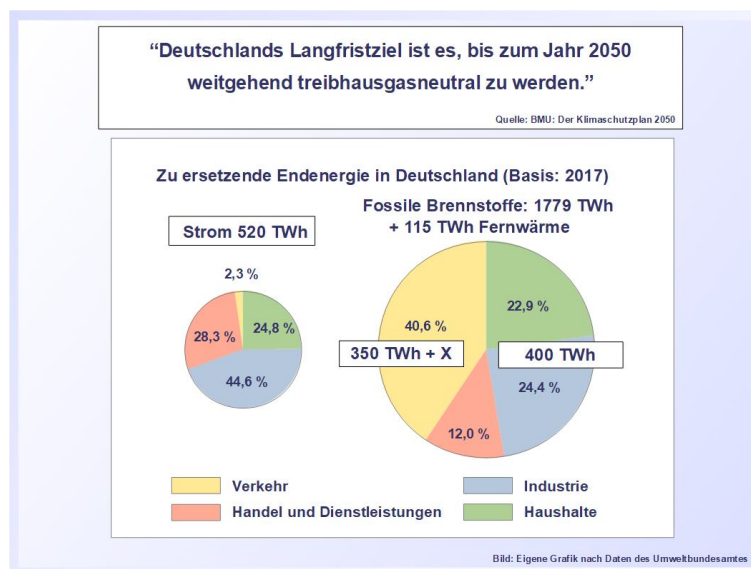




Begeitmaterial
- Quellen
- Annahmen
- Berechnungen

Wenn möglich, bitte wenden!
Zur Problematik der Energiewende in Deutschland
Dr.-Ing. Norbert Aust

Skepkon 2019: Augsburg, 31. Mai 2019 Bild: Wikimedia Commons, Autor Tim Green from Bradford



(3.1.) Langfristziel

Quelle:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.), Arbeitsgruppe IK III.1: Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 2.

Auflage (Februar 2019), [Link](#)

Mehrfach erwähnt, beispielsweise Seite 35: „Leitbild 2050 und Transformationspfad“.

(3.2.) Statistische Angaben

Quelle:

Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen ([Link](#))

Diagramm: „Energieverbrauch 2017 nach Sektoren und Energieträgern“

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

Die Kategorie „Regenerativ“ wird nicht weiter betrachtet, da diese ganz offensichtlich nicht durch regenerativ erzeugten Strom gedeckt werden muss.

(3.3) 350 TWh + X

Fahrleistungen und Bestand PKW und LKW:

Quelle Verschiedene Daten Krafftahrtbundesamt: ([Link](#))

PKW:

Bestand: 46,5 Mio

Durchschnittliche Fahrleistung per PKW: 14.000 km / a

Energiebedarf Elektrobetrieb: 20 kWh / 100 km

(Verbrauchsangabe: Mittelwert aus ADAC-Test ([Link](#))):

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 ([Link1](#), [Link2](#))):

Bedarf Elektrische Energie: 217,5 TWh / a

Gesamtbedarf Verkehr: gerundet 350,0 TWh
offen dabei (daher „+ X“):

- Ersatz Dieselloks bei der Eisenbahn
- Schifffahrt, Binnen und See

- Flugverkehr

3.4. „400 TWh“

Annahmen / Überlegungen:

- die fossilen Energieträger dienen außerhalb des Verkehrssektors zur Erzeugung von Hoch- und Niedertemperaturwärme
- Teilweise direkte Ersetzung durch Strom
- Fernwärme ist heute eine Auskopplung von Kraftwerken bzw. KWK-BHKW-Anlagen. Diese entfallen und sind ebenfalls zu ersetzen
- Vereinfachende Annahme: Wärmebereitstellung durchweg durch Wärmepumpen, praktische Leistungszahl 3 (=Leistungszahl x Gütegrad) nach Angaben Wikipedia ([Link](#))

Fossile Heizleistung: $(1779 - 723 + 115 \text{ TWh}) / 3 = 400 \text{ TWh}$ elektrische Antriebsleistung für WP

Annahmen für Strombedarf "2050"	
Szenario: "Direkte Stromnutzung"	
Endenergieverbrauch Strom originär	520 TWh
Aus Straßenverkehr	350 TWh
Aus Ersatz fossiler Energieträger	400 TWh
Zwischensumme	1270 TWh
Speicherverlust (50% Wirkungsgrad von halber Menge)	320 TWh
Leitungsverlust 6 %	95 TWh
Gesamt:	1685 TWh
./ Biomasse, Laufwasser (Stand heute 62 TWh)	85 TWh
Bleiben zu decken durch Solar und Wind:	1600 TWh

(4.1.) Speicherverlust ... 320 TWh

Überlegungen / Annahmen

- Wegen des zeitlich nicht dem Bedarf entsprechenden Angebot 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 gespeichert

Zwischensumme: 1270 TWh,

Energiebedarf zur Deckung der Speicherverluste: $1270 * 0.5 * 0.5 = 320 \text{ TWh}$ (gerundet).

(4.2.) Leitungsverlust 95 TWh

Nach Angaben Wikipedia ([Link](#)) beträgt der Verlust des Übertragungs- und Verteilnetzes rund 6 % der Einspeisemenge:

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

(4.3). Biomasse, Laufwasser

Quelle für „Stand heute“:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Webseite „Energy Charts“
Statistik „Jährliche Stromerzeugung in Deutschland 2017“ ([Link](#))

Wasserkraft: 20,1 TWh
Biomasse: 44,7 TWh
Summe 64,8 TWh (unbedeutender Schreibfehler auf der Folie)

Die in Abzug gebrachte Menge sollte auf eine verbleibende runde, gut zu merkende Summe führen. Angesichts der groben Schätzung ergeben sich hier keine großen Fehler.



(5.1.) Bedarf 800 TWh/a

Die hälftige Aufteilung ist eine wahrscheinlich sinnvolle Schätzung, da Wind und Sonne zu unterschiedlichen Zeiten ihr jeweils höchstes Angebot liefern.

(5.2.) Ausnutzung 21,6 %

Quelle

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Webseite „Energy Charts“ ([Link](#))

Grafik „Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland“ ([Link](#))

Installierte Leistung 2017:

Wind onshore: 50,29 GW
Wind offshore: 5,43 GW
Summe 55,72 GW

Graphik „Jährliche Stromerzeugung in Deutschland 2017“ ([Link](#))

Stromerzeugung aus Wind: 105,7 TWh

Dies ergibt bei 8760 Stunden pro Jahr eine Auslastung von 21,6 %.

Zwischen onshore und offshore wird nicht unterschieden, da der Anteil an der Produktion bei vollem Ausbau des Potenzials von 57 GW* sich nicht grundlegend verschiebt (13,5 % gegen 9,7 % heute), dass sich die mittlere Auslastung fühlbar ändern wird.

*Quelle für Offshore-Potenzial: NN: Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende - Update 2017, Publikation des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kap. 4.2.2., [Link](#)

Daraus ergibt sich der erforderliche Ausbau wie angegeben.

(5.3) Bestandszahlen Windanlagen

Bestand: 28.675 Anlagen

Quelle: Wikipedia ([Link](#)),

Tabelle Windenergiestatistik Deutschland, Angaben für 2017

(5.4) Produktionskapazitäten:

Enercon: 27.815 Anlagen weltweit installiert,
Gründung 1984

Quelle: Webseite Enercon, Referenzen ([Link](#)) und Historie ([Link](#))

Vestas: 101 GW total Vestas installed base
Start der Lieferung von Windanlagen: 1980

Quelle: Webseite Vestas ([Link](#)) ([Link](#))

(5.5) Flächenbedarf

Annahme: Leichtwindanlagen P = 4,2 MW
ca. 140 m Rotordurchmesser analog Enercon E138 EP3 §2 ([Link](#))

Flächenbedarf als Windpark

Abstand in 5 x Rotordurchmesser = 700 m.

pro Anlage $0,70 * 0,70 \text{ km}^2 = 0,49 \text{ km}^2$

bei 100.700 Anlagen: 49.343 km^2

als leicht eingängige Zahl auf 50.000 km^2 gerundet.

Restriktionsfreie Fläche:

Quelle:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.): Räumlich differenzierte Flächenpotenziale für erneuerbare Energien in Deutschland, BMVI-Online-Publikation 08/2015, ([Link](#)) Tabelle 19,

„Restriktionsfreie Fläche“ $623.804 \text{ ha} = 6238 \text{ km}^2$

Mittlerer Abstand zur Verdeutlichung der Menge:

Annahme: Gleichmäßige Verteilung über ganz Deutschland, ohne Rücksicht auf Geographie, Einschränkungen etc.

Fläche Deutschland: 358.000 km² (Wikipedia)

Pro Windanlage: 3,6 km², Kreis vom Durchmesser 2,14 km.



(6.1.) 300 Anlagen auf 1000 km²

NN.: Windkraftanlagen im Rhein-Hunsrück-Kreis ([Link](#))

Stromerzeugung aus Photovoltaik
Bedarf: 800 TWh / a

Ausnutzung 10,5 % der Nennleistung in 2017
870 GWp installierte Nennleistung

Zum Vergleich:
Bestand 2017: 42,3 GWp

Kapazität: **Jinko Solar: 10,8 GW p.a.**
max. Zubau in D (2011): 8 GW p.a.

Verfügbar:
Dachflächen gesamt: 150 GWp

Benötigt:
Solarparks: 12.000 km² (Schleswig-Holstein: 15.800 km²)
restriktionsfreie Fläche: 3.120 km²

Bild: Wikimedia, Autor: euroluftbild.de/Grahn

(7.1.) Bedarf 800 TWh/a

Die hälftige Aufteilung ist eine wahrscheinlich sinnvolle Schätzung, da Wind und Sonne zu unterschiedlichen Zeiten ihr jeweils höchstes Angebot liefern, siehe oben.

(7.2) Ausnutzung 10,5 %

Quelle

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Webseite „Energy Charts“ ([Link](#))
Grafik „Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland“ ([Link](#))

Installierte Leistung Solaranlagen 2017: 42,98 GW

Graphik „Jährliche Stromerzeugung in Deutschland 2017“ ([Link](#))

Bereitgestellte elektrische Energie: 39,43 TWh

Dies ergibt bei 8760 Stunden pro Jahr eine Auslastung von 10,5 %.

Daraus ergibt sich der erforderlich Ausbau wie angegeben.

(7.3) Bestandsdaten

wie 7.2.

(7.4.) Herstellkapazität:

Webseite Jinkosolar des derzeit größten Herstellers für Solaranlagen ([Link](#))

(7.5.) Max. Zubau: Quelle wie (7.2)

Bestand 2010: 18,01 GW
Bestand 2011: 25,43 GW - Zuwachs 7,42 GW
Bestand 2012: 33,03 GW - Zuwachs 7,60 GW

Angabe gerundet auf 8 GW.

(7.6.) Potenzial Dachflächen

Quelle:

BMWI-Online-Publikation Nr. 08/2015: Räumlich differenzierte Flächenpotenziale für erneuerbare Energien in Deutschland, [Link](#), Tabelle 14

(7.7) Flächenbedarf

In der Fläche anzulegende Solarparks: $870 - 150 = 720$ GWp.

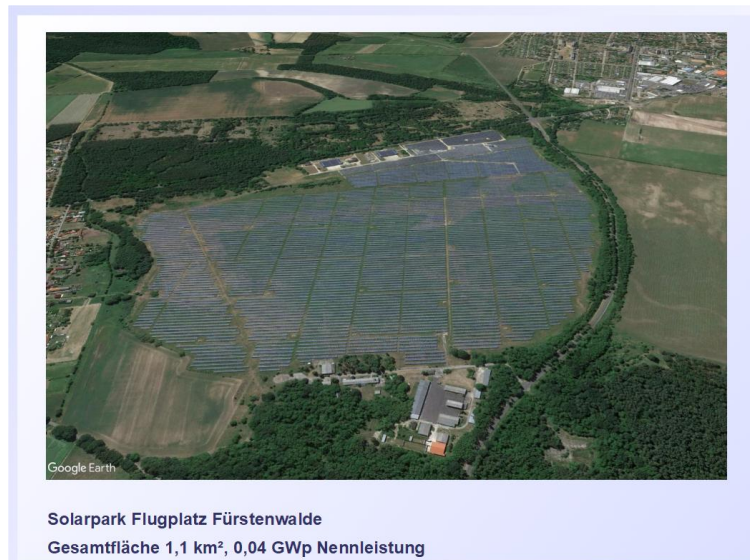
Spezifischen Flächenbedarf ermittelt am Beispiel Neuhardenberg (Daten Wikipedia, [Link](#)):

installierte Leistung 145 MWp
Ausdehnung 2,4 km²
spez. Flächenleistung also 60,4 MWp / km²

Damit ergibt sich ein Flächenbedarf von $720 / 0,0604 = 11.920$ km² rd. 12.000 km²

(7.8.) Restriktionsfreie Fläche

Quelle wie 7.6, jedoch Tabelle 20: Restriktionsfreie Fläche = 316.366 ha = rd 3163 km²
 (unbedeutender Schreibfehler auf der Folie)

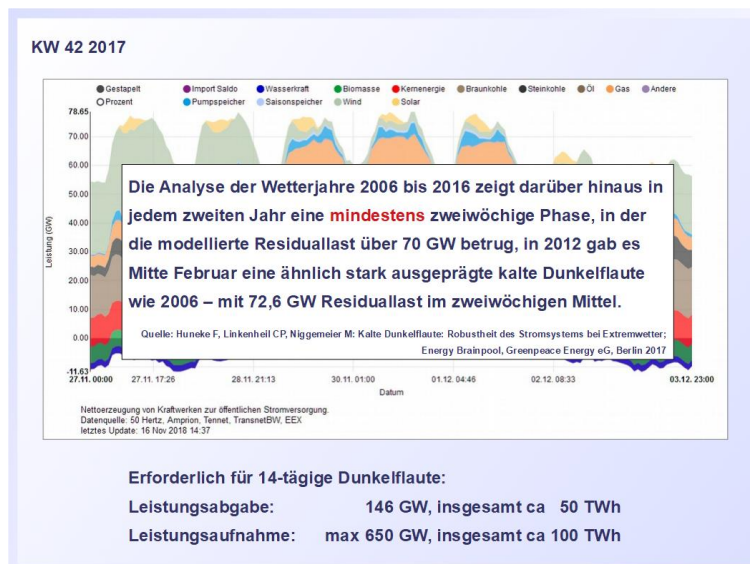


(8.1) Fläche, Leistung

Leistungsangabe: Wikipedia ([Link](#))

Flächenangabe: Aus Google Earth mit Polygonfunktion ermittelt.

Die Angaben in der Wikipedia (74 ha) beziehen sich wahrscheinlich auf die Fläche der Paneele und nicht den gesamten Flächenbedarf inklusive Verkehrsflächen etc.



(9.1) Lastkurve:

Webseite, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE ([Link](#))

Option „Import-Saldo“ ausgewählt.

(9.2) Erforderliche Leistung in Dunkelflaute

Annahme: Während einer Dunkelflaute müssen nur die direkten Verbräuche gedeckt werden und keine Leistung zur Speicherung inkl. Verlustleistung aufgebracht werden. Dies wird vereinfachend als konstant über das ganze Jahr (8760 Stunden) angenommen.

$$P = (1600 - 320) \text{ TWh} / 8760 \text{ h} = 146 \text{ GW}$$

in 14 Tagen (336 h) sind das 49, gerundet auf einprägsame Zahl 50 TWh

(9.3) Leistungsaufnahme

Annahme: Das Speichermedium muss die maximal anfallenden Stromlieferungen aufnehmen können, auch wenn der direkte Leistungsbezug der Kunden niedriger ausfällt als es dem Durchschnitt entspricht. Man kann die nur kurzfristig auftretenden Leistungsspitzen im Interesse einer Anlagenökonomie abregeln, allerdings ist dann der Aufbau von zusätzlichen Erzeugungsanlagen erforderlich, um die Jahresproduktion zu erreichen.

Eine Auswertung der Monatsgrafiken Solar vs. Wind ergab für 2017, dass die maximale Leistungsabgabe gut durch die Summe der halben installierten Leistungen dargestellt werden kann.

Quelle:

Webseite, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE ([Link](#))

Grafiken „Solar vs. Wind in Deutschland im Januar 2017“ ([Link](#))

sowie für die Folgemonate.

Installierte Leistung Wind und Sonne in 2017: 97 GW

48,5 GW wird nur in wenigen Fällen erreicht oder überschritten.

Maximalleistung in 2050 870 + 432 GW also rund 650 GW.

Beispiel Power to Gas

- Herstellung von Wasserstoff (Elektrolyse) mit überschüssigem Strom ($\eta = 80\%$)
- Speicherung des Wasserstoffes
- Betrieb eines GuD-Kraftwerks bei Strom - Unterdeckung ($\eta = 60\%$)



Verfügbare Technik:
GuD – Kraftwerk Irsching 5
Max. Leistung: 0,860 GW
Wirkungsgrad: 59,7 %

Ausführung: 6 Jahre
darin Bauzeit 3 Jahre

Bild: Rolf Sturm / EON

Zu errichten: 170 Kraftwerke (zus. 146 GW)
Vorhanden: 37 Anlagen mit zusammen 12,6 GW

(10.1) Daten des Kraftwerks Irsching 5

Quelle: Wikipedia ([Link](#))

(10.2) Bestandsdaten

Quelle:

Datenbank des Umweltbundesamtes: Kraftwerke in Deutschland (ab 100 MW elektrischer Leistung), ([Link](#))

Elektrolyseure

Elektrolyseure müssen die maximale Leistung aus Windkraft- oder PV Anlagen verarbeiten können!

Bei einem Ausbau halb Wind halb Sonne wären das 650 GW
Bei 170 Standorten jeweils Einspeiseleistung 3,8 GW

Problem: Es gibt keine Elektrolyseure dieser Größe!



Bild: Uniper Energy

Elektrolyse Falkenhagen
0,002 GW el. Leistungsaufnahme
Wirkungsgrad "bis zu 65 %"

11.1 Daten Elektrolyse Falkenhagen

Quelle:

Uniper: Flyer „Power-to-Gas - Energiewende zukunftsfest machen - mit Energiespeichern“ ([Link](#))



Containerschiff "CMA CGM Alexander von Humboldt"

l = 396 m, b = 53,6 m, t = 16 m

Ladefähigkeit: 16.020 TEU, 188.000 t dwt

Bild (Ausschnitt): Wikimedia, Autor: hummelhummel

12.1 Auslegungsdaten des Containerschiffs

Quelle: Wikipedia ([Link](#))

Ausbaubedarf „2050“

Windenergieanlagen	55 GW	423 GW	●●●●●●●●●●
Photovoltaikanlagen	42 GW	870 GW	●●●●●●●●●●
Elektrolyseure	0 GW	650 GW	●●●●●●●●●●
GuD-Kraftwerke	12,6 GW	175 GW	●●●●●●●●●●
Netzausbau	„75 GW“	„870 GW“	●●●●●●●●●●
Infrastruktur Verbraucher	völlig offen (außer PKW)		●●●●●●●●●●

13.1. Keine Quellenangaben

Versorgungssicherheit

Diese Überlegungen beinhalten keine Reserven für

- längere Dunkelflauten
- kürzer aufeinander folgende Dunkelflauten
- schlechte Windjahre
- schlechte Sonnenjahre

Reservekapazitäten vorsehen!

Wenn man sich überschätzt hat: flächendeckender totaler Blackout.

Frage:

Ist ein solches System vollkommen ohne Grund- und Regelleistung möglich?

14.1. Keine Quellenangaben

Zum Vergleich

Szenario "Strom + Wasserstoff + Methan"
 Ähnlicher Lebensstil und Konsumverhalten
 Bevölkerungsrückgang um 12,5 %

Strombedarf: 3.000 TWh

Kein CCS
 Keine Atomkraft
 Nutzung Biomasse nur als Abfallprodukte

Lösung:

"... gehen wir davon aus, dass ein größerer Teil des in Deutschland benötigten Stroms im Ausland erzeugt würde. (...) Eine dem heutigen Stand vergleichbare Importquote scheint realistisch."

Importquote Primärenergie 2014: 75 %



15.1. Publikation

Quelle:

Katja Purr et al.: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 - Hintergrundpapier, Umweltbundesamt, Dez. 2013 ([Link](#))

Kann die Energiewende gelingen?

Risiko 1: **Zeitbedarf**

- Entwicklung der Technologien für Speicherung und Anwendung
- Mangelnde Kapazitäten beim Aufbau der Anlagen

Risiko 2: **Akzeptanz in der Bevölkerung**

- Proteste gegen Windkraftanlagen, Netzausbau
- „Not in my backyard“

Risiko 3: **System- und Umsetzungsschwächen**

- Mangelnde Planung
- Versorgungssicherheit
- Auswirkungen eines möglichen Blackouts während der Umstellung

Risiko 4: **Finanzierung**

16.1. Keine Quellenangaben

Sämtliche Links abgerufen April/ Mai 2019

Dr.-Ing. Norbert Aust
19. Juli 2019