werden.
- Bei Power to gas mit Wasserstoff liegt der Wirkungsgrad wahrscheinlich unter 50 % (GUD-Kraftwerk 60 %, Elektrolyseur 80 %, Lagerverluste = ?)
- Verluste der Batteriespeicher in den Autos = ?
- Pauschale Schätzung: Hälfte der Energie wird mit 50 % Speicherwirkungsgrad zwischengespeichert.

Energiebedarf (1.1) bis (1.3): 1270 TWh,

Energiebedarf zur Deckung der Speicherverluste: $1270 * 0.5 * 0.5 = 320$ TWh

1.5 Netzverluste

Nach Angaben Wikipedia beträgt der Verlust des Übertragungs- und Verteilnetzes rund 6 % der Einspeisemenge (<https://de.wikipedia.org/wiki/Übertragungsverlust>):

Energiebedarf für Netzverluste $(1270 + 320) * 6 \% = 95$ TWh

Gesamtbedarf mithin:

Direkter Ersatz Stromerzeugung heute:	520 TWh
Betrieb PKW	130 TWh
Betrieb LKW	220 TWh
Wärmeerzeugung	400 TWh
Speicherverluste	320 TWh
Netzverluste	95 TWh
Summe	1685 TWh

Abzüglich Wasserkraft, Biomasse verbleibt runde Summe 1600 TWh

2. Bereitstellung Elektrischer Energie

Überlegungen / Annahmen

- Als Energielieferanten stehen nur Sonne und Wind zur Verfügung.
- Andere Energieträger (Geothermie, Gezeiten, Wellen ...) sind entweder nicht hinreichend entwickelt, um sie in überblickbaren Zeiträumen flächendeckend einsetzen zu können oder stehen aus geographischen Gründen nur begrenzt zur Verfügung.
- Ähnliches gilt für den weiteren Ausbau von Biomasse und Laufwasserkraftwerken.
- Aufteilung der Gesamtlast auf Sonne und Wind kann sicher optimiert werden, hier der Einfachheit hälftige Teilung angenommen.

2.1. Windenergie

Erzeugungsziel: 800 TWh / a

Auslastung Basisjahr 2017:

Installierte Leistung Windkraftanlagen (on + offshore): 50,29 + 5,43 = 55,72 GW
Bereitgestellte El. Energie: 105,7 TWh¹

Auslastung bei 8760 Betriebsstunden / Jahr: $105.700 / (55,72 * 8760) = 21,6 \%$

Zu installierende Nennleistung:

$800.000 \text{ GWh} / 0,216 / 8760 \text{ h} = 423 \text{ GW}$

Heute übliche (onshore) -Leistung pro Anlage²: 4,2 MW
(Beispiel Typ Enercon E-141 EP4³)

Benötigt werden demnach $423.000 / 4.2 = 100.710$ Anlagen

Jährlicher Ausbaubedarf 5.850 Anlagen: Ergebnis einer Modellrechnung, die ausgehend von einem Bestand von 28.700 Anlagen einen jährlichen Ersatzbedarf von 5 % des Bestandes unterstellt, entsprechend 20 Jahre Lebensdauer, und im Jahr 2050 auf einen Bestand von 100.750 Anlagen kommt.

Zur Verdeutlichung der Menge:

a) heutiger Bestand (2017): 28.675 Anlagen durchschnittlich 1,94 MW⁴

b) bei gleichmäßiger Verteilung über ganz Deutschland:

Fläche BRD: 358.000 km² -> 3,55 km² pro Anlage, mittlerer Abstand 2,12 km

Im Sichtfeld (Kreis r = 10 km, Fläche 314 km²) stehen 88 Anlagen.

c) Bei quadratischer Aufstellung:

316 x 316 Anlagen (=99.856) Abstand von 5 x Rotordurchmesser (141 m)

Feldgröße 222,78 x 222,78 km = 49.630 km²

2.2 Sonnenenergie

Erzeugungsziel 800 TWh / a

Auslastung Berichtsjahr 2017:

Installierte Leistung Solaranlagen: 42,98 GW
Bereitgestellte elektrische Energie: 39,43 TWh (Quellen wie 2.1)

Auslastung bei 8760 Betriebsstunden: $39.430 / (42,98 * 8760) = 10,5 \%$

1 https://www.energy-charts.de/energy_de.htm?source=all-sources&period=annual&year=2017

2 <https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>

3 <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1297-enercon-e-141-ep4>

4 <https://de.wikipedia.org/wiki/Windenergie#Statistik>

Zu installierende Nennleistung:

$$800.000 \text{ GWh} / 0,105 / 8760 = 870 \text{ GW}$$

Maximal möglicher Ausbau auf Hausdächern: 150 GW⁵

Solaranlagen „in der Fläche“ erforderlich: 720 GW

Flächenintensität Beispiel Solarpark Neuhardenberg⁶:

$$145 \text{ MWp} / 2,4 \text{ km}^2 \quad 60,4 \text{ MWp} / \text{km}^2$$

Damit ergibt sich Flächenbedarf in der Ebene von

$$720.000 / 60,4 = 11.750 \text{ km}^2$$

Zur Verdeutlichung:

stellt man sich die Fläche gleichmäßig auf Deutschland verteilt vor, dann liegen im Sichtfeld (Radius 10 km, 314 km²) 10,3 km² Solarfläche, ein Quadrat mit 3,2 km Seitenlänge.

3. Kurzzeitspeicherung

Gedanken / Annahmen

- Im Sommer spielt Wind keine große Rolle („Lauer Sommerabend“). Durch Kurzzeitspeicher muss der kurzfristige Sonnenstrom auf den restlichen Tag verteilt werden.
- Vereinfachende Annahme: die insgesamt zu deckenden 1600 TWh teilen sich gleichmäßig über alle Stunden des Jahres auf.

Durchschnittliche Leistung: 1600 TWh / 8760 h = 182 GW Leistungsbedarf

Durchschnittliche Tagesenergie: 1600 TWh / 365 = 4,4 TWh / Tag

Zur Verdeutlichung:

Unterstellt man 100 Wh / kg Energiedichte für Batterien (Bleibatterie 30 - 120 Wh/kg)⁷ und 1,1 TWh als Speicherbedarf, dann werden

$$1 \text{ 100 000 000 000} / 100 = \text{rund 11 Milliarden kg Bleiakkus benötigt.}$$

Weltjahresproduktion an Blei: 11,3 Millionen Tonnen⁸

>> Eine flächendeckende Kurzzeitspeicherung ist mit Akkumulatoren nicht möglich.

Unterstellt man hingegen Silizium-Ionen Batterien, dann gilt:

Energiedichte 200 Wh/kg (90 - 250 Wh/kg⁹), Bedarf also 5,5 Mio Tonnen Akkumulatoren

Lithiumgehalt: 10 kg / 600 kg oder 0,15 kg / kWh¹⁰

Lithiumbedarf etwa 92.000 to.

5 BMVI: Räumlich differenzierte Flächenpotenziale für erneuerbare Energien in Deutschland, 2015, S. 96
https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/BMVIOnline/2015/DL_BMVI_Online_08_15.pdf?__blob=publicationFile&v=2

6 https://de.wikipedia.org/wiki/Solarpark_Neuhardenberg

7 <https://de.wikipedia.org/wiki/Energiespeicher>

8 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38017/umfrage/produktion-von-bleimetall-weltweit-seit-2004/>

9 https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator#Spezifische_Energie_und_Energiedichte

10 <https://www.gevestor.de/details/lithium-und-elektroautos-ist-die-preishysterie-gerechtfertigt-779356.html>

4. Langzeitspeicherung

Annahmen / Gedanken:

- „Die Analyse der Wetterjahre 2006 bis 2016 zeigt darüber hinaus in jedem zweiten Jahr eine mindestens zweiwöchige Phase, in der die modellierte Residuallast über 70 GW betrug, in 2012 gab es Mitte Februar eine ähnlich stark ausgeprägte kalte Dunkelflaute wie 2006 – mit 72,6 GW Residuallast im zweiwöchigen Mittel.“¹¹
- In der Zeit der Dunkelflaute kommt jedes Bedarfsmanagement, das Last in die Zeiten hoher Energieverfügbarkeit verschiebt, irgendwann zum Erliegen. Wird daher in dieser Betrachtung vernachlässigt.
- Ein Ausgleich über Import Export zu den Nachbarländern setzt voraus, dass diese nicht das tun, was die Deutschen für richtig halten, nämlich voll auf regenerative Energie umrüsten. Dann treten nämlich zur gleichen Zeit die gleichen Wetterphänomene auf.

Leistungsbedarf: kontinuierlich: $(183 - 36 = 147 \text{ GW})$

Energiebedarf für 14 Tage: $147 * 24 * 14 = 49,4 \text{ TWh}$

Problem: Es gibt keine entwickelte Speichertechnologie für diese Größen!

Beispiel: Power to Gas.

GuD-Kraftwerk:

Beispiel Hamm-Uentrop, 800 MW, Wirkungsgrad nahe 60 %

davon werden $147 / .80 = 184$ Stück benötigt.

zur Verdeutlichung: Gleichmäßig über Deutschland verteilt ergäbe dies einen mittleren Abstand von Kraftwerk zu Kraftwerk nur 49,8 km.

Kaverne:

Offenbar kein großes Problem, da Erdgasspeicher zur Verfügung stehen

Elektrolyseur:

Auslegung für maximale Leistung von Wind und Sonne, etwa 50 % der installierten Gesamtleistung, abzüglich der laufenden Versorgungslieferung von 147 GW also rund $(423 + 870) / 2 - 147 = \text{rund } 500 \text{ GW}$

Bei Zuordnung je eines Elektrolyseurs pro Kraftwerk ergibt sich eine Leistung pro Elektrolyseur von $500 / 184 = 2,7 \text{ GW}$.

Hochrechnung Technologie „Falkenhagen“: 2 MW bei 8 20-Fuß-Containern
 $2.700 \text{ MW} / 2 * 8 = 10.800 \text{ TEU}$

Ohne das Vorhandensein dieser Speichermöglichkeiten, ist eine Versorgungssicherheit nicht möglich.

Nicht berücksichtigt:

¹¹ Huneke F, Linkenheil CP, Niggemeier M: Kalte Dunkelflaute: Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter; Energy Brainpool, Greenpeace Energy eG, Berlin 2017

- Saisonalität des Bedarfs
- Stillstands- und Ausfallzeiten
- Regentage im Sommer
- längere oder häufigere oder schneller aufeinanderfolgende Dunkelflauten
- Schlechte Sonnenjahre („verregneter Sommer“)
- Schlechte Windjahre
- Keine überschüssige Energie, um CO₂ aus der Atmosphäre abzuscheiden, um den weiteren unvermeidlichen Ausstoß zu kompensieren (Flugzeuge, Schiffe, Plastikverbrennung).

Wenn man das System zu klein dimensioniert, treten totale (!), wirklich totale (!!) Blackouts auf. Wir sind dann wieder von den Launen des Wetters abhängig.

Übrigens:

Von Kernkraftwerken 1,2 GW Leistung / 8000 Vollaststunden p.a. würde man 177 Stück brauchen.

Daten Kunststoffe:

Verbrauch in Deutschland 2017:

11,8 mio to Verbrauch in Deutschland als Werkstoffe

8,9 mio to für Lacke, Klebstoffe, Fasern etc.

20,7 mio to Summe

1,8 mio to Recyclat

also rund 19 mio to aus Rohstoffen (hauptsächlich Erdöl)

Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#textpart-1>

Norbert Aust

27.07.2019