

L. Jarass | G. M. Obermair

# Welchen **Netzumbau** erfordert die **Energiewende?**



mit **Netzentwicklungsplan 2012**



MV-Verlag, Münster, 2012  
280 S., 21 €  
ISBN 978-3-86991-641-5

# Welchen Netzbau erfordert die Energiewende?

unter Berücksichtigung des Netzentwicklungsplans 2012

Energiewende – eine Einführung.....	15
Teil I : Änderung der Stromversorgung durch die Energiewende .....	21
1 Struktur und Entwicklung der Stromversorgung.....	22
2 Erneuerbare Energieträger: räumliche und zeitliche Verteilung des Angebots .....	42
Teil II : Grundlagen des Netzbaus .....	58
3 Zuverlässige Stromversorgung bei hohen Anteilen stark fluktuierender erneuerbarer Erzeugung.....	59
4 Repowering bestehender Leitungen .....	95
5 Leitungsneubau durch Erdkabel statt Freileitung .....	117
Teil III : Optimierung des Netzbaus .....	138
6 Netzbau: nicht zu viel und nicht zu wenig.....	140
7 Maßnahmen zur Optimierung des Netzbaus.....	163
Teil IV : Realisierung des Netzbaus.....	196
8 Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz des Netzbaus.....	197
9 Überschätzung des Übertragungsbedarfs führt zu falschen gesetzlichen Vorgaben .....	218
10 Netzentwicklungsplan 2012.....	237

## 2 Erneuerbare Energieträger: räumliche und zeitliche Verteilung des Angebots

Schon in 2020 soll nach den offiziellen Planungen über die Hälfte der insgesamt installierten Kraftwerksleistung von fast 200 GW (vgl. die frühere Tab. 1.1, Z. 4) und über ein Viertel der gesamten Stromerzeugung von gut 560 GWh (vgl. die frühere Tab. 1.3, Z. 4) auf die stark fluktuierenden Energieträger Wind und Photovoltaik entfallen (vgl. die früheren Tab. 1.2 und 1.4).

Das natürliche Angebot von Wind und Sonnenschein ist auf der Input-Seite der Wind- und Photovoltaikkraftwerke vom Menschen nicht regelbar:

- Das Angebot weist – in unterschiedlichem Ausmaß – starke regelmäßige periodische, aber vor allem unregelmäßige Schwankungen auf, die nur für die nächsten Stunden mit hoher Zuverlässigkeit prognostiziert werden können; für längere Perioden wächst die Unsicherheit rasch an.
- Insbesondere längere 'Aussetzer', wie großflächige Flauten oder Schlechtwetterperioden, sind bestenfalls für einige Tage vorhersehbar.

Auch die geografische Verteilung der möglichen Erzeugung ist naturbedingt:

- Photovoltaische Anlagen sind eher in den sonnenbegünstigten südlicheren und östlicheren Regionen Deutschlands wirtschaftlich zu betreiben.
- Windenergieanlagen sind besonders gut in den Küstenregionen von Nord- und Ostsee sowie offshore zu betreiben. Sollte der Ausbau der Windenergie zukünftig auch in den Mittelgebirgen und auf Kuppen im Binnenland mit Großanlagen auf sehr hohen Türmen (über 135 m) erfolgen, so wie es die süddeutschen Landesregierungen in 2011 angekündigt haben, so wird sich das Schwergewicht der Windenergieeinspeisung von den Küstenregionen wegverlagern.

Die aus den genannten natürlichen Bedingungen sich ergebenden Anforderungen an das zukünftige Stromversorgungssystem bilden das Hauptthema in den späteren Kapiteln dieses Buches. Hier sollen zunächst die wichtigsten Fakten über die Erzeugung elektrischer Energie aus Wind und aus direkter Sonneneinstrahlung sowie aus Biomasse und Fließwasser-Kraftwerken erläutert werden unter besonderer Berücksichtigung ihrer jeweiligen raum-zeitlichen Struktur.

Die räumliche und zeitliche Verteilung von Windenergie erfordert die Übertragung des Windstroms per Hochspannungsleitung zum Höchstspannungsnetz, das wiederum die großräumige Übertragung in weiter entfernte Regionen sicherstellt.

Die räumliche und zeitliche Verteilung von Sonnenenergie hingegen erfordert die Übertragung des Solarstroms per Niederspannungsnetz (für Dachflächenanlagen) bzw. Mittelspannungsnetz (für Freiflächenanlagen, aber auch für Biogaskraftwerke) und ggf. anschließend die regionale Übertragung ins Hochspannungsnetz.

## 2.1 Windenergie

Wie fast alle auf der Erde verfügbaren Energieformen ist auch Windenergie eine abgeleitete Form von Sonnenenergie. Die unterschiedliche Erwärmung der Erdatmosphäre durch die Einstrahlung der Sonne auf verschiedene Gebiete der Erdoberfläche führt zu Dichte- und Druckunterschieden, die in fluktuierenden Luftströmungen auf allen Längen- und Zeitskalen von Metern bis zu Tausenden von Kilometern und von Sekunden bis zu Wochen und Monaten ihren Ausgleich suchen.

Die Einstrahlung von Sonnenenergie erwärmt die Erdoberfläche und die darüber liegenden Luftschichten am stärksten in der Äquatorzone, am wenigsten nahe den Polen; außerdem werden die großen Kontinentalflächen v.a. bei Tag in der warmen Jahreszeit stärker erwärmt als die Ozeane (siehe zum Folgenden [Jarass/Obermair/Voigt 2009, Kap. 2.1]). In der Äquatorzone steigt die warme und deshalb relativ leichtere Luft bis in große Höhen (10 km und mehr) und strömt dort (also am unteren Rand der Stratosphäre) beiderseits des Äquators jeweils zu den Polen. In dem so entstehenden Gürtel tiefen Luftdrucks am Äquator strömt aus den bodennahen Schichten kühlere Luft aus den mittleren Breiten nach. Diese nur in größerer Höhe sich frei ausbildende Strömung wird durch die innere Reibung der Luft und die Ausbildung von Wirbeln nach unten hin immer stärker gebremst und erreicht direkt an der Erd- bzw. Wasseroberfläche die Geschwindigkeit Null.

Das erste und einfachste Kriterium für die Qualität eines Standorts für Windturbinen ist die über ein 'typisches Jahr' gemittelte Windgeschwindigkeit in Höhe der Turbinenachse, für die neuen großen Anlagen mit installierten Leistungen zwischen 2 MW und 5 MW also in deren Turmhöhen von 80 m bis 140 m. Diese Jahresmittel liegen in Deutschland bei 6 m/s bis 7 m/s für gute Binnenstandorte, nahe der Nordsee bei gut 8 m/s und über 9 m/s offshore.

Das physikalische Leistungsangebot des Windes steigt mit der dritten Potenz der momentanen Windgeschwindigkeit am Punkt der Messung. Der Aerodynamiker Betz konnte schon 1926 zeigen, dass eine ideale, technisch perfekte Windturbine – unter Vernachlässigung von Luftreibung und Verlusten durch Ablösung turbulenter Luftwirbel – 59,25% dieses Windleistungsangebots in mechanische Leistung der Turbinenwelle umsetzen kann. Tatsächlich läuft eine große Windenergieanlage aber erst bei 3 m/s bis 5 m/s an, erreicht dann Nennleistung bei 12 m/s bis 14 m/s und wird bei etwa 25 m/s sturmabgeschaltet. Von den besten heutigen Anlagen wird immerhin eine elektrische Leistung am Generatorausgang von vier Fünftel des theoretischen Höchstwertes erreicht, also knapp die Hälfte ( $=4/5 \cdot 59,25\%$ ) des physikalischen Leistungsangebotes des Windes in elektrische Leistung umgewandelt.

Der tatsächliche Jahresenergieertrag an einem Standort steigt wegen der genannten Begrenzung durch die Generatornennleistung nur etwa mit dem Quadrat des dort gegebenen Jahresmittelwerts der Windgeschwindigkeit. Optimierung des Energieertrags und Vermeidung von Überlastung werden bei großen Anlagen durch eine der jeweili-

gen Windgeschwindigkeit entsprechende Einstellung des Anstellwinkels der Rotorblätter erreicht.

### 2.1.1 Reguläre und chaotische Strömung

Ohne die Effekte der Erdrotation würde sich aufgrund von 'Heizung' am Äquator und 'Kühlung' an den Polen auf beiden Halbkugeln ein verhältnismäßig einfaches globales Bild einer typischen Konvektionsströmung ergeben: 'Unten', d.h. in den ersten Kilometern über der festen Oberfläche (Troposphäre), fließt sie von höheren Breiten zum Äquator, dort steigt die erwärmte Luft auf und fließt 'oben', d.h. oberhalb gut 10 km (Stratosphäre), zurück zu höheren Breiten und den Polen, wo die abgekühlte Luft wieder nach unten sinkt.

Durch die Erdrotation, die geografische Verteilung von Ozeanen und Kontinenten und die davon bestimmten Klimazonen und großräumigen Wettergebiete wird dieses einfache reguläre, d.h. zeitlich stationäre Strömungsbild, wesentlich verändert: Die globalen Strömungen werden nun irregulär, zeitlich nicht stationär und zerfallen in regionale und lokale Wirbel – chaotische Bewegung im Wortsinn der Theorie des deterministischen Chaos. Dies kommt so zustande:

Die durch die Drehung von West nach Ost bedingte momentane lineare Geschwindigkeit von festen Punkten auf der Erdoberfläche ist am Äquator (ca. 40.000 km in 24 h) am größten (1.667 km/h) und fällt bis zu den Polen mit wachsendem geografischen Breitengrad  $\varphi$  wie  $\cos \varphi$  auf Null ab.

Ein Luftvolumen, das sich, sagen wir von den Kanarischen Inseln auf ca. 30° nördlicher Breite zum Äquator 'angesaugt' genau nach Süden hin in Bewegung setzt, ist weiter südlich zu langsam gegenüber der dort höheren West-Ost-Drehgeschwindigkeit eines Punktes auf der festen Erdoberfläche. Das genannte Luftvolumen kommt dieser schnelleren Bewegung der festen Erdoberfläche als Gegenwind von Nordosten her entgegen – eine einfache Erklärung für die zwischen 30° nördlicher Breite und 30° südlicher Breite das ganze Jahr über wehenden sehr stetigen kräftigen Passat-Winde: Nordost-Passat nördlich, Südost-Passat südlich des Äquators.

Eine mathematische Beschreibung der Strömungen in einem rotierenden Bezugssystem zeigt Kasten 2.1.

Weiter entfernt vom Äquator werden die Windverhältnisse dann noch komplexer, indem sie zusätzlich von der Verteilung von Kontinenten und Ozeanen und vom regionalen Klima und Wetter bestimmt werden. Auf der nördlichen Halbkugel folgt auf den subtropischen Schönwettergürtel die 'gemäßigte Zone' mit im Bereich des Atlantiks überwiegenden, wenn auch stark schwankenden Westwinden. Für Europa bestimmend sind nämlich die Druckverhältnisse über dem östlichen Atlantik, wo das Druckgefälle nun nicht mehr zum Äquator hin verläuft, sondern von dem typischen kanarischen Hoch zum Islandtief, also – anders als im Passat-Gürtel – von Süden nach

Norden. Luftmassen werden hier also zu höheren geografischen Breiten transportiert, wo ihre mitgebrachte West-Ost-Geschwindigkeit höher ist als die von Punkten der Erdoberfläche – sie wehen diesen Punkten also von Westen her entgegen; so entstehen bei den genannten typischen Lagen von Hochdruck- und Tiefdruckgebieten die überwiegenden Westwinde im nördlichen Europa.

**Kasten 2.1 : Mathematische Beschreibung der Strömungen  
in einem rotierenden Bezugssystem**

Zur mathematischen Beschreibung der Strömungen in einem rotierenden Bezugssystem wird neben den Druckkräften die oben beschriebene Wirkung der Rotation der Erde als 'Scheinkraft' eingeführt unter der Bezeichnung Corioliskraft. Das Zusammenwirken dieser Kräfte in den physikalischen Gesetzen von Aerodynamik und Thermodynamik ergibt äußerst komplexe Bewegungsgleichungen für die Luftströmungen. Aus diesen werden für die globalen Bewegungen mit entsprechenden Vereinfachungen die mathematischen Klimamodelle hergeleitet (vgl. Kasten 2.2). Für den einfachsten Fall einer regionalen Strömung (bei zeitlich konstantem, linearem und großräumigem Luftdruckgefälle) ergibt sich als Lösung der Bewegungsgleichung der so genannte geostrophische Wind, der sich in der Tat unter solchen Umständen ausbildet, allerdings erst oberhalb der von Bodenrauigkeit gestörten untersten Luftschicht, also viele Hunderte bis etwa tausend Meter über dem Meer oder über flachen Ebenen. Wenn sich nämlich das Gleichgewicht zwischen der Nord-Süd-Komponente der Druckkraft und der Corioliskraft eingestellt hat, strömt die Luft nicht etwa parallel zum Druckgefälle, sondern quer dazu, also annähernd parallel zu den Isobaren, den Linien konstanten Luftdrucks, außer dort, wo diese Linien exakt nord-südlich verlaufen. Dieser zeitlich sehr gleichmäßige geostrophische Wind kann in großer Höhe Geschwindigkeiten von über 50 m/s erreichen. Die Tendenz zu sehr hohen Türmen (deutlich über 100 m) für neue große Windenergieanlagen entspringt dem Bestreben, diesem nach Richtung wie nach Stärke stetigeren Luftstrom näherzukommen, um so eine hohe, gleichmäßige Energieausbeute zu erzielen.

Quelle: basierend auf [Jarass/Obermair/Voigt 2009, Kasten 2.1].

Dies ist ein Ergebnis der 'Trägheit der Bewegung': Jeder Körper, auch ein Luftvolumen, behält seine Geschwindigkeit nach Richtung und Größe bei, solange nicht eine reale physische Kraft auf ihn einwirkt. Insgesamt ergibt sich als Folge dieser Trägheit auf der nördlichen Halbkugel stets eine Ablenkung nach rechts, sodass Hochdruckgebiete, von denen Luft abströmt, im Wesentlichen von einem Wirbel im Uhrzeigersinn umströmt werden, Tiefdruckgebiete aber gegen den Uhrzeigersinn; auf der Südhalbkugel jeweils umgekehrt. Diese sehr großräumigen Wirbel, Tausende von Kilometern im Durchmesser, sind instabil gegenüber der Abspaltung von kleineren Wirbeln, die nach Westen driften und als 'Tief' oder als 'Sturmtief' häufig das Wetter in Westeuropa bestimmen, wobei sie selbst wiederum in immer kleinere instabile turbulente Strömungen zerfallen und damit eine präzise kleinräumige Wetter- und Windvorhersage sehr erschweren.

Wie schon erwähnt, wird der Wind in der erdnahen Grenzschicht oder Peplosphäre – den unteren 1,5 km bis 2 km der Erdatmosphäre – durch die Bodenreibung gebremst.

Hier weht er nicht parallel zu den Isobaren, sondern eher in Richtung zum tieferen Luftdruck, wodurch sich die Tiefdruckgebiete nach einigen Tagen auffüllen. Die Ablenkung des Windes wird dabei zum Boden hin stärker, die Bewegung nimmt – von oben gesehen – die Form einer Spirale an ('Ekman-Spirale').

### Kasten 2.2 : Klimamodelle und Chaostheorie

Aus der Kombination der Formeln für die Druck- und für die Scheinkräfte und für ihre Wirkung auf das globale Strömungssystem entstehen die mathematischen Klimamodelle. Das einfachste Klimamodell, das die globale Strömung mit der notwendigen Mindestzahl von nur drei zeitabhängigen Variablen beschreibt, wurde von dem amerikanischen Physiker Edward N. Lorenz vor gut 40 Jahren per Computer durchgerechnet mit dem damals überraschenden Ergebnis, dass das System auf minimale Änderungen der Anfangsbedingungen nach einer simulierten Laufzeit von wenigen Tagen mit einem gänzlich verschiedenen zeitlichen Verlauf reagiert. Dies war die Entdeckung der 'sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen'.

Ein Wissenschaftsjournalist hat die Tragweite dieser Entdeckung des drastischen Einflusses winziger Veränderungen mit dem Bild des 'Schmetterlingeffekts' zu verdeutlichen versucht: Es könnte 'eines Falters Flügelwehen' an einem Punkt der Erde darüber entscheiden, ob Tage später in einem anderen Kontinent ein großer Wirbelsturm eintritt oder nicht.

Der große französische Mathematiker, Astronom und Wissenschaftstheoretiker Henri Poincaré (1854-1912), also fünf Jahre vor Edward Lorenz' Geburt gestorben, hat in seiner genialen, dreibändigen „*Himmelsmechanik*“ (über die Planetenbewegung) bereits 1892 wesentliche Elemente der Chaostheorie vorweggenommen, doch wurde dieser Teil seiner Arbeiten eigentlich erst nach 1960 (wieder-)entdeckt. Er ist also ein Vorläufer, aber kein Mitbegründer der Chaosforschung. Während Lorenz zur Berechnung seines Attraktors ein Großrechner zur Verfügung stand, benutzte Poincaré alle analytisch-theoretischen Methoden der Mathematik und Physik. Zu seiner Zeit Ende des 19. Jahrhunderts verstand die Bedeutung und Reichweite seiner Theorie wohl kaum jemand, 1925 einige wenige (Birkhoff-Poincaré-Theorem), heute ist seine Theorie und ihre Weiterentwicklung Gegenstand von Oberseminaren, die eine Elite von Studenten besuchen; sie werden anschließend entweder verrückt oder Mathematik-Professoren.

Das Lorenz-Modell gilt als Musterbeispiel für deterministisches Chaos. Dies weist auf ein wichtiges praktisches Problem für die Nutzung der Windenergie hin: Eine zuverlässige Voraussage der Windverhältnisse an einem bestimmten Ort in Europa ist selbst bei Vorliegen aktueller Messwerte von vielen Wetterstationen nur für Stunden, bestenfalls für ein bis zwei Tage möglich.

Quelle: [Jarass/Obermair/Voigt 2009, Kasten 2.2].

Für die Windenergienutzung ist die Zunahme der an einem bestimmten Standort zu erwartenden Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Erdboden entscheidend. Für diese Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit von der Höhe gibt es physikalische Modelle unterschiedlicher Komplexität, in die u.a. die Topografie des Standorts, die Bodenrauigkeit der Umgebung und die typische atmosphärische Temperaturschichtung eingehen. Für die Windenergienutzung zu bevorzugende Standorte sind offensichtlich Standorte geringer Bodenrauigkeit, also im Meer oder unmittelbar an einer flachen Küste, große, wenig bewaldete Ebenen im Flachland, in gewissem

Maß auch Hügel- oder Bergkuppen und Gebirgspässe, bei deren Über- oder Durchströmen die Luftbewegung beschleunigt wird.

Einerseits nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, gleichzeitig nimmt die mittlere Stärke der turbulenten Schwankungen ab. Daher – und von der wachsenden Knappheit sehr guter Standorte in Deutschland – rührt die Tendenz der letzten Jahre, Anlagen mit immer höheren Türmen zu errichten. Doch sind auch bei solchen Anlagen mit Turmhöhen von gut 100 m und mehr noch starke turbulente Schwankungen von Stärke und Richtung des Windes im Minutenbereich die Regel. Die von der Windturbulenz herrührenden mechanischen Dauerwechselbelastungen der Anlagen sind der Lebensdauer der betroffenen Bauteile abträglich. Die durch die starken turbulenten Windschwankungen bewirkten Leistungsschwankungen der einzelnen Windenergieanlagen im Minuten- und Stundenbereich werden allerdings durch das Zusammenschalten der Anlagen eines größeren Windparks weitgehend ausgeglichen. Im Gegensatz dazu sind die Schwankungen im Bereich von vielen Stunden oder gar Tagen raum-zeitlich wenig korreliert und können deshalb selbst durch das großräumige Zusammenschalten von Windparks in großen Regionen nur teilweise ausgeglichen werden. Insbesondere gibt es in mittleren geografischen Breiten immer wieder ausgeprägte längere großräumige Windflauten, während derer auch die Summe der Energieproduktion aller Anlagen in Westeuropa auf sehr niedrige Werte sinken kann.

### **2.1.2 Mittelfristig kaum prognostizierbare Windschwankungen und Aussetzer**

Die Bewegungsenergie der Luftmassen, genannt Wind, wird mittels der – heute meist dreiflüglig gebauten – Windturbine auf die Achse des Stromgenerators übertragen. Die vielen technischen Einzelheiten, die dazu führen, dass schließlich das gewünschte Produkt, nämlich Drehstrom mit einer Frequenz von 50 Hz und einer konstanten Spannung von z.B. 10 kV ins Netz eingespeist werden kann, findet man in der Literatur [Heuck/Dettmann/Schulz 2010; Jarass/Obermair/Voigt 2009, Kap. 2.2; Kaltschmitt 2006, Kap. 6; Heier 2009; Gasch/Twele 2005; Sathyajith 2006].

Bei der Umsetzung der Energie der bewegten Luft in elektrische Energie erreichen die modernen großen Anlagen im Bereich der Auslegungswindgeschwindigkeit, also bei etwa 30 km/h bis 40 km/h, einen Gesamtwirkungsgrad von fast 50%, also nahezu den theoretischen Grenzwert von 59,25% [Jarass/Obermair/Voigt 2009, Kap. 2.2.1]; D.h. die Hälfte der Bewegungsenergie der Luft, die durch die von den Rotorflächen beschriebene Kreisfläche strömt, kann in Form von elektrischer Energie ins Netz eingespeist werden. Damit folgt aber auch der Zeitverlauf der erzeugten elektrischen Energie den turbulenten Schwankungen der Windgeschwindigkeit. Die Schwankungen im Sekunden- und Minutenbereich werden allerdings durch den Schwungradeneffekt der großen Turbine vergleichmäßig, das Zusammenschalten vieler Turbinen in einem Windpark und vieler Windparks in einer Regelzone mit 100-km-Ausmaß sorgt für einen gewissen Ausgleich der Fluktuationen im Bereich bis zu einigen Stunden.

Der Vergleich der oberen und der unteren Teilabbildung in Abb. 2.1 zeigt deutlich diesen Effekt zum Abbau der Extreme. Doch zeigt der Verlauf der Stromspeisung aus einer Windparkgruppe am 23. Dezember auch, dass innerhalb eines Tages die Produktion elektrischer Energie innerhalb von 14 Stunden von Mitternacht bis 14:00 Uhr um einen Faktor 9 ansteigen und in den folgenden sechs Stunden wieder um einen Faktor 6 abfallen kann.

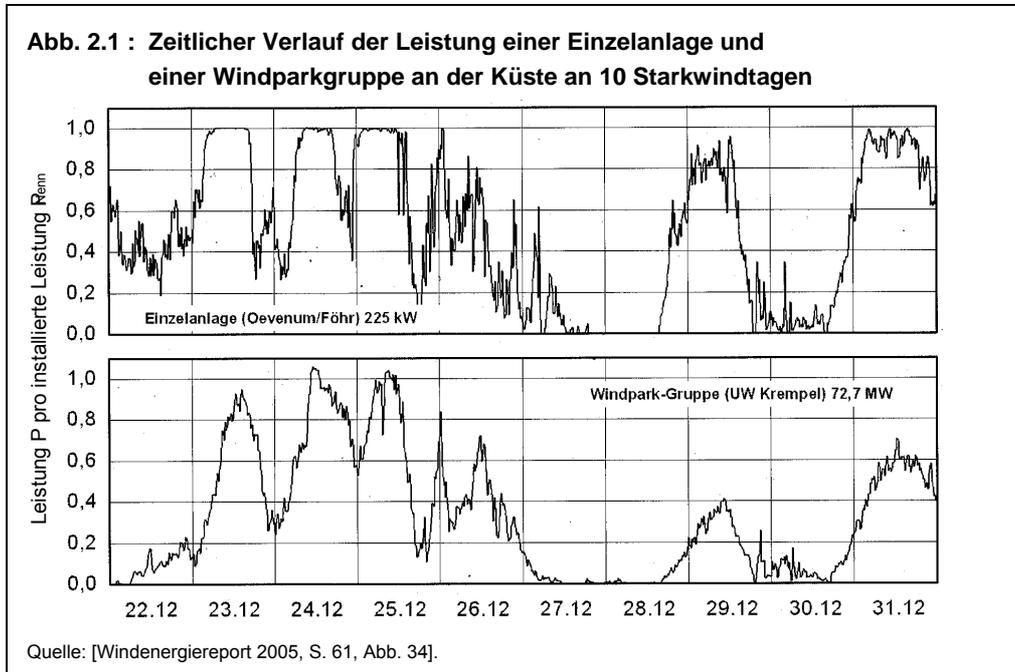


Abb. 2.2 zeigt die langfristige Variation der Windenergieerzeugung in Deutschland von 1993 bis 2011, also über einen Zeitraum von acht Jahren: Die Gesamtspeisung kann in guten Windjahren (z.B. 2007) um ein Viertel höher liegen als in windarmen Jahren (z.B. in 2009).

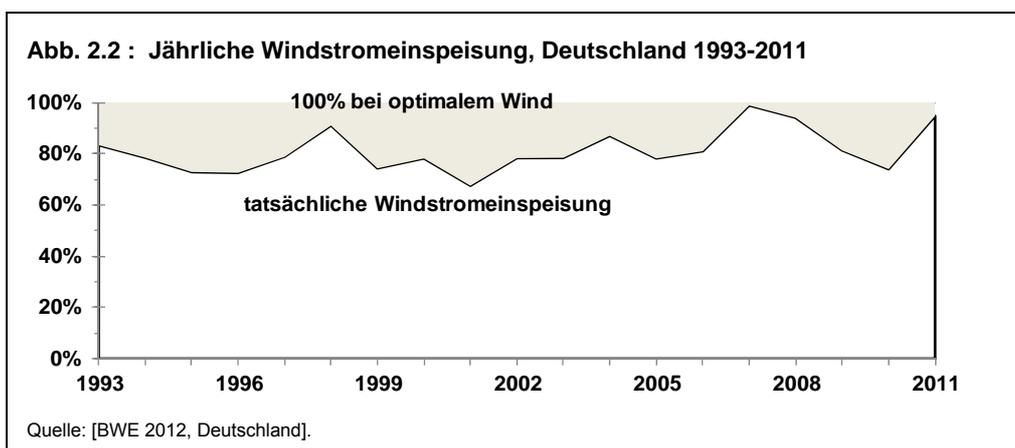
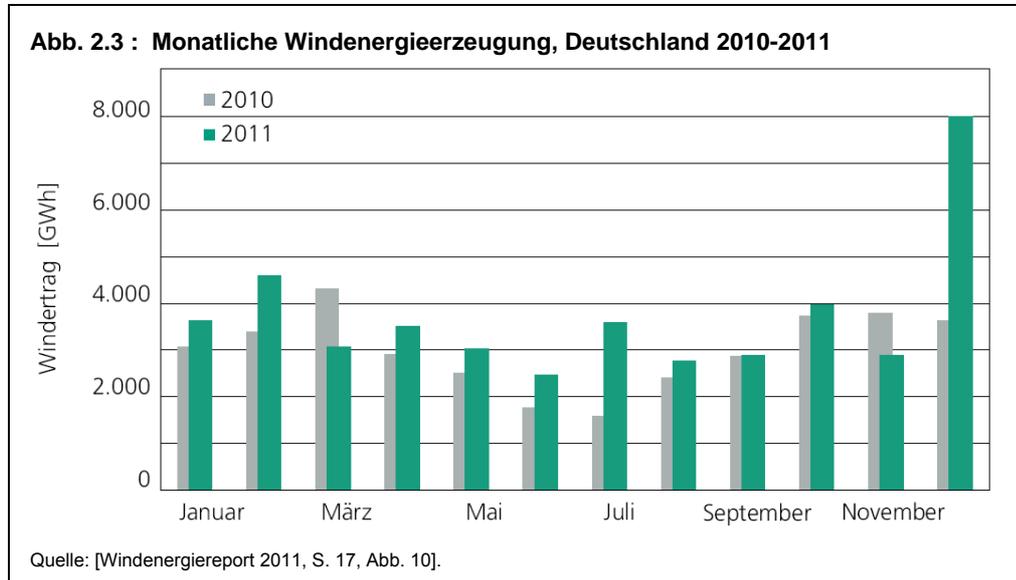


Abb. 2.3 zeigt die monatliche Erzeugung von Onshore-Windenergie (exklusive Direktvermarktung). Sie ändert sich in großen Sprüngen von Monat zu Monat und von Vorjahresmonat zu aktuellem Monat. In den Wintermonaten Oktober bis März ist die Windstromproduktion im Mittel pro Monat etwa doppelt so hoch wie von April bis September. Zudem kann die Stromproduktion in einem gegebenen Monat in einem Jahr doppelt so hoch ausfallen wie im Vorjahr, vgl. Dezember 2011 zu Dezember 2010.



Aber auch von Stunde zu Stunde und Tag zu Tag sind die Sprünge der Windstromeinspeisung erschreckend groß, selbst wenn man rechnerisch die Stromeinspeisung aller in Deutschland einspeisenden Windkraftwerke aufsummiert und somit über einen weiten geografischen Bereich von der Nord- und Ostseeküste bis zu den deutschen Mittelgebirgen mittelt. Abb. 2.4 zeigt die durchschnittliche tägliche EEG-Windenergieerzeugung (durchgezogene Linie) sowie die Tagesminima und Tagesmaxima der 1/4-Stunden-Einspeiseleistung (senkrechte Stäbe) für Deutschland. Man sieht wie stark sich von Tag zu Tag der Tagesmittelwert der Leistung innerhalb eines Monats ändert, etwa vom 23. Dezember bis zum 26. Dezember 2009 von 3 GW auf 13 GW. Zudem ist dieser schon sehr großen Variation die Fluktuation der Viertelstundenmittelwerte innerhalb eines Tages – in Abb. 2.4 als senkrechte Stäbe eingezeichnet – überlagert, so dass etwa am 24. Dezember 2009 Werte zwischen 5 GW und 20 GW erreicht wurden.

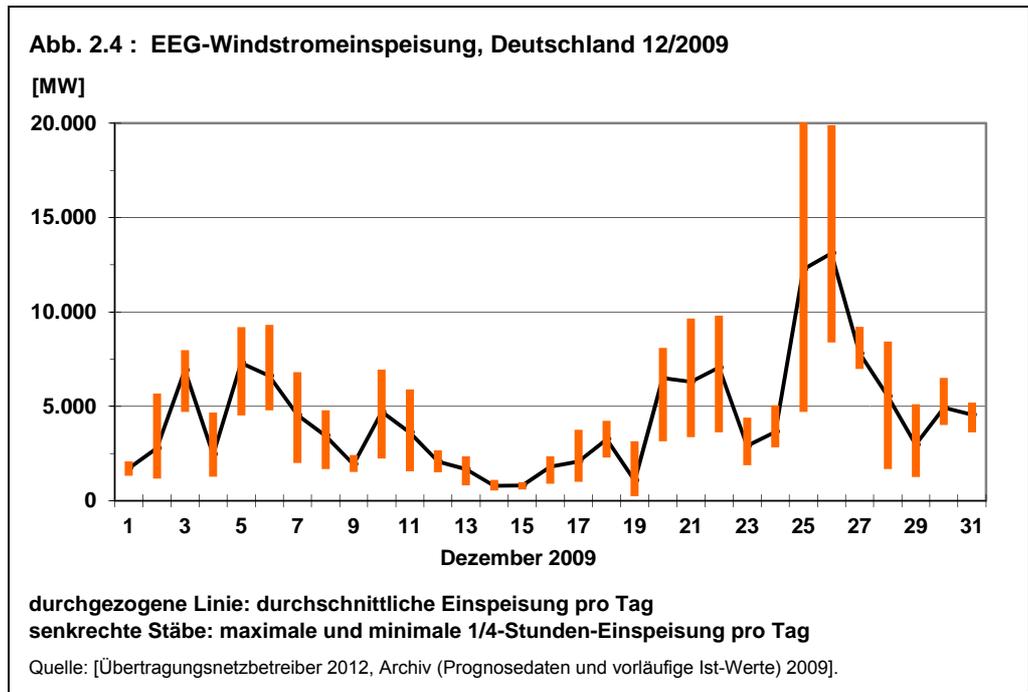
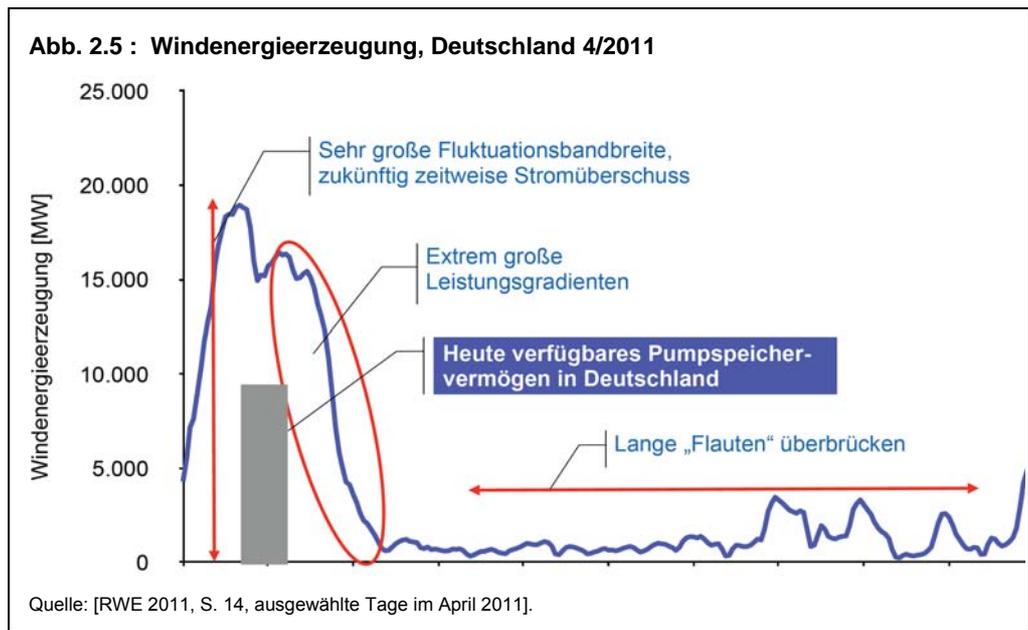


Abb. 2.5 gibt einen Eindruck über die große Fluktuationsbreite der Windenergie: innerhalb von zwei Tagen Anstieg von 5.000 MW auf fast 20.000 MW, dann schneller Abfall auf rund 1.000 MW, wobei diese deutschlandweite Flaute mehrere Tage anhält.



Wenn in zehn Jahren mehrere große Offshore-Windparks und in Süddeutschland viele Anlagen mit Turmhöhen über 130 m dazugeschaltet sind, so werden die Sprünge

voraussichtlich etwas kleiner und etwas seltener eintreten. Doch auch in Zukunft müssen in erheblichem Umfang Ersatz- und Reserveleistung ohne längerfristige Vorwarnung im Stundentakt zugeschaltet oder weggeregelt werden können.

Abb. 2.6 zeigt einen typischen Zeitverlauf mit einer anderen zeitlichen Spreizung, nämlich die Stundenmittelwerte während acht Tagen: Trotz der künstlichen Glättung durch das Aufsummieren der Leistung aller deutschen Windenergieanlagen, ergeben sich in diesem Beispiel Anstiege von rund 5.000 MW auf über 20.000 MW innerhalb von zwölf Stunden und vergleichbare Abstürze.



Wie gezeigt, weist die Windenergie erhebliche Schwankungen auf, die nicht prognostizierbar sind:

- von Jahr zu Jahr ( $\pm 20\%$ );
- von Vorjahresmonat zu aktuellem Monat, z.B. mehr als Verdoppelung von Dezember 2010 zu Dezember 2011 (vgl. die frühere Abb. 2.3);
- von Winter zu Sommer, etwa das Doppelte im Winter (vgl. die frühere Abb. 2.3);
- von Monat zu Monat, typischerweise  $\pm 30\%$ , im Extremfall über 100% (vgl. Dezember 2011 zu November 2011 in der früheren Abb. 2.3) [Diwok 2007];
- von Tag zu Tag, z.B. von fast 0 GW auf 22 GW innerhalb eines Tages, also rund 80% der insgesamt installierten Windleistung (vgl. Abb. 2.6).

Dies wirft erhebliche Probleme auf, da Windenergie bereits in 2030 mit 68 GW fast ein Drittel der insgesamt installierten Leistung von 208 GW haben soll (vgl. die früheren Tab. 1.2 und 1.1). Die starken Windenergieschwankungen von Jahr zu Jahr müssen geeignet ausgeglichen werden (vgl. das spätere Kap. 3.4). Das gesamte Ausgleichs- und Reservesystem muss deshalb geeignet umgebaut werden.

## 2.2 Sonnenenergie

### 2.2.1 Nutzungsformen der Sonnenenergie

Gartentechnisch wurde die Sonnenenergie schon von unseren Großeltern in Mistbeeten, Glashäusern und Wintergärten genutzt. Die Nutzung der Sonnenenergie durch Photosynthese zur Gewinnung von Biomasse ist Grundlage der Stromerzeugung durch Biogasanlagen und Nutzung von biogenem Abfall. Dadurch wurde bereits 2010 ein Drittel der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitgestellt (vgl. die frühere Tab. 1.4, Z. 5a), etwa genauso viel wie durch Windenergie und dreimal so viel wie durch Photovoltaik. In 2050 soll durch Biomasse fast soviel Strom wie durch Photovoltaik erzeugt werden. Der entscheidende Vorteil der Verstromung von Biomasse ist die Möglichkeit des weitgehend nachfrageorientierten zeitlichen Einsatzes zur Stromerzeugung.

Niedertemperatur-Wärmegewinnung durch Sonnenkollektoren etwa für Warmwasserversorgung oder Heizungsunterstützung kann gerade in sonnenreichen Gegenden der Welt wesentlich zur Reduzierung des Gas- oder Ölverbrauchs, aber auch des Stromverbrauchs beitragen, weil dadurch der Stromverbrauch in Boilern etc. seit Längerem stark vermindert werden kann.

Für die Stromerzeugung aus Sonnenenergie stehen zwei Wege zur Verfügung:

- photovoltaische Anlagen und
- solarthermische Kraftwerke.

Solarthermische Kraftwerke bündeln durch Spiegel das Sonnenlicht und lenken es auf einen Fokus, wodurch z.B. ein geeignetes Öl auf viele Hundert °C erhitzt und schließlich ein herkömmliches Wärmekraftwerk damit betrieben wird. Der entscheidende Vorteil dieses Solarkraftwerks ist die Möglichkeit, das erhitzte Öl fast verlustfrei für einige Stunden oder gar Tage zu speichern und so einen weitgehend nachfragebestimmten Betrieb zu gewährleisten. Leider sind diese Kraftwerke auch in sehr sonnengünstigen Lagen bisher nicht über das Stadium einiger Demonstrationsanlagen hinausgekommen. Solarthermische Kraftwerke können nur finanziert und installiert werden von großen Unternehmen mit entsprechenden technischen Kenntnissen. Die SIEMENS AG wollte diesen Kraftwerkstyp weiterentwickeln und hatte hierzu 2009 die israelische Entwicklungsfirma Solel gekauft. Die amerikanische Regierung hatte Unterstützung für große Projekte im südlichen Kalifornien zugesagt, z.B. der 2011 insolvent gewordenen Erlanger Solar Millennium. Nicht zuletzt wegen der rasanten Kostensenkung bei der mit solarthermischen Kraftwerken konkurrierenden Photovoltaik wurden all diese Projekte und Entwicklungen aufgegeben. Vielleicht kommt eine erneute Entwicklung zustande, sobald, wie erwartet, immer häufiger die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien die momentane Nachfrage übersteigt und dann die Speichermöglichkeiten bei solarthermischen Kraftwerken stärker zum Tragen kommen.

Stromerzeugung durch Photovoltaik kann sowohl dezentral mit typischen installierten Leistungen von einigen Kilowatt bis einigen Dutzend Kilowatt in vielen kleinen Anlagen auf Hausdächern finanziert und realisiert werden als auch großtechnisch durch Freiflächenanlagen mit installierten Leistungen von typischerweise 10 MW bis 100 MW. Der Anteil der Photovoltaik an der gesamten installierten Leistung aller erneuerbarer Energieträger betrug schon in 2010 rund ein Drittel und soll bis 2020 auf fast die Hälfte steigen (vgl. die frühere Tab. 1.2, Z. 3a), während – wegen der Kürze der mittäglichen Stunden hoher Einstrahlung und Energieausbeute (vgl. die spätere Abb. 2.8) – der Anteil an der Stromerzeugung in 2010 nur ein Zehntel und selbst in 2020 nur ein Fünftel beträgt (vgl. die frühere Tab. 1.4, Z. 3a).

## 2.2.2 Photovoltaik

### (1) Technische Grundlagen der Photovoltaik

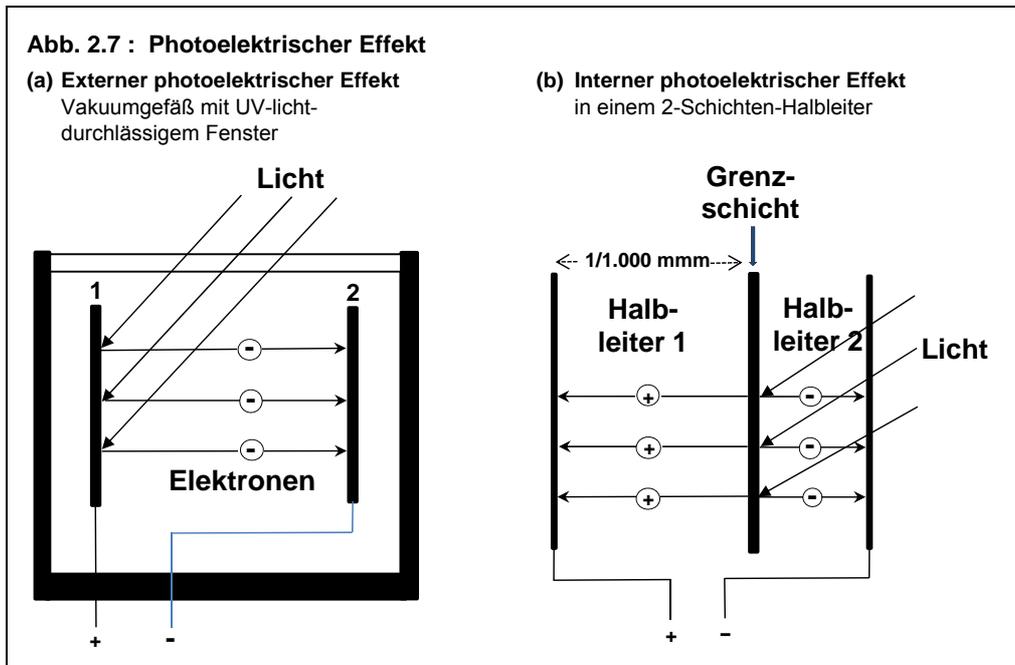
Der Physiker Albert Einstein hat 1905 als unbekannter 26jähriger Patentamtangestellter in Bern in einer kurzen wissenschaftlichen Veröffentlichung alle Einzelheiten des photoelektrischen Effekts erklären können (vgl. Kasten 2.3).

#### **Kasten 2.3 : Photoelektrischer Effekt**

Photovoltaik beruht auf dem seit Ende des 19. Jahrhunderts intensiv untersuchten photoelektrischen Effekt: Eine Metallplatte in einem Vakuumgefäß emittiert bei Bestrahlung mit Licht einen Strom von elektrisch negativ geladenen Elementarteilchen ('Elektronen'), deren Bewegung den elektrischen Strom auch in metallischen Leitern wie Kupfer- oder Aluminiumdrähten trägt. Die Metallplatte bleibt positiv geladen zurück. Damit haben wir schon den Prototyp der photovoltaischen Stromerzeugung (vgl. Abb. 2.7a):

Wird die Metallplatte 1 (am besten mit Cäsium o.Ä. beschichtet) mit Licht bestrahlt, so werden die vom Einfall der Lichtquanten aus der Metalloberfläche ins Vakuum herausgeschleuderten Elektronen von der Platte 2 aufgefangen, die dadurch negativ geladen wird. Zwischen den beiden Platten entsteht so eine Spannung von typischerweise etwas über 1 Volt.

Einstein erklärte den photoelektrischen Effekt mit der von Max Planck fünf Jahre zuvor schon angedeuteten Lichtquantenhypothese (vgl. Kasten 2.3): Die scheinbar kontinuierliche Lichtstrahlung besteht im Kleinsten aus Energiebündeln, die Quanten oder Photonen genannt werden. Diese übertragen, wenn sie von der Metallplatte 1 absorbiert werden (vgl. Abb. 2.7a), ihre Energie auf die dort gebundenen negativ geladenen Elektronen, die also mit dieser Energie aus der Platte 1 herausgeschleudert und von Platte 2 aufgefangen werden. Dadurch wird Platte 2 negativ aufgeladen, während Platte 1 positiv geladen zurückbleibt: photovoltaische Stromerzeugung. Der elektrische Strom, den diese Photozelle liefern kann, hängt von der Zahl der emittierten Elektronen ab, und diese Zahl wiederum ist proportional zur Intensität des eingestrahnten Lichts.



Einsteins geniale Lichtquanten-Arbeiten gaben den entscheidenden Anstoß zur Entwicklung der Quantenmechanik, die seither nahezu alle Bereiche der Physik, Chemie, Biologie und Physiologie beherrscht, die Kernenergie und die Atombombe hervorgebracht hat und mit der Entwicklung der Halbleitertechnik große Teile des Alltagslebens von Milliarden Menschen durchdringt. Auch die heutige Photovoltaik beruht auf einer Anwendung der Quantenmechanik und der Halbleitertechnik; zu beiden hat Einstein die Grundlagen gelegt.

Die Module der Photovoltaik benutzen 100 Jahre später auch den photoelektrischen Effekt, aber nicht den 'externen' (vgl. Abb. 2.7a), sondern einen 'internen' Effekt (vgl. Abb. 2.7b): Zwei in der Zusammensetzung leicht unterschiedliche dünne Halbleiterschichten sind durch eine extrem dünne elektrisch isolierende Grenzschicht separiert. Einfallende Lichtquanten erzeugen in der Nähe der Grenzschicht ein Ladungsträgerpaar, nämlich ein positives Teilchen, das in den Halbleiter 1 links von der Grenzschicht abwandert, und ein negatives Teilchen – wie ein Elektron in Abb. 2.7a – das in den Halbleiter 2 rechts von der Grenzschicht abwandert. So entsteht zwischen Halbleiter 1 und Halbleiter 2 eine elektrische Spannung von typischerweise ca. 1 Volt, die (wie in Abb. 2.7b gezeigt) mit zwei normalen Leitungen abgegriffen werden kann.

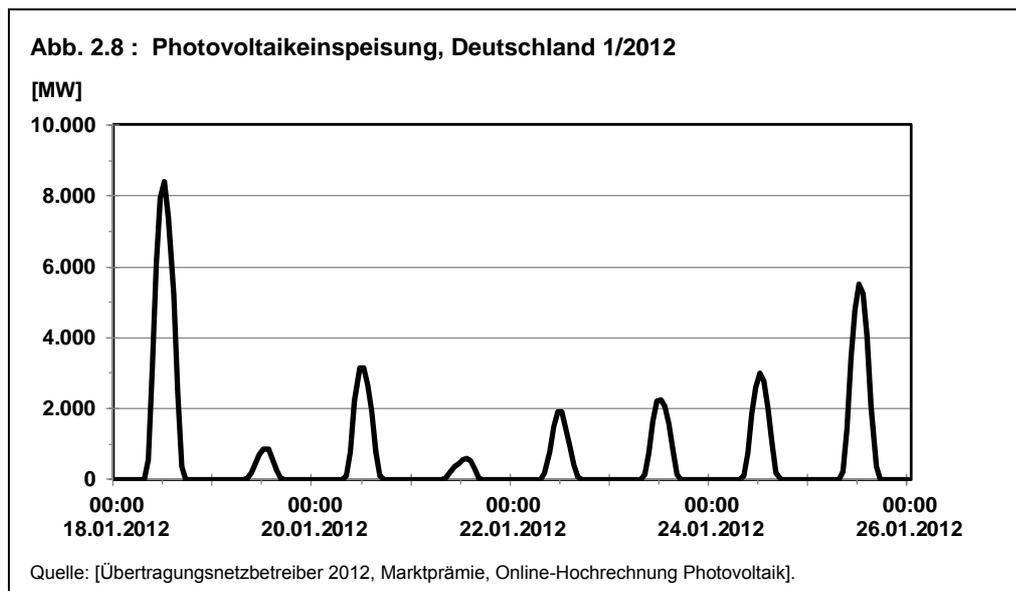
Der so erzeugte Strom hängt wie beim photoelektrischen Effekt (vgl. Abb. 2.7a) von der Zahl der von den Lichtquanten erzeugten entgegengesetzt geladenen Ladungsträgerpaaren ab, diese Zahl wiederum und damit die Stromerzeugung ist in etwa proportional zur Intensität des eingestrahnten Lichts.

## (2) Nutzung der Photovoltaik

In den großtechnisch hergestellten Modulen sind viele Einzelelemente parallel und hintereinander geschaltet. Der gewonnene Niederspannungsgleichstrom wird durch elektronische Wechselrichter in den üblichen 220/380-Volt-Drehstrom umgewandelt. Die besten heute verfügbaren photovoltaischen Module können bis zu 20% der senkrecht auffallenden Lichtenergie in elektrische Energie an den Klemmen des Moduls umwandeln.

Die Module werden schräg geneigt und so ausgerichtet, dass die Sonne zumindest in den mittäglichen Stunden der stärksten Einstrahlung annähernd senkrecht auf die Module fällt. Der Neigungswinkel zur Horizontalen sollte deshalb für die Sommermonate flacher und für die Wintermonate steiler eingestellt werden. Eine laufende Nachführung der Module an den momentanen Sonnenstand ('Solar-Tracker') ist mit bisher unverhältnismäßig hohem Aufwand für Mechanik verbunden, die zudem störanfällig ist.

Abb. 2.8 zeigt für einige Wintertage den rechnerisch ermittelten deutschlandweiten Summenertrag der Photovoltaikeinspeisung: Die höchste Mittagsspitze – eine Gesamtleistung von etwa 8 GW für etwa eine Stunde am 18. Januar 2012 – entsprach etwa einem Drittel der gesamten Photovoltaikennleistung von 25 GW, die zu diesem Zeitpunkt am Netz war, während im Sommer gelegentlich eine Mittagsspitze von bis zu vier Fünftel der gesamten installierten Photovoltaikleistung vorkommt.



Die Variation des Stromertrags von Photovoltaikanlagen während der (knapp 14) sommerlichen und (knapp 9) winterlichen Tageslichtstunden ist selbst bei durchgehend klarem Himmel enorm. Die Mittagsspitze ist so scharf, dass schon zwei Stunden vor

und zwei Stunden nach dem Sonnenhöchststand der Stromertrag nur noch etwa die Hälfte der Spitze beträgt. Dieser Tagesgang ist durch die Erdrotation unwandelbar festgelegt. Darüber hinaus aber gibt es, vor allem in der 'schlechten' Jahreszeit, nur schwer zuverlässig prognostizierbare wetterbedingte Unterschiede von Tag zu Tag, die auch durch das rechnerische Aufsummieren der Stromerträge aus einer größeren Region nicht ausgeglichen werden.

Wegen des massiven Zubaus von photovoltaischen Anlagen werden ab etwa 2020 die Leistungsspitzen ihrer Stromeinspeisung mindestens doppelt so hoch ausfallen wie in 2012. Bei einer dann installierten Gesamtleistung von über 50 GW Photovoltaik (vgl. die frühere Tab. 1.2, Z. 3) muss damit ein Ausgleich für die stark fluktuierende Stromeinspeisung in Höhe von 30 GW und mehr sichergestellt sein (vgl. das spätere Kap. 3.3). Schon am 25. Mai 2012 betrug diese Stromeinspeisung rund 22 GW bei einer insgesamt installierten Photovoltaikleistung von rund 27 GW.

Da die Fluktuation der Windstromeinspeisung schon heute ebenfalls eine Bandbreite von kaum über 0 GW bis über 20 GW innerhalb von 12 bis 24 Stunden durchlaufen kann (vgl. die frühere Abb. 2.4), zukünftig wohl je nach Zubau bis 40 GW und mehr, wird die Brisanz des Regel- und Ausgleichsproblems noch verschärft.

### **(3) Auswirkungen der Photovoltaik auf das Verteilungs- und Übertragungsnetz**

Was bedeutet die rapide Entwicklung der Photovoltaik für das Verteilungs- und Übertragungsnetz? Eine sommerliche Mittagsspitze mit einem Kilowatt Leistung kann je nach Lage und Aufstellung der Module von 7 m<sup>2</sup> bis 10 m<sup>2</sup> Modulfläche erbracht werden. Auf einem Hausdach werden also in der Spitze einige Kilowatt erzeugt, auf einem Scheunendach vielleicht zehn Kilowatt, die in der Regel noch ohne Überlastung in das vorhandene Niederspannungsnetz eingespeist werden können. Werden allerdings ganz in der Nähe eine Vielzahl von derartigen Anlagen installiert, so muss das Niederspannungsnetz verstärkt werden.

Eine größere auf freiem Feld aufgestellte Anlage mit vielen Tausend m<sup>2</sup> Modulfläche kann in der Spitze einige Hundert Kilowatt Leistung einspeisen, wofür eine Einspeisung in das Mittelspannungsnetz (10 kV bis 20 kV) erforderlich ist und, zumindest nach der Installation weiterer derartiger Anlagen, eine Weiterleitung bis zur nächsten 110kV-Hochspannungsleitung erforderlich werden kann. Dieses Mittelspannungsnetz wird bei der vorgesehenen Verdoppelung der installierten Photovoltaikleistung von 25 GW in 2012 auf 54 GW in 2020 (vgl. die frühere Tab. 1.2, Z. 3) ausgebaut werden müssen, insbesondere in sonnenbegünstigten, aber nicht sehr dicht besiedelten Gegenden. Dies kann vermutlich einvernehmlich zwischen Behörden und Bürgern mit den bewährten VPE-Erdkabeln realisiert werden.

Das 110kV-Hochspannungsnetz wird durch die regionale Einspeisung einer Vielzahl von kleineren Photovoltaikanlagen zumindest in Gegenden mit starker Stromnachfra-

ge und gut ausgebauter Netzinfrastruktur eher entlastet als belastet, da insbesondere zu Zeiten besonders hoher Nachfrage kein nennenswerter 'Stromimport' von außerhalb erforderlich ist.

Andererseits speisen sehr große Freiflächenanlagen mit einer Spitzenleistung von einigen Dutzend Megawatt im Regelfall in das 110kV-Hochspannungsnetz ein. Insbesondere wenn in der Region zugleich Windenergie ausgebaut wird, ist eine Erhöhung der Übertragungsleistung im 110kV-Hochspannungsnetz vielfach unabdingbar, im Regelfall vorzugsweise durch Netzoptimierung und Netzverstärkung bestehender Leitungen (vgl. das spätere Kap. 4).

### 2.3 Strom aus Biomasse, Wasserkraft und EE-Gas

Diese nach Energieträger und Technik gänzlich verschiedenen Energielieferanten gehören hinsichtlich Netz- und Kraftwerksstruktur in dieselbe Kategorie:

- Sie sind schnell und fast über den gesamten Bereich von 0% bis 100% der Nennleistung regelbar.
- Ihr Betriebsmittel, nämlich Biogas, Wasserkraft oder EE-Gas (also mittels erneuerbarem Strom produziertes Gas) ist grundsätzlich speicherbar, in jedem Fall über Stunden bis Tage; in das allgemeine Gasnetz eingespeistes Biogas oder EE-Gas kann dort als Teil der allgemeinen Erdgasreserve beliebig lange gespeichert werden.
- Die mögliche Stromproduktion ist für Zeiträume von Wochen bis Monate prognostizierbar.

Diese sehr gut regelbare und weitgehend zuverlässig zur Verfügung stehende Stromproduktion hat 2010 mit 54 TWh über die Hälfte des erneuerbaren Stroms geliefert (vgl. die frühere Tab. 1.4, Z. 4 und 5), bezogen auf die gesamte Stromproduktion von 622 TWh also fast ein Zehntel (vgl. die frühere Tab. 1.3, Z. 4), und soll ab 2030 über 70 TWh liefern, also rund ein Achtel der gesamten Stromproduktion. Dabei soll der Zuwachs fast ausschließlich vom Ausbau der Biomassekraftwerke herrühren, da bei Wasserkraft angeblich schon seit Jahrzehnten alle topografisch möglichen und zumutbaren Standorte genutzt werden. Inwiefern der geplante massive Ausbau der Stromerzeugung aus Biomasse bei weltweiter Knappheit an Nahrungs- und Futtermitteln und den dadurch resultierenden Preisanstiegen tatsächlich realisiert werden kann, wird sich zeigen. Gegebenenfalls kann hier auch die Stromerzeugung aus Gas, das aus EE-Überschuss-Stromerzeugung gewonnen wird, verstärkt eingesetzt werden.

In jedem Fall kommt dem Beitrag dieser gut regelbaren und prognostizierbaren Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hohe strategische und wirtschaftliche Bedeutung zu. Eine nennenswerte Stromerzeugung aus Wasserkraft, Biomasse und EE-Gas ist unabdingbar erforderlich, um für eine annähernd 100%ige Versorgung aus erneuerbaren Energien die dringend benötigte Regel-, Ausgleichs- und Reserveenergie für die stark fluktuierenden Energieträger Wind und Sonne bereitzustellen.