



Anna und Lorenz JARASS

Integration von erneuerbarem Strom

Stromüberschüsse  Stromdefizite

Integration von erneuerbarem Strom

Stromüberschüsse  Stromdefizite

Übersicht	4
Inhaltsverzeichnis	7
Teil I : Stromverbrauch und Stromproduktion	12
1 Zukünftige Stromversorgung in Deutschland.....	13
2 Wachsende Stromüberschüsse und Stromdefizite	25
3 Ausgleich von Stromverbrauch und Stromproduktion	43
4 Reservekraftwerksbedarf gemäß Bundesnetzagentur	65
Teil II : Stromtransport.....	78
5 Stromnetz	79
6 Ausgleich von Stromtransportbedarf und zulässigem Stromtransport	93
7 Regionale Netzplanung	110
8 Überregionale Netzplanung: Netzentwicklungsplan 2025	120
Anhang.....	140
Fußnoten.....	156
Quellen.....	163

2 Wachsende Stromüberschüsse und Stromdefizite

Die sichere Versorgung aller ans Netz angeschlossenen Kunden erfordert, dass Differenzen zwischen Stromverbrauch und Stromproduktion **sofort** ausgeglichen werden durch geeignete Maßnahmen sowohl auf der Verbrauchsseite als auch auf der Produktionsseite. Kurz: Die momentan nachgefragte Stromleistung muss identisch sein mit der momentan durch die Kraftwerke eingespeisten Leistung.

Die beiden Problemfälle sind Stromüberschuss und Stromdefizit:

- **Stromüberschuss:**

Erwartete Stromproduktion ist höher als erwarteter Stromverbrauch.

- **Stromdefizit:**

Erwartete Stromproduktion ist niedriger als erwarteter Stromverbrauch.

Erwartete Stromüberschüsse und Stromdefizite müssen sofort ausgeglichen werden, sonst bricht die Stromversorgung zusammen. Bei der Stromversorgung kann also sowohl zu wenig als auch zu viel Nachfrage das Gesamtsystem gefährden. Hingegen ist z.B. das Internet inhärent stabil: Zu viel Nachfrage führt beim Internet nicht zum Systemzusammenbruch, sondern nur zu vorübergehend langsameren Verbindungen. Und zu wenig Nachfrage führt nur zu nicht ausgelasteten Internetleitungen.

Die erneuerbare Stromproduktion weist, wie im Folgenden gezeigt, starke Fluktuationen auf, die grundsätzlich zu Stromüberschüssen und Stromdefiziten führen.

2.1 Starke Fluktuationen der erneuerbaren Stromproduktion

2.1.1 Stündliche Fluktuationen

Abb. 2.1 zeigt die Stromproduktion durch Windkraftwerke und durch Photovoltaikanlagen sowie deren jeweilige installierte Leistung im Zeitraum 2011 bis März 2015.

In Abb. 2.1a zeigt die **untere**, stark gezackte Linie die stündliche Windstromproduktion. Die **obere**, gleichmäßig ansteigende Linie zeigt die installierte Leistung aller in Deutschland installierten Windkraftwerke.

Ergebnis:

- Die stündliche Windstromproduktion schwankt völlig unregelmäßig und sehr stark von Tag zu Tag.
- Typischerweise werden während windstarker Tage maximal etwa zwei Drittel der installierten Windkraftwerksleistung produziert, in sehr seltenen Fällen bis zu etwa drei Viertel.

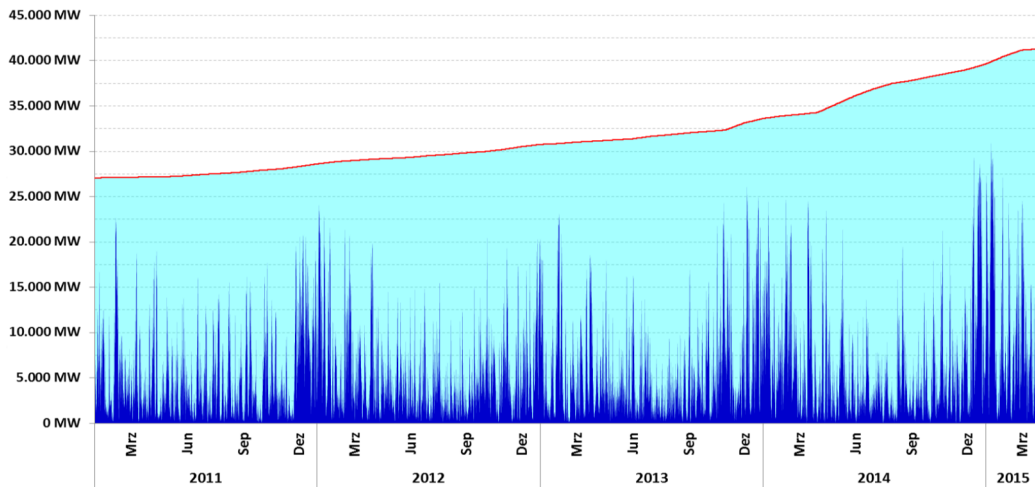
- Auffällig ist die tendenziell geringe Windstromproduktion im Sommer und die tendenziell hohe Windstromproduktion im Herbst und Winter.
- Die installierte Windkraftwerksleistung stieg von Anfang 2011 bis Ende 2013 von gut 27 GW (= 27.000 MW) auf gut 33 GW, also um gut 20%, und ist bis März 2015 um weitere 30% auf knapp 43 GW angestiegen.

Abb. 2.1 : Stündliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion und installierte Kraftwerksleistungen, 2011 bis 03/2015

a) Windstromproduktion

obere Linie: installierte Kraftwerksleistung

untere, stark gezackte Linie: stündliche Stromproduktion



In Abb. 2.1b zeigt die **untere**, stark gezackte Linie die stündliche Photovoltaikstromproduktion. Die **obere**, gleichmäßig ansteigende Linie zeigt die installierte Nennleistung aller in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen.

Ergebnis:

- Die stündliche Photovoltaikstromproduktion schwankt sehr stark von Tag zu Tag.
- Typischerweise wird während sonniger Tage maximal etwa die Hälfte der installierten Leistung der Photovoltaikanlagen produziert, in sehr seltenen Fällen bis zu etwa zwei Drittel.
- Auffällig ist die durchwegs sehr geringe Photovoltaikstromproduktion im Winter.
- Die installierte Leistung der Photovoltaikanlagen verdoppelte sich von Anfang 2011 bis Ende 2013 von rund 17,5 GW auf rund 35 GW und ist seitdem weiter leicht auf gut 38 GW angestiegen.

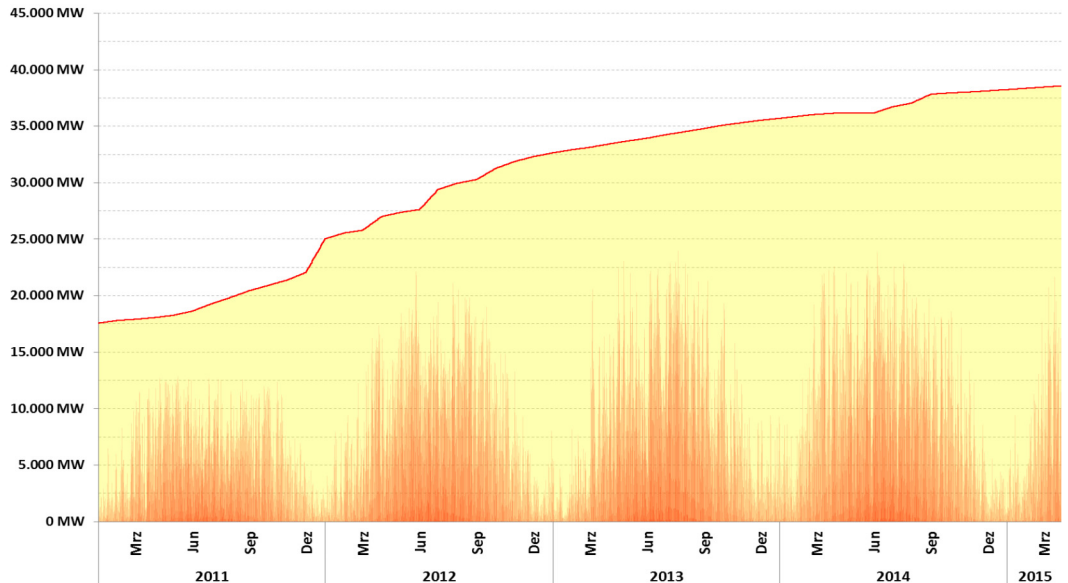
Tab. 2.1 zeigt die stündliche erneuerbare Stromproduktion in Deutschland für die Jahre 2011 bis März 2015, und zwar den jeweils minimalen, durchschnittlichen und maximalen Wert. Zudem wird die jeweilige Stromproduktion bezogen auf die jeweilige installierte Leistung angegeben.

Abb. 2.1 (Fortsetzung): Stündliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion und installierte Kraftwerksleistungen, 2011 bis 03/2015

b) Photovoltaikstromproduktion

obere Linie: installierte Kraftwerksleistung

untere, stark gezackte Linie: stündliche Stromproduktion



Quellen: [Schuster 2015, Bilder 1 und 2], basierend auf EEX-Einspeisedaten, die ca. 90% der gesamten Stromproduktion umfassen; installierte Nennleistung basiert auf [BNetzA 2015c].

Ergebnis:

- Die minimale Windstromproduktion liegt in allen Fällen nahe 0 GW (Tab. 2.1, Sp. (2)).
- Die durchschnittliche Windstromproduktion wuchs von 6 GW in 2011 auf 7 GW in 2014. Die Auslastung der Windkraftwerke sank von 20% auf 17% (Tab. 2.1, Sp. (3a)).
- Die Auslastung für Photovoltaikanlagen ist jeweils nur rund halb so hoch wie bei Windkraftwerken.
- Die durchschnittliche Auslastung von Wind- plus Photovoltaikanlagen beträgt nur rund 14% (Tab. 2.1, Sp. (3a)).
- Die maximale Auslastung der Windkraftwerke beträgt 80% (Tab. 2.1, Sp. (4a)), während die maximale Auslastung der Photovoltaikanlagen nur rund 65% (Tab. 2.1, Sp. (4a)) beträgt.
- Die maximale Auslastung von Wind- plus Photovoltaikanlagen beträgt nur rund 50% (Tab. 2.1, Sp. (4a)).

Tab. 2.1 : Minimale, durchschnittliche und maximale Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2011 bis 03/2015

Jahr	(1)	(2)	(2a)	(3)	(3a)	(4)	(4a)
	Install.* Leistung [GW]	Minimale Stromproduktion [GW]	Auslastung	Durchschnittliche Stromproduktion [GW]	Auslastung	Maximale Stromproduktion [GW]	Auslastung
a) Windstromproduktion							
2011	28	0,1	0%	6	20%	23	82%
2012	31	0,1	0%	6	18%	24	77%
2013	33	0,1	0%	6	18%	26	80%
2014	39	0,0	0%	7	17%	30	76%
bis März 2015	41	0,2	1%	k.A.	k.A.	31	76%
b) Photovoltaikstromproduktion							
2011	23	0,0	0%	2	10%	13	57%
2012	33	0,0	0%	3	9%	22	68%
2013	36	0,0	0%	4	10%	24	66%
2014	38	0,0	0%	4	11%	24	64%
bis März 2015	38	0,0	0%	k.A.	k.A.	22	57%
c) Wind- plus Photovoltaikstromproduktion							
2011	51	0,2	0%	8	15%	28	55%
2012	64	0,2	0%	9	14%	32	49%
2013	69	0,1	0%	9	14%	36	52%
2014	77	0,1	0%	11	14%	38	49%
bis März 2015	79	0,3	0%	k.A.	k.A.	44	55%

* Netto-Engpassleistung

Hinweise:

Zu Sp. (2a), (3a) und (4a): Auslastung = Stromproduktion pro installierte Leistung.
Zu Sp. (3): Werte nicht nur bis März 2015, sondern für das ganze Jahr 2015.

Quellen:

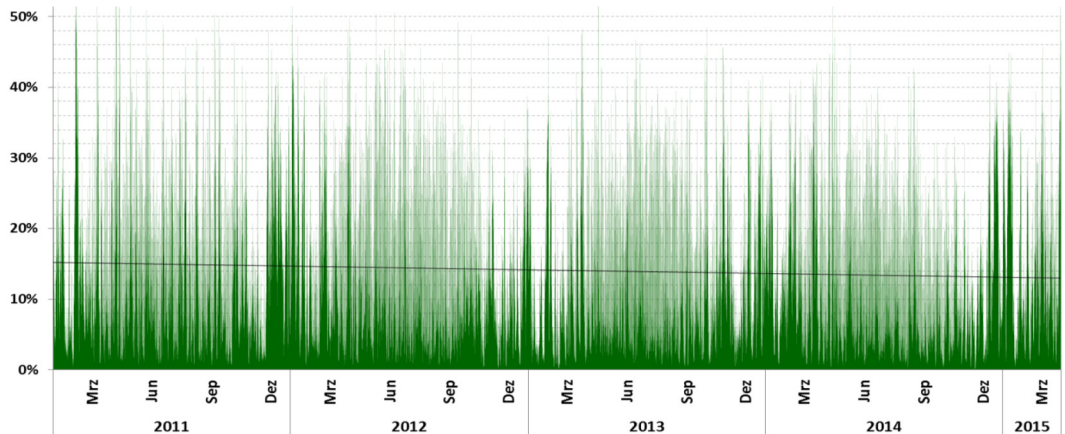
Zu Sp. (1): Tab. 1.2 und [BMWi 2015a, Tab. 21, Tab. 22]; zu Sp. (3): Tab. 1.2 und Tab. 1.5.

Zu Sp. (2) und (4): [Schuster 2015, S. 4], basierend auf EEX-Einspeisedaten, die ca. 90% der gesamten Stromproduktion umfassen. Für die installierten Leistungen werden hingegen die tatsächlichen Werte und zudem keine Mittelwerte, sondern Jahresendwerte verwendet. Dadurch werden die in den Sp. (2a), (3a) und (4a) angegebenen Werte für erneuerbare Stromproduktion pro installierte Leistung um etwas mehr als ein Zehntel unterschätzt.

Abb. 2.2 zeigt für die Jahre 2011 bis März 2015 die durchschnittliche Auslastung aller Wind- und Photovoltaikanlagen, gegeben durch die Summe der stündlichen Wind- und Photovoltaikstromproduktion dividiert durch die Summe ihrer installierten Leistungen. Die durchgezogene Linie zeigt eine Regressionsgerade der Auslastung.

**Abb. 2.2 : Stündliche Auslastung der Wind- und Photovoltaikanlagen,
2011 bis 03/2015**

stark gezackte Linie: Wind- plus Photovoltaikstromproduktion bezogen auf die insgesamt installierte Leistung
horizontale Linie: Regressionsgerade von Wind- plus Photovoltaikstromproduktion bezogen auf installierte Wind- plus Photovoltaikleistungen



Quelle: [Schuster 2015, Bild 4], basierend auf EEX-Einspeisedaten, die nur gut 90% der gesamten Stromproduktion umfassen.

Ergebnis:

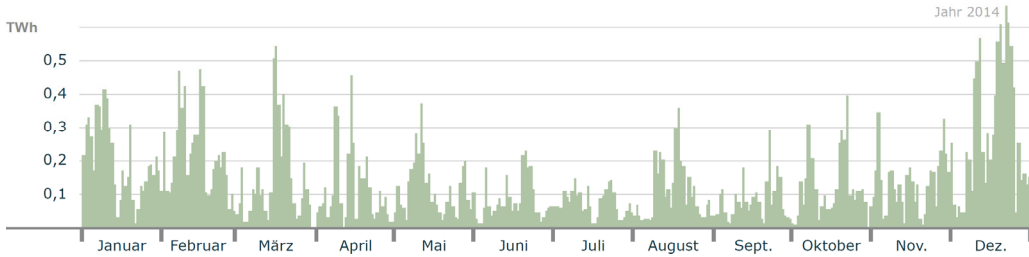
- Die stündliche Auslastung der Wind- und Photovoltaikanlagen schwankt völlig unregelmäßig und sehr stark von Tag zu Tag.
- Bei hoher Wind- plus Photovoltaikstromproduktion beträgt die Auslastung rund ein Drittel, in sehr seltenen Fällen bis zur Hälfte, d.h., die stündliche Stromproduktion beträgt dann bis zur Hälfte der insgesamt installierten Kraftwerksleistung.
- Die durchschnittliche Auslastung sank von rund 15% im Jahr 2011 auf rund 13% im Jahr 2014. Die tatsächliche Auslastung ist deutlich höher²². Im sehr windstarken Jahr 2015 betrug sie für Wind onshore und Photovoltaik im Mittel gut 18%.²³

2.1.2 Tägliche, wöchentliche und monatliche Fluktuationen

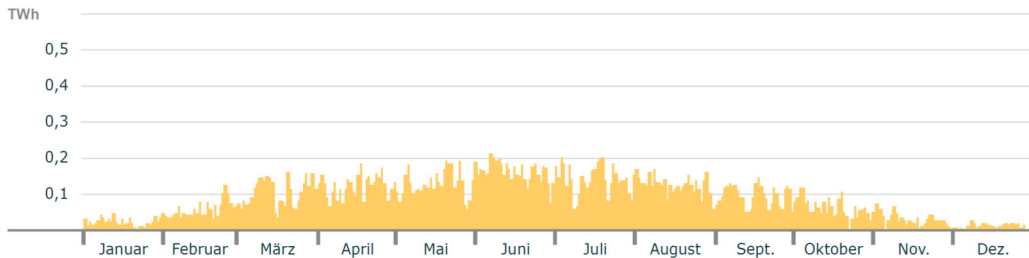
Abb. 2.3 zeigt beispielhaft für das Jahr 2014 die tägliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion.

Abb. 2.3 : Tägliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2014

a) Windstromproduktion



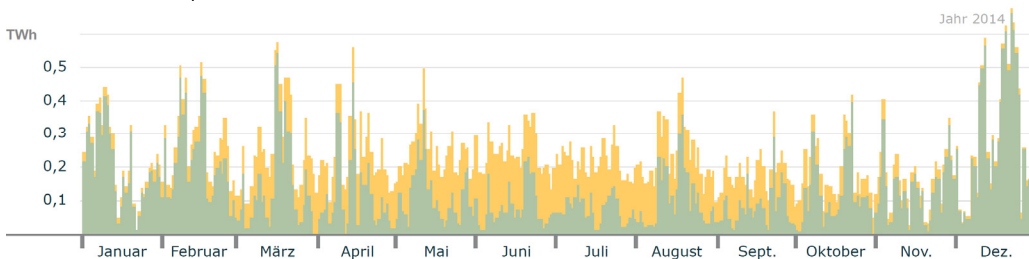
b) Photovoltaikstromproduktion



c) Wind- plus Photovoltaikstromproduktion

obere Linie: Photovoltaikstromproduktion

untere Linie: Windstromproduktion



Quelle: [Burger 2015, S. 41, 42, 44].

Ergebnis:

- Die maximale tägliche Windstromproduktion betrug 0,662 TWh am 22.12.2014. Die minimale tägliche Windstromproduktion betrug 0,009 TWh am 02.10.2014, also nur gut 1% der maximalen täglichen Produktion.

- Die maximale tägliche Photovoltaikstromproduktion betrug 0,212 TWh am 06.06.2014. Die minimale tägliche Photovoltaikstromproduktion betrug 0,003 TWh am 30.12.2014, also wie bei der Windstromproduktion nur gut 1% der maximalen täglichen Produktion.

Wind- und Photovoltaikstromproduktion ergänzen sich häufig im Tagesverlauf, aber nicht immer, wie Abb. 2.3c zeigt, allerdings in noch deutlich geringerem Maße als bei wöchentlicher Durchschnittsbetrachtung wie in Abb. 2.4c:

- Windstromproduktion ist im Winter besonders hoch, Photovoltaikstromproduktion hingegen im Sommer.
- Die maximale tägliche Wind- plus Photovoltaikstromproduktion betrug 0,676 TWh am 22.12.2014, und zwar fast ausschließlich Windstromproduktion. Die minimale tägliche Produktion betrug 0,022 TWh am 21.01.2015, also 3% der maximalen täglichen Produktion.

Abb. 2.4 zeigt beispielhaft für das Jahr 2014 die wöchentliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion.

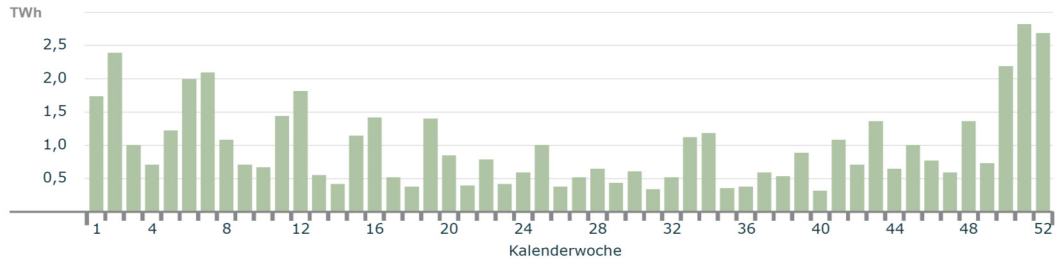
Ergebnis:

- Die maximale wöchentliche Windstromproduktion betrug 2,9 TWh in Kalenderwoche 51. Die minimale wöchentliche Windstromproduktion betrug 0,32 TWh in Kalenderwoche 40, also nur 11% der maximalen Produktion.
- Die maximale wöchentliche Photovoltaikstromproduktion betrug 1,26 TWh in Kalenderwoche 23. Die minimale wöchentliche Photovoltaikstromproduktion betrug 0,06 TWh in Kalenderwoche 49, also nur 5% der maximalen Produktion.
- Die maximale wöchentliche Wind- plus Photovoltaikstromproduktion betrug 2,6 TWh in Kalenderwoche 2, ihre minimale wöchentliche Produktion betrug 0,8 TWh in Kalenderwoche 4, also immerhin 31% der maximalen wöchentlichen Produktion.

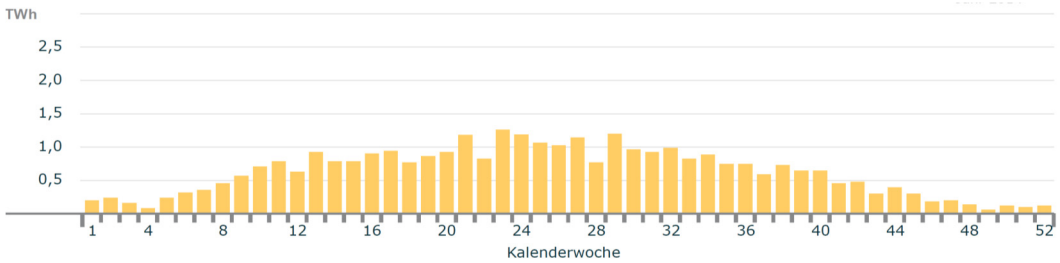
Wind- und Photovoltaikstromproduktion ergänzen sich auch im Wochenverlauf ganz gut, wie Abb. 2.4c zeigt, allerdings in deutlich geringerem Maße als bei monatlicher Durchschnittsbetrachtung wie in der späteren Abb. 2.5c: Windstromproduktion ist im Winter besonders hoch, Photovoltaikstromproduktion hingegen im Sommer.

Abb. 2.4 : Wöchentliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2014

a) Windstromproduktion

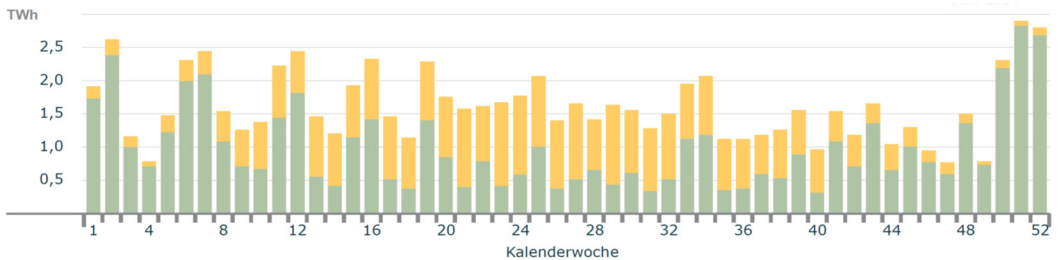


a) Photovoltaikstromproduktion



c) Wind- plus Photovoltaikstromproduktion

oberer Balken: Photovoltaikstromproduktion
 unterer Balken: Windstromproduktion

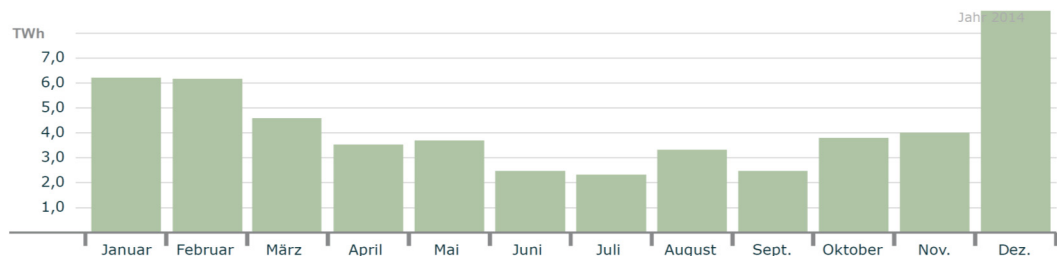


Quelle: [Burger 2015, S. 29, 30, 32].

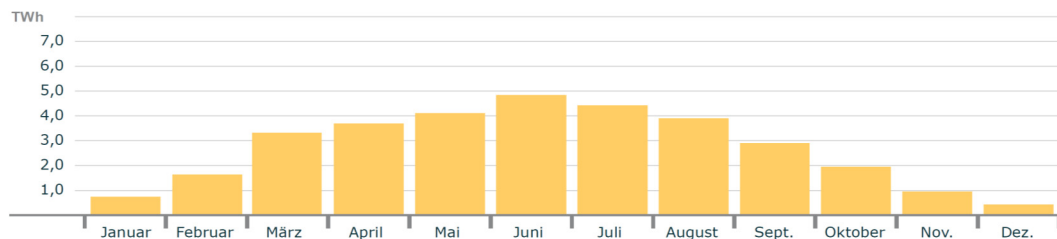
Abb. 2.5 zeigt beispielhaft für das Jahr 2014 die monatliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion.

Abb. 2.5 : Monatliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2014

a) Windstromproduktion

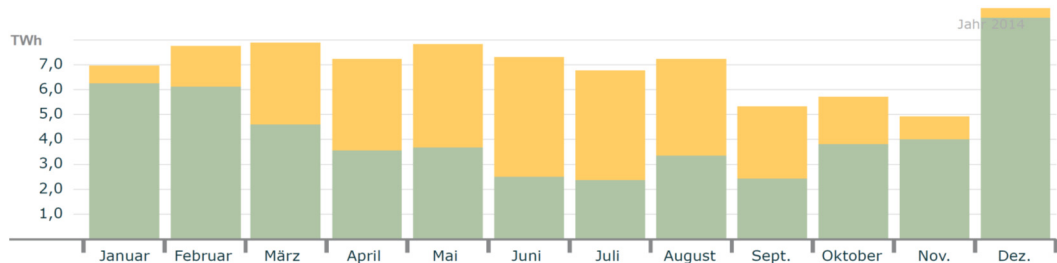


b) Photovoltaikstromproduktion



c) Wind- plus Photovoltaikstromproduktion

oberer Balken: Photovoltaikstromproduktion
 unterer Balken: Windstromproduktion



Quelle: [Burger 2015, S. 13, 14, 16].

Ergebnis:

- Die maximale monatliche Windstromproduktion betrug 8,8 TWh im Dezember 2014. Die minimale monatliche Windstromproduktion betrug 2,2 TWh im Juli 2014, also 25% der maximalen monatlichen Produktion.

- Die maximale monatliche Photovoltaikstromproduktion betrug 4,9 TWh im Juni 2014. Die minimale monatliche Photovoltaikstromproduktion betrug 0,4 TWh im Dezember 2014, also nur 8% der maximalen monatlichen Produktion.

Die monatliche Photovoltaikstromproduktion steigt im Jahresverlauf bis Juni relativ gleichmäßig an und fällt dann relativ gleichmäßig wieder ab. Im Gegensatz zur monatlichen Photovoltaikstromproduktion fluktuiert die monatliche Windstromproduktion auch von Monat zu Monat relativ stark, mit einem extremen Ausreißer im Dezember.

Wind- und Photovoltaikstromproduktion ergänzen sich aber gut übers Jahr, wie Abb. 2.5c zeigt:

- Windstromproduktion ist im Winter besonders hoch, Photovoltaikstromproduktion hingegen im Sommer.
- Von Januar bis August betrug die monatliche Wind- plus Photovoltaikstromproduktion gut 7 TWh, von September bis November nur gut 5 TWh, im Dezember rund 9 TWh.
- Die maximale monatliche Wind- plus Photovoltaikstromproduktion betrug 9,4 TWh im Dezember 2014. Die minimale monatliche Produktion betrug 5,1 TWh im November 2014, also immerhin 54% der maximalen monatlichen Produktion.

2.1.3 Extreme Fluktuationen

Tab. 2.2 gibt einen Eindruck von den extremen Fluktuationen der Wind- und Photovoltaikstromproduktion. Als Maß für diese Fluktuationen wird das Verhältnis aus minimaler und maximaler Stromproduktion für unterschiedliche Mittelungszeiträume angegeben.

Tab. 2.2 : Extreme Fluktuationen von Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2014

Minimale Stromproduktion dividiert durch maximale Stromproduktion	(1)	(2)	(3)	(4)
	Stunde	Tag	Woche	Monat
(1) Windstromproduktion	0%	1%	11%	25%
(2) Photovoltaikstromproduktion	0%	1%	5%	8%
(3) Wind- plus Photovoltaikstromproduktion	0%	3%	31%	54%

Quellen:
Sp. (1): Tab. 2.1; Sp. (2): Abb. 2.3,
Ergebnis; Sp. (3): Abb. 2.4, Ergebnis;
Sp. (4): Abb. 2.5, Ergebnis.

Ergebnis:

- Die minimale Stromproduktion bezogen auf die maximale Stromproduktion ist bei stündlicher und täglicher Mittelung vernachlässigbar.
- Erst ab einem Zeitraum von einer Woche steigt die minimale Stromproduktion bezogen auf die maximale Stromproduktion deutlich an. Diese Reduzierung der Fluktuation zeigt sich insbesondere bei Betrachtung der zeitgleichen Wind- und Photovoltaikstromproduktion.

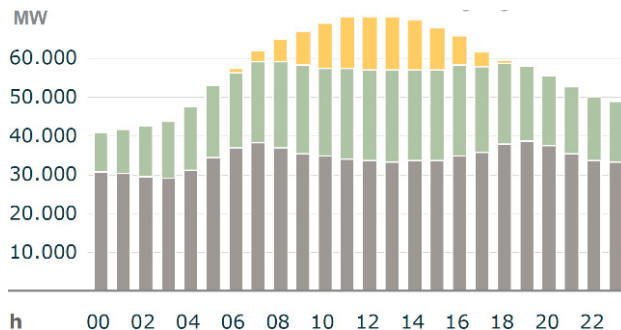
- Die monatliche Fluktuation der zeitgleichen Wind- und Photovoltaikstromproduktion ist relativ gering, weil die Windstromproduktion v.a. im Winter hoch ist und die Photovoltaikstromproduktion im Sommer.²⁴

Abb. 2.6 zeigt beispielhaft für das Jahr 2014 die Extremwerte der stündlichen Wind- und Photovoltaikstromproduktion sowie die jeweilige stündliche konventionelle Stromproduktion.

Abb. 2.6 : Extremwerte der stündlichen Wind- und Photovoltaikstromproduktion, 2014

a) Maximale stündliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion am 14. April 2014

oberer Balken: Photovoltaikstromproduktion
 mittlerer Balken: Windstromproduktion
 unterer Balken: konventionelle Stromproduktion

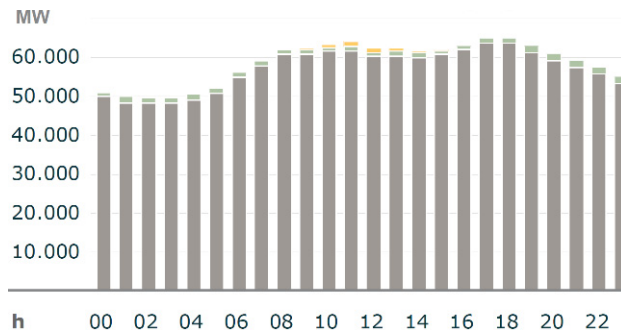


Quelle: [Burger 2015, S. 273/274].

[GW]	Stromproduktion	
	Mini- mum	Maxi- mum
(1) Photovoltaik	0	14.300
(2) Windenergie	8.700	23.900
(3) Konventionell	29.400	37.800

b) Minimale stündliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion am 03. Dezember 2014

oberer Balken: Photovoltaikstromproduktion
 mittlerer Balken: Windstromproduktion
 unterer Balken: konventionelle Stromproduktion



Quelle: [Burger 2015, S. 273/274].

[GW]	Stromproduktion	
	Mini- mum	Maxi- mum
(1) Photovoltaik	0	1
(2) Windenergie	1	2
(3) Konventionell	48	64

Am 14. April 2014 erreichte die stündliche Wind- und Photovoltaikstromproduktion den höchsten Wert des Jahres 2014. Abb. 2.6a zeigt für diesen Tag die stündliche Photovoltaikstromproduktion

(oberer Balken), Windstromproduktion (mittlerer Balken) und konventionelle Stromproduktion (unterer Balken).

Die kleine Tabelle neben Abb. 2.6a zeigt für den 14. April 2014 die minimalen und maximalen Werte der stündlichen Stromproduktion der Windkraftwerke, der Photovoltaikanlagen und der konventionellen Kraftwerke:

- Photovoltaikstromproduktion hatte mittags ein Maximum von 14 GW und nachts 0 GW, also eine Reduzierung um 14 GW.
- Windstromproduktion hatte ein Maximum von 24 GW und gegen Mitternacht nur 9 GW, also eine Reduzierung um 15 GW.
- Insgesamt musste also eine Reduzierung von 29 GW (= 14 GW + 15 GW) kompensiert werden. In diesem Fall war das leicht möglich, weil die Nachfrage während des Tages deutlich größer war als während der Nacht.
- Die konventionelle Stromproduktion hatte nachts ein Minimum von 29 GW und ein Maximum von 38 GW morgens und abends.

Am 03. Dezember 2014 erreichte die Wind- und Photovoltaikstromproduktion den niedrigsten Wert des Jahres 2014. Abb. 2.6b zeigt für diesen Tag die Photovoltaikstromproduktion (oberer Balken), Windstromproduktion (mittlerer Balken) und konventionelle Stromproduktion (unterer Balken).

Die kleine Tabelle neben Abb. 2.6b zeigt die extrem niedrige Wind- und Photovoltaikstromproduktion für diesem Tag:

- Die Wind- und Photovoltaikstromproduktion betrug maximal nur 3 GW und minimal nur 1 GW.
- Fast der gesamte Stromverbrauch von nachts rund 48 GW und während des Tages bis zu 64 GW musste durch konventionelle Kraftwerke abgedeckt werden.

2.1.4 Prognosen nur für maximal einige Tage zuverlässig

Wie gezeigt, fluktuieren sowohl die Wind- als auch die Photovoltaikstromproduktion sehr stark. Gesicherte Prognosen gestalten sich schwierig. Bei hohem und weiter steigendem Anteil von Wind- und Solarstrom entstehen bei Prognosefehlern wachsende Kosten: Es muss jeweils für den Zeitraum nach dem Ende der gesicherten Prognose, also z.B. für den jeweils nächsten Tag, ein hoher Preis allein für die Bereitstellung eventuell benötigter Regel- und Reserveenergie bezahlt werden, was den prinzipiell preissenkenden Effekt erhöhter erneuerbarer Stromproduktion teilweise wieder aufhebt. Deshalb stellt sich die Frage, wie gut derartige Fluktuationen prognostizierbar sind.

Die **Windstromproduktion** wird in Deutschland wesentlich durch Tiefdruckgebiete im Nordatlantik bestimmt. Von diesen sehr großräumigen Wirbeln, Tausende von Kilometern im Durchmesser, spalten sich ganz unregelmäßig kleinere Wirbel ab, die nach Osten driften und häufig das Wetter in Westeuropa bestimmen. Ob und wann derartige Abspaltungen geschehen, lässt sich nur schwer prognostizieren. Zudem zerfallen diese Abspaltungen selbst wiederum in immer kleinere instabile turbulente Strömungen, sodass selbst kleinräumige Windgeschwindigkeitsprognosen sehr erschwert werden.²⁵ Zuverlässige Prognosen im 24-Stundenbereich sind möglich. Von längerfristig stabilen Wetterlagen abgesehen, sind Windprognosen für mehrere Tage oder gar Wochen wegen der genannten Unregelmäßigkeit der Wirbelabrisse grundsätzlich nicht möglich (vgl. Abb. 2.3a).²⁶

Die **Photovoltaikstromproduktion** ist in Wüstengebieten sehr gut prognostizierbar, da jeden Tag die Sonne scheint, und die Photovoltaikanlage von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang produziert (von Sandstürmen o.Ä. abgesehen). Hingegen ist in Europa, insbesondere in Deutschland, eine Prognose sehr viel schwieriger. Ob und wie intensiv die Sonneneinstrahlung am Boden ist, hängt insbesondere von der erwarteten Bewölkung ab. Schon ein unerwartetes großräumiges Wolkenfeld kann die Prognosen über den Haufen werfen. Von längerfristig stabilen Wetterlagen abgesehen, sind zuverlässige Prognosen für Bewölkung, Hochnebel, Regen etc. nur für maximal einige Tage möglich. Verfeinerte Wettermodelle können im Regelfall die zu erwartende Photovoltaikstromproduktion für bis zu drei Tagen zuverlässig prognostizieren.²⁷ Die stündliche Photovoltaikstromproduktion ist gut zu prognostizieren im Gegensatz zur täglichen Photovoltaikstromproduktion, die sehr starken Schwankungen unterliegt (vgl. Abb. 2.3b).

Die erneuerbare Stromproduktion weist, wie gezeigt, starke Fluktuationen auf, die grundsätzlich zu Stromüberschüssen und Stromdefiziten führen. Dies wird verschärft durch die Beschränkung gesicherter Produktionsprognosen auf Zeiträume von maximal einigen Tagen. Die Problemfälle Stromüberschuss und Stromdefizit werden im Folgenden näher erläutert.

2.2 Problemfälle Stromüberschuss und Stromdefizit

Bei einem Stromüberschuss übersteigt die erwartete momentane Stromproduktion den erwarteten momentanen Stromverbrauch.

Zukünftig wird es immer häufiger momentane Stromüberschüsse geben, und zwar aus zwei Gründen:

- Kohlestromproduktion zeitgleich zu hoher erneuerbarer Stromproduktion,
- weiterer massiver Ausbau der stark fluktuierenden erneuerbaren Stromproduktion²⁸.

Bei einem Stromüberschuss muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- Export von konventionellem Strom, insbesondere von Kohlestrom²⁹, bei hoher erneuerbarer Stromproduktion,
- Export von erneuerbarem Strom bei hoher erneuerbarer Stromproduktion trotz maximal möglicher³⁰ Reduzierung der konventionellen Stromproduktion.

Andererseits wird es auch immer häufiger drohende Stromdefizite geben, weil die erneuerbaren Kraftwerke bei bestimmten Wetterlagen manchmal über Tage fast keinen Strom produzieren.³¹ Gemäß Untersuchungen der Bundesnetzagentur ist auf absehbare Zeit der für die Stromversorgung kritische Fall nicht etwa ein erwartetes Stromdefizit, sondern ein erwarteter Stromüberschuss, wie im späteren Kap. 4.1 erläutert wird.

2.2.1 Stromverbrauch versus Stromproduktion

Tab. 2.3 zeigt mögliche Problemfälle, die durch Unterschiede von Stromverbrauch und Stromproduktion auftreten können:

- Eine hohe Stromproduktion führt bei einem niedrigen Stromverbrauch zu einem Stromüberschuss, der sofort ausgeglichen werden muss.
- Eine niedrige Stromproduktion führt bei einem hohen Stromverbrauch zu einem Stromdefizit, das sofort ausgeglichen werden muss.
- Eine hohe Stromproduktion führt bei einem hohen Stromverbrauch zu einer grundsätzlich ausgeglichenen Strombilanz, Ausgleichsmaßnahmen sind dann nicht erforderlich.
- Ebenfalls führt eine niedrige Stromproduktion bei einem niedrigen Stromverbrauch zu einer grundsätzlich ausgeglichenen Strombilanz, Ausgleichsmaßnahmen sind dann nicht erforderlich.

Tab. 2.3 : Stromverbrauch versus Stromproduktion

	(1) hoher Stromverbrauch	(2) niedriger Stromverbrauch
(1) hohe Stromproduktion	kein Problem	Stromüberschuss
(2) niedrige Stromproduktion	Stromdefizit	kein Problem

Die Stromproduktion ist zwar bei Bedarf abregelbar, aber nicht erhöhbar. Prognosefehler und nicht vorhersehbare Ereignisse, wie z.B. ein Ausfall eines Kraftwerks oder ein unerwartetes simultanes individuelles Verhalten einer Vielzahl von Verbrauchern, führen zu unplanbaren Schwankungen der Stromproduktion und des Stromverbrauchs³²:

- Die größte nicht prognostizierbare Schwankung besteht im ungeplanten Ausfall eines Großkraftwerks der Grundlastversorgung, also ein Ausfall von bis zu 1,5 GW innerhalb weniger Sekunden. Auch schon vor der Integration hoher Anteile stark fluktuierender Wind- und Photovoltaikstromproduktion musste deshalb das Stromversorgungssystem gegen erhebliche Schwankungen gesichert sein.
- Die Wind- und Photovoltaikstromproduktion ist von der momentanen Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung abhängig und weist deshalb große Fluktuationen auf, die bei weiterem Ausbau von erneuerbaren Kraftwerken noch zunehmen werden.
- Die Fluktuationen werden bei der Windstromproduktion von einer Abfolge von großräumigen Flauten und von großräumigen Starkwindfronten verursacht. Sie erreichten in 2014 bis zu etwa 10 GW innerhalb von wenigen Stunden und über 20 GW innerhalb eines Tages (vgl. die frühere Abb. 2.1).
- Diese Schwankungen sind allerdings, im Gegensatz zu den ungeplanten Ausfällen eines konventionellen Kraftwerks, für einige Stunden bis zu etwa einem Tag gut prognostizierbar und damit in der Größenordnung einplanbar.
- Laufwasserstromproduktion unterliegt geringeren Fluktuationen, ist gut prognostizierbar und ist in Grenzen regelbar, indem man vorübergehend mehr oder weniger Wasser durch die Turbinen fließen lässt. Biogas aus Biomasse kann gespeichert und je nach Bedarf genutzt werden.

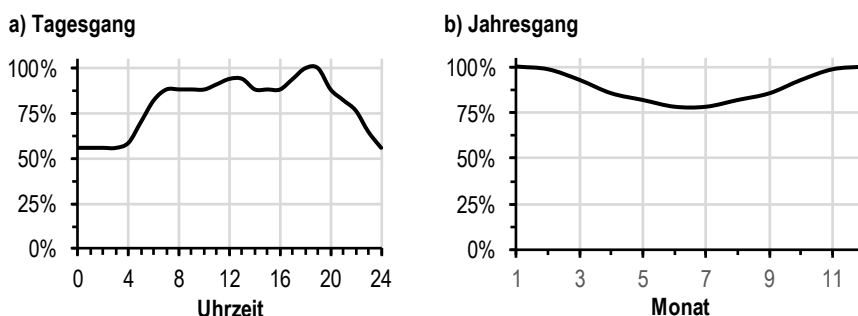
2.2.2 Tages- und Jahrgang des Stromverbrauchs

Der Stromverbrauch weist starke zeitliche Schwankungen im Tages-, Wochen- und Jahresrhythmus auf³³:

- Abb. 2.7a zeigt ein Schema des typischen Tagesgangs des Stromverbrauchs,
- Abb. 2.7b zeigt ein Schema des typischen Jahrgangs des Stromverbrauchs.

Zu diesen starken, allerdings gut prognostizierbaren Schwankungen des Stromverbrauchs kommt noch der Wochengang mit deutlicher Absenkung am Wochenende und an Feiertagen.

Abb. 2.7 : Tages- und Jahrgang des Stromverbrauchs – Schema



Quelle: [Jarass/Obermair 2012, Abb. 3.7, S. 77].

Typische Tagesgänge (Tag/Nacht), Wochengänge (Werktag/Wochenende) und Jahrgänge (Winter/Sommer) der zu deckenden Nachfrage ergeben sich aus der statistischen Überlagerung des Verbrauchs von Millionen Einzelkunden, und zwar mit gewissen wetterbedingten Schwankungen und kurzfristigen Schwankungen im Promillebereich. Diese Schwankungen sind von unvorhergesehenen Schwankungen überlagert, die allerdings durch geringfügige Spannungsschwankungen beim Verbraucher meist automatisch ausgeglichen werden.

Aufgrund langjähriger, gesicherter Erfahrungswerte ist deshalb der Stromverbrauch relativ genau prognostizierbar. Auf Basis von Verbrauchsprognosen werden dabei Fahrpläne für die einzelnen Kraftwerke des Verbundsystems festgelegt, welche die Prognoseunsicherheiten berücksichtigen.

Die Stromnachfrage hat also einen relativ genau bekannten Tages- und Wochenrhythmus. Dies steht ganz im Gegensatz zur Wind- und Photovoltaikstromproduktion, die ganz unregelmäßig fluktuiert und bestenfalls für einige Tage prognostizierbar ist. Die daraus resultierenden Stromüberschüsse und Stromdefizite werden im Folgenden erläutert.

2.2.3 Entwicklung von Stromüberschuss und Stromdefizit

Abb. 2.8 zeigt beispielhaft für den Zeitraum 12/2012 bis 02/2013 den Stromverbrauch in Deutschland im Vergleich zur Wind- und Photovoltaikstromproduktion.³⁴ Aus dem Verhältnis von Wind- und

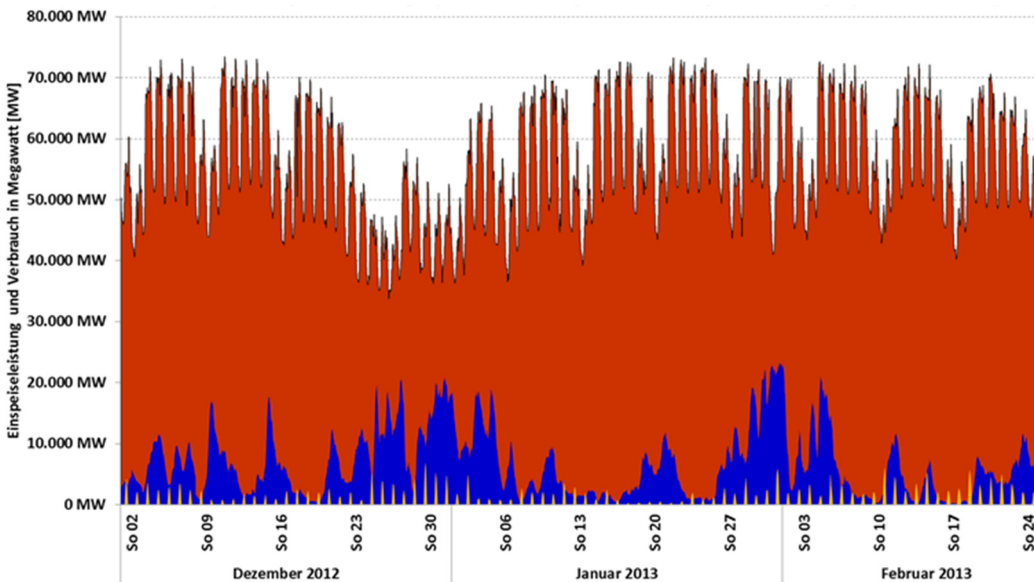
Photovoltaikstromproduktion zum Stromverbrauch kann jeweils abgeschätzt werden, wie stark die Wind- und Photovoltaikstromproduktion Stromüberschuss bzw. Stromdefizit bewirkt.

Abb. 2.8 enthält drei gezackte Linien:

- Die obere gezackte Linie zeigt den momentanen Stromverbrauch³⁵.
- Die mittlere gezackte Linie zeigt die Windstromproduktion.
- Die untere gezackte Linie zeigt die Photovoltaikstromproduktion.

Abb. 2.8 : Wind- und Photovoltaikstromproduktion im Vergleich zum Stromverbrauch, 12/2012 bis 02/2013

obere gezackte Linie: Stromverbrauch
mittlere gezackte Linie: Windstromproduktion
untere gezackte Linie: Photovoltaikstromproduktion



Quelle: [Linnenfelder/Schuster 2014, Diagramm 1].

Ergebnis:

- Der Stromverbrauch fluktuiert relativ regelmäßig während des Tages und während der Woche. Hingegen erfolgt die Windstromproduktion weitgehend unregelmäßig mit extrem steilen Anstiegen und Rückgängen. Die Photovoltaikstromproduktion erfolgt wesentlich in den späten Vormittags- bis frühen Nachmittagsstunden mit extrem steilen Anstiegen und Rückgängen.
- An Werktagen beträgt der maximale Stromverbrauch gut 70 GW und der minimale Stromverbrauch rund 50 GW. Während des Wochenendes beträgt der maximale Stromverbrauch nur rund 60 GW und der minimale Stromverbrauch nur gut 40 GW. Während der Weihnachtsfeiertage

beträgt der maximale Stromverbrauch nur rund 45 GW und der minimale Stromverbrauch rund 35 GW. In allen Fällen liegt 2014 die Wind- und Photovoltaikstromproduktion deutlich darunter.

Die gezeigten extremen Fluktuationen der Wind- und Photovoltaikstromproduktion gefährden die Stabilität der Stromversorgung in Deutschland und müssen durch ausreichend Regel- und Reserveenergie jederzeit ausgeglichen werden können.

Ein Stromüberschuss resultiert potenziell, falls die installierte Kraftwerksleistung den Stromverbrauch übersteigt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ein Teil der Kraftwerke wegen Wartung oder Störfall nicht verfügbar ist und die erneuerbaren Kraftwerke häufig wegen örtlich niedrigerer Windgeschwindigkeit oder Sonneneinstrahlung nicht zeitgleich produzieren können.³⁶ Die Werte in Tab. 2.4 geben also obere Grenzen für den Stromüberschuss und untere Grenzen für das Stromdefizit an.

Tab. 2.4 : Maximaler Stromüberschuss durch konventionelle und erneuerbare Kraftwerke, 2015 bis 2035

Maximaler Stromüberschuss (+) bzw. Stromdefizit (-)	(1)	(2)	(3)
	2015	2025	2035
(1) Konventionelle Kraftwerke			
(1.1) Bei maximalem Stromverbrauch *	19%	-8%	-8%
(1.2) Bei durchschnittlichem Stromverbrauch	45%	20%	18%
(1.3) Bei minimalem Stromverbrauch	166%	109%	109%
(2) Erneuerbare Kraftwerke			
(2.1) Bei maximalem Stromverbrauch	16%	68%	115%
(2.2) Bei durchschnittlichem Stromverbrauch	42%	119%	176%
(2.3) Bei minimalem Stromverbrauch	161%	282%	389%
(3) Summe Kraftwerke			
(3.1) Bei maximalem Stromverbrauch	135%	160%	208%
(3.2) Bei durchschnittlichem Stromverbrauch	186%	239%	294%
(3.3) Bei minimalem Stromverbrauch	427%	491%	599%

Lesebeispiel zu Tab. 2.4, Z. (2.2), Sp. (1):
Im Jahr 2015 überstieg die installierte erneuerbare Kraftwerksleistung den maximalen momentanen Stromverbrauch um 42%. Falls also alle erneuerbaren Kraftwerke zeitgleich mit Nennleistung produzieren würden, könnte der durchschnittliche momentane Stromverbrauch vollständig durch erneuerbare Kraftwerke abgedeckt werden mit einem Stromüberschuss von 42%.

* Berechnungsbeispiel:
Tab. 2.4, Z. (1.1), Sp. (1) =
Tab. 1.2, Z. (1), Sp. (1) dividiert durch
Tab. 1.2, Z. (4.1), Sp. (1).
Negative Werte zeigen ein potenzielles Stromdefizit an.

Quelle: Tab. 1.2.

Ergebnis:

- Die installierte konventionelle Kraftwerksleistung überstieg in 2015 den durchschnittlichen Stromverbrauch um 45% (Tab. 2.4, Z. (1.2), Sp. (1)) und wird wegen der kontinuierlichen Stilllegung von konventionellen Kraftwerken in 2025 um 8% darunter liegen.
- Schon in 2015 überstieg die erneuerbare installierte Kraftwerksleistung den durchschnittlichen Stromverbrauch um 42% (Tab. 2.4, Z. (2.2), Sp. (1)), für 2025 sind 119% prognostiziert. Selbst wenn

die simultane Stromproduktion aller erneuerbaren Kraftwerke nur die Hälfte ihrer installierten Leistung erreicht, wird also schon vor 2025 der durchschnittliche momentane Stromverbrauch überschritten.

- 2015 überstieg die insgesamt installierte Kraftwerksleistung den durchschnittlichen Stromverbrauch um 186% (Tab. 2.4, Z. (3.2), Sp. (1)). Für 2025 wird ein Übersteigen um 239% prognostiziert.

Die erneuerbare Stromproduktion weist, wie gezeigt, starke Fluktuationen auf, die grundsätzlich zu Stromüberschüssen und Stromdefiziten führen. Erwartete Stromüberschüsse und Stromdefizite müssen sofort ausgeglichen werden, sonst bricht die Stromversorgung zusammen. Wie dieser Ausgleich funktionieren könnte, wird im folgenden Kapitel beschrieben.