

## **Discussion Paper**

**13**

# **Ausbaupfade für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien: Zur Bedeutung der jährlichen Zubauraten vor dem Hintergrund der Ausbau- und Klimaschutzziele in Deutschland**

Hamburg, April 2014

Dr. Sven Bode und Dr. Helmuth-M. Groscurth

Discussion Paper 13: Ausbaupfade für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien: Zur Bedeutung der jährlichen Zubauraten vor dem Hintergrund der Ausbau- und Klimaschutzziele in Deutschland

Version 1.12 vom 23.4.2014

---

**arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik**

arrhenius consult gmbh

Am Waldpark 18

22589 Hamburg

Germany

040 – 3708 4420

[info@arrhenius.de](mailto:info@arrhenius.de)

[www.arrhenius.de](http://www.arrhenius.de)

---



# Inhalt

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Methodik .....</b>	<b>5</b>
1.1 Grundlagen und Begriffsklärungen .....	5
1.2 Beispiel: Ausbau einer nicht näher bestimmten Technologie .....	6
1.2.1 Idealer Zubau.....	7
1.2.2 Zubau unterhalb der idealen Rate.....	8
1.2.3 Kompensation von Zubau unterhalb der idealen Rate .....	10
1.2.4 Zubau oberhalb der idealen Rate .....	11
1.2.5 Kompensation von zu hohem Zubau .....	13
1.2.6 Zeit bis Zieljahr größer als Lebensdauer der Anlagen .....	16
1.2.7 Fazit .....	16
<b>2 Analyse der aktueller Ausbaupläne.....</b>	<b>18</b>
2.1 Szenario A – Strombedarf 500 TWh/a .....	19
2.1.1 Windenergie onshore.....	19
2.1.2 Windenergie offshore.....	20
2.1.3 Photovoltaik .....	21
2.2 Szenario B – Strombedarf 800 TWh/a .....	24
2.2.1 Windenergie onshore.....	24
2.2.2 Windenergie offshore.....	24
2.2.3 Photovoltaik .....	24
2.3 Beschleunigung des Ausbaus.....	25
2.4 Die EEG-Reform 2014 .....	26
2.4.1 Windenergie onshore.....	26
2.4.2 Photovoltaik und Windenergie offshore .....	27
<b>ANHÄNGE.....</b>	<b>29</b>
Abkürzungen und Glossar .....	29
Referenzen .....	30
Verzeichnis der Tabellen .....	30
Verzeichnis der Abbildungen .....	30



## Zusammenfassung

Es gibt in Deutschland ein Ziel für den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2050, das im Rahmen der aktuellen EEG-Reform durch die Bundesregierung bestätigt und mit Blick auf Zwischenziele und Zubauraten für einzelne Technologien konkretisiert wurde.

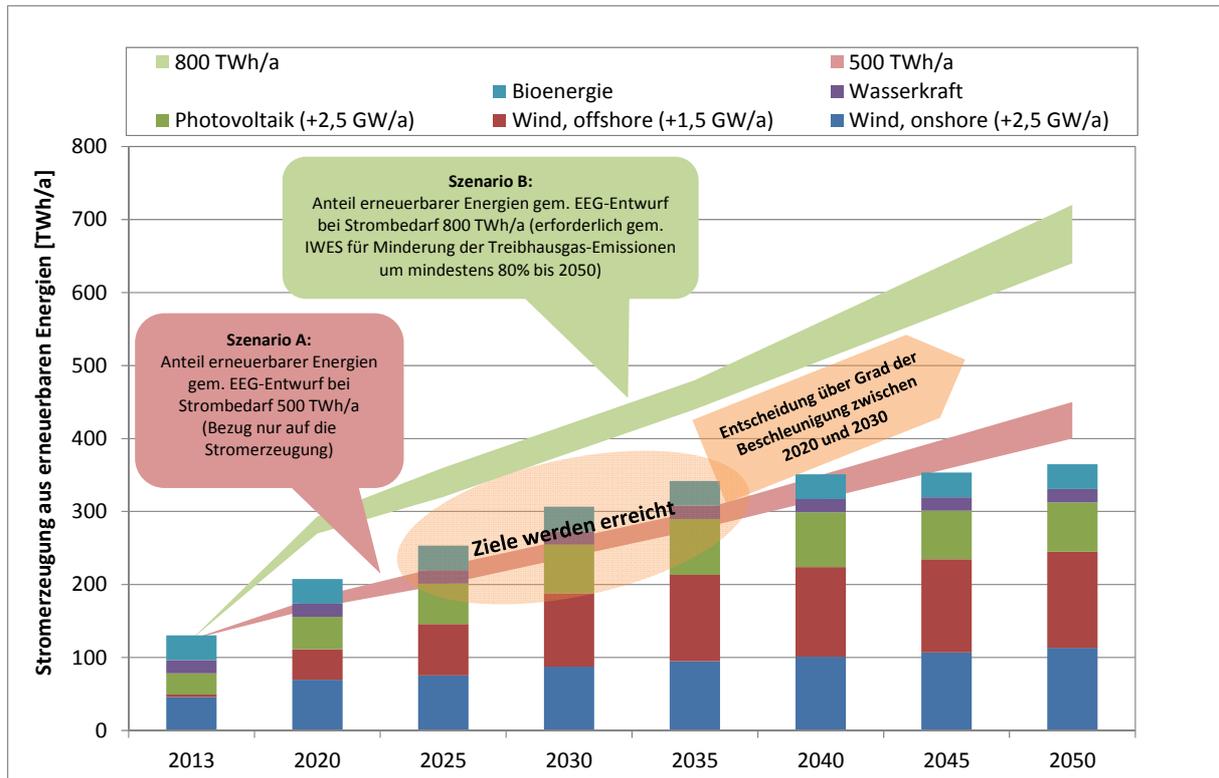
Die Ausbauziele sind bislang ausschließlich als Anteile an der Stromerzeugung definiert. Daher ist es nicht möglich, ohne weiteres die aus erneuerbaren Energien zu produzierenden Strommenge und die dazu erforderlichen Anlagenkapazitäten zu bestimmen. Vielmehr erfordert dies zusätzliche Annahmen, unter anderem über den erwarteten Strombedarf. Basierend auf zwei Szenarien mit einem Strombedarf in Höhe von 500 TWh/a und 800 TWh/a (letzteres getrieben durch den Einsatz von Strom im Wärme- und Verkehrssektor zur Erreichung des Klimaschutzziels für 2050) untersucht die vorliegende Studie die Wirkung von Zubauraten auf die Ausbauziele. Leitkriterium ist dabei das hier neu entwickelte Konzept des „idealen Zubaus“. Dieser Ansatz postuliert, dass der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien idealerweise mit konstanten Zubauraten (im Sinne von jährlich gleichbleibender Kapazität neu zu errichtender Anlagen) erfolgen sollte. Der ideale Zubau wird dabei definiert als Quotient von im Zieljahr zu erreichender installierter Leistung dividiert durch die Lebensdauer der Anlagen.

Ein solcher Pfad wäre sowohl für Stromverbraucher als auch Anlagenbetreiber vorteilhaft, da auf diese Weise sowohl überhöhte Gesamtkapazitäten als auch Zyklen bei den jährlichen Zubauraten vermieden werden können.

Maßgeblich ist dabei, dass Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien – wie auch konventionelle Kraftwerke – begrenzte Lebensdauern haben. Bis zum Zieljahr 2050 müssen – bei unterstellten Lebensdauern von 20 bis 30 Jahren – alle bis heute errichteten Anlagen noch einmal ersetzt und zusätzlich weitere Anlagen errichtet werden. Nachdem das Ausbauziel erreicht wurde, stellt sich dagegen ein Gleichgewichtszustand ein, in dem nur noch die abgehenden Altanlagen ersetzt werden müssen.

Das vorgestellte Konzept des idealen Zubaus gibt Politikern und Planern erstmals ein Instrumentarium an die Hand, um den Ausbaupfad für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dauerhaft sinnvoll zu steuern. Dies ist notwendig, da sich Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien – nach weit verbreiteter Meinung – bei hohen Marktanteilen, wie sie in Deutschland angestrebt werden, nicht ohne zusätzliche, staatlich organisierte Zahlungsströme neben den Erlösen aus dem reinen Stromverkauf durchsetzen werden.

Die Analyse des Ausbauziels und der Zubauraten nach dem EEG-Reformverschlagn der Bundesregierung unter Berücksichtigung des historischen Zubaus zeigt, dass die Zubauraten für nächsten 10 bis 15 Jahre sinnvoll gewählt sind und ein späteres Nachjustieren auf dann für 2050 gewünschte bzw. erwartete Stromanteile erlauben (siehe Abbildung).



# 1 Methodik

## 1.1 Grundlagen und Begriffsklärungen

Beim Umbau der Stromversorgung im Rahmen der Energiewende sind zwei Phasen zu unterscheiden: In der ersten Phase müssen die Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erweitert werden, um deren Anteil an der Deckung des Strombedarfs zu erhöhen (*Ausbauphase*). Wenn das gewünschte Ausbauziel erreicht ist, folgt eine zweite Phase, in der nur noch außer Betrieb gehende Anlagen ersetzt werden müssen (*Gleichgewichtsphase*).

Im Weiteren wird unterschieden zwischen dem *Zubau* an Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, gemessen in Gigawatt pro Jahr (GW/a) und dem angestrebten *Ausbauniveau*, gemessen in Gigawatt (GW). Diese und weitere Begriffsdefinitionen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Das *Zieljahr* ist der Zeitpunkt, bis zu dem die Ausbauphase abgeschlossen werden soll und somit die Gleichgewichtsphase beginnt.

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen.

<b>Zubau / Zubaurate:</b>	(jährliche) Installation an Stromerzeugungskapazität einer Technologie, ausgedrückt in Gigawatt pro Jahr (GW/a)
<b>Zubaupfad</b>	Zeitablauf des Zubaus
<b>Ausbauziel / Ausbauniveau:</b>	kumulierte Kapazität einer Technologie im Zielzustand, ausgedrückt in Gigawatt (GW)
<b>Ausbauphase</b>	Periode, in der die installierten Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erweitert werden
<b>Gleichgewichtsphase</b>	Periode, in der die Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien konstant bleiben
<b>Zieljahr / Zielhorizont</b>	Zeitpunkt, zu dem das Ausbauziel erreicht sein soll.
<b>Lebensdauer</b>	Zeitraum, über den eine neu errichtete Anlage zur Stromerzeugung genutzt werden kann, bevor sie außer Betrieb geht
<b>Erzeugungskapazität</b>	Kapazität zur Stromerzeugung = kumulierte Leistung der installierten Anlagen zur Stromerzeugung in GW
<b>Errichtungskapazität</b>	Kapazität zur Errichtung von Anlagen = maximal möglicher Zubau in GW/a

Alle Anlagen zur Stromerzeugung haben eine endliche Lebensdauer und müssen nach deren Ablauf ersetzt werden. Die Lebensdauer wird unter anderem durch folgende Parameter beeinflusst:

- Ökonomische Faktoren, wie z.B.
  - Erlöse aus dem Verkauf von Strom, die kleiner werden als die laufenden Kosten der Anlagen (inklusive Ersatzinvestitionen und Reparaturen). Dies kann insbesondere nach Auslaufen der Einspeisevergütung nach dem EEG der Fall sein.



- Es ist rentabler am Standort der Altanlage eine neue Anlage zu errichten und die Altanlage dafür abzubauen.
- Rechtliche Faktoren, wie z.B.
  - auslaufende Pachtverträge.

Bei der Bestimmung der Zubauraten, die notwendig sind, um das Ausbauziel bis zum angestrebten Zielhorizont zu erreichen, ist es erforderlich, die Lebensdauer der eingesetzten Stromerzeugungsanlagen zu berücksichtigen.

Wenn die Ausbauphase länger ist als die Lebensdauer der Anlagen, dann ist es erforderlich, nach Ablauf der Lebensdauer der zuerst installierten Anlagen nicht nur zusätzliche Anlagen zu errichten, sondern auch außer Betrieb gehende Anlagen zu ersetzen. Andernfalls wird das Ziel nicht erreicht. In der Gleichgewichtsphase müssen dann nur noch Anlagen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, ersetzt werden.

Startet man zum Zeitpunkt 0 mit einer installierten Leistung von 0 und baut in jedem Jahr die Kapazität zu, die dem Ersatzbedarf im Gleichgewichtszustand entspricht, dann erhält man eine Ausbauphase mit einem linearen Anwachsen der kumulierten Kapazität zur Stromerzeugung, die genau nach Ablauf der Lebensdauer der zuerst installierten Anlagen in die Gleichgewichtsphase übergeht. Dies wird im nächsten Kapitel anhand von Beispielen verdeutlicht (vgl. Abbildung 1).

Die Erfahrung zeigt, dass die Zubauraten in der Vergangenheit zum Teil stark geschwankt haben. Im EEG-Entwurf werden nun konkrete Vorgaben für einzelne Technologien gemacht. Zur Bewertung möglicher Zubauraten wird folgendes Kriterium für deren Güte definiert:

*Der ideale Zubau an Kapazitäten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ergibt als Ausbauziel geteilt durch (erwartete)Lebensdauer der Anlagen.*

Der ideale Zubau ist über alle Jahr konstant, d.h. sowohl in der Ausbauphase wie in der Gleichgewichtsphase wird jährlich die gleiche Kapazität neu errichtet. Auf die Bedeutung einer konstanten Zubaurate wird weiter unten genauer eingegangen.

Daraus folgt unmittelbar, dass der Zeithorizont bis zum Erreichen eines Ausbauziels der Lebensdauer der Anlagen entspricht.

## 1.2 Beispiel: Ausbau einer nicht näher bestimmten Technologie

Die in Kap. 1.1 angestellten Überlegungen sollen im Folgenden anhand von Beispielrechnungen für eine nicht näher bestimmte Technologie verdeutlicht werden.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass bei einem großen Anlagenportfolio in der Realität nicht alle Anlagen eines Errichtungsjahrgangs tatsächlich genau nach Ablauf ihrer theoretischen Lebensdauer außer Betrieb genommen werden. Vielmehr ist eine Verteilung über einen gewissen Zeitraum zu erwarten.

Tabelle 2 weist zunächst die ideale jährliche Zubaurate für eine solche fiktive Technologie in Abhängigkeit vom angestrebten Ausbauniveau und der Lebensdauer der Anlagen aus.

Tabelle 2: Ideale Zubaurate in Abhängigkeit vom Ausbauniveau und der Lebensdauer der Anlagen.

		Zielniveau [GW]				
		50	75	100	125	150
Lebensdauer [a]	20	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50
	25	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
	30	1,67	2,50	3,33	4,17	5,00

Für die folgenden Beispielrechnungen wird angenommen, dass ein Ausbau auf 100 GW angestrebt wird. Im Startjahr seien noch keine Anlagen installiert, d.h. die Kapazität betrage 0 GW. Die Lebensdauer der Anlagen betrage 25 Jahre. Daraus lässt sich dann zunächst ableiten, dass das Zielniveau nach 25 Jahren erreicht wird. Der dafür erforderliche ideale Zubau liegt bei 4 GW/a.

Aus Tabelle 2 lässt sich ebenfalls leicht ablesen, dass ein höheres Zielniveau von z.B. 125 GW mit einer höheren idealen Zubaurate von 5 GW/a einhergeht.

Wenn dagegen die Lebensdauer der Anlagen 30 Jahre anstelle der bislang angenommenen 25 Jahre beträgt, dann liegt die ideale Zubaurate bei 3,3 GW/a. Mit ihr wird das angestrebte Ausbauziel von 100 GW nach 30 Jahren auf einem linearen Pfad erreicht.

### 1.2.1 Idealer Zubau

Die ideale Zubaurate beträgt gemäß der obigen Definition 4 GW/a (= 100 GW / 25 a; vgl. Tabelle 2). Wird zum Zeitpunkt 0 – ausgehend von einem Niveau von 0 GW – mit einem Zubau von 4 pro Jahr GW begonnen, so steigt die Kapazität zunächst linear an (Ausbauphase). Nach 25 Jahren wird der Zielwert von 100 GW erreicht. Gleichzeitig gehen jetzt die im Jahr 0 errichteten Anlagen außer Betrieb. Zubau und Abgänge halten sich die Waage, so dass die Kapazität konstant bei 100 GW verbleibt (Gleichgewichtsphase). Der Zubau liegt in sowohl in der Ausbauphase wie in der Gleichgewichtsphase bei konstant 4 GW/a. Abbildung 1 verdeutlicht diesen Verlauf.

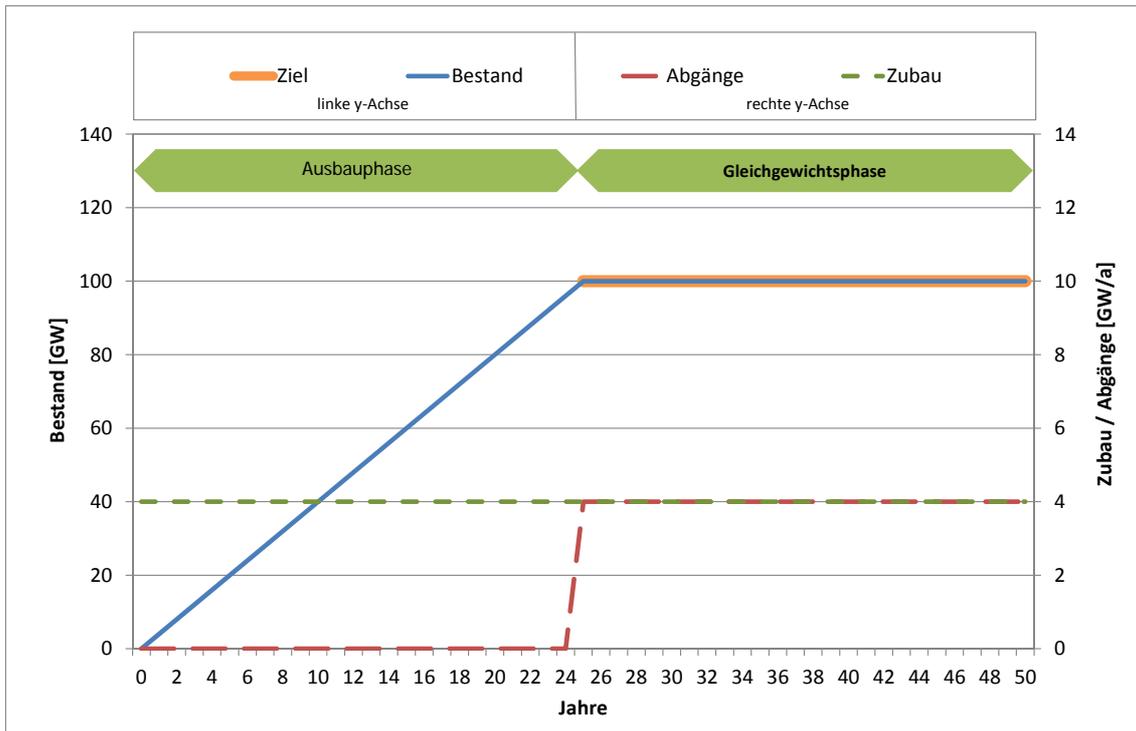


Abbildung 1: Idealer Zubaupfad für eine fiktive Technologie zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Zielniveau 100 GW, Lebensdauer der Anlagen 25 Jahre).

### 1.2.2 Zubau unterhalb der idealen Rate

Was passiert, wenn die tatsächliche Zubaurate unterhalb der idealen Zubaurate liegt? Abbildung 2 zeigt, dass das Zielniveau nicht erreicht wird, wenn im Beispiel 3 GW/a statt der notwendigen 4 GW/a zugebaut werden.

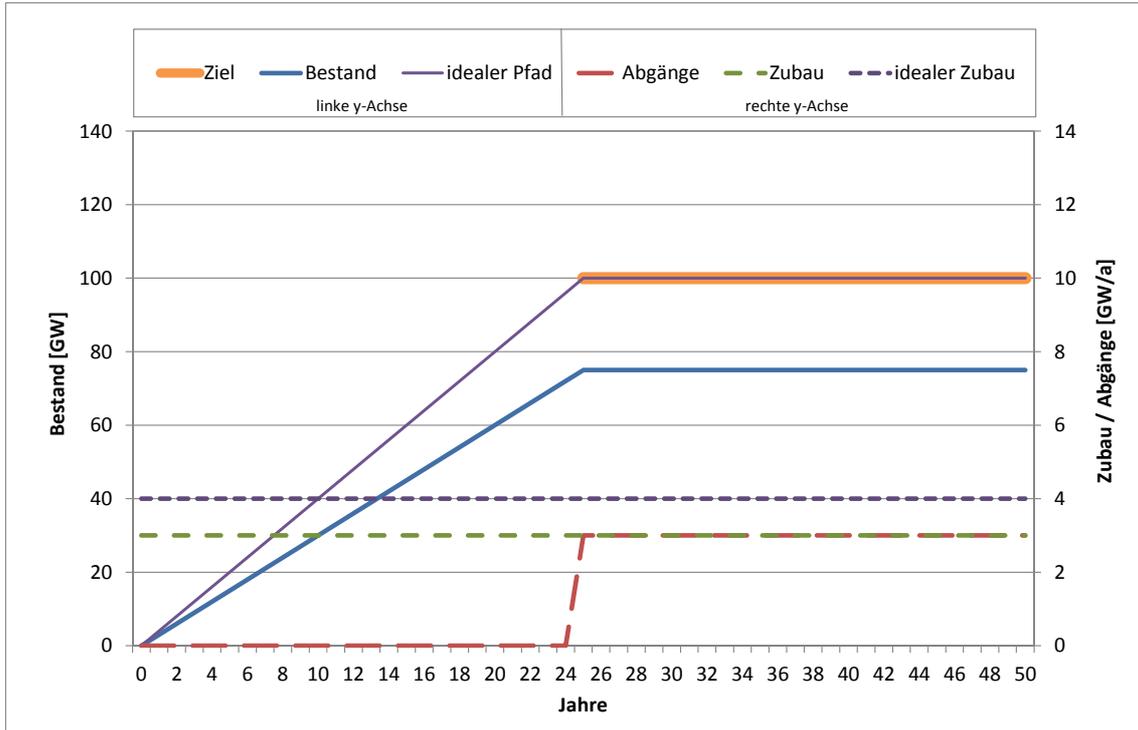


Abbildung 2: Zubau dauerhaft unterhalb der idealen Rate.

Wenn der tatsächliche Ausbau dagegen nur für eine bestimmte Zeit, hier z.B. über 10 Jahre nur 3 GW/a anstelle der notwendigen 4 GW/a beträgt, dann wird das Ausbauziel erst 10 Jahre später erreicht (Abbildung 3).

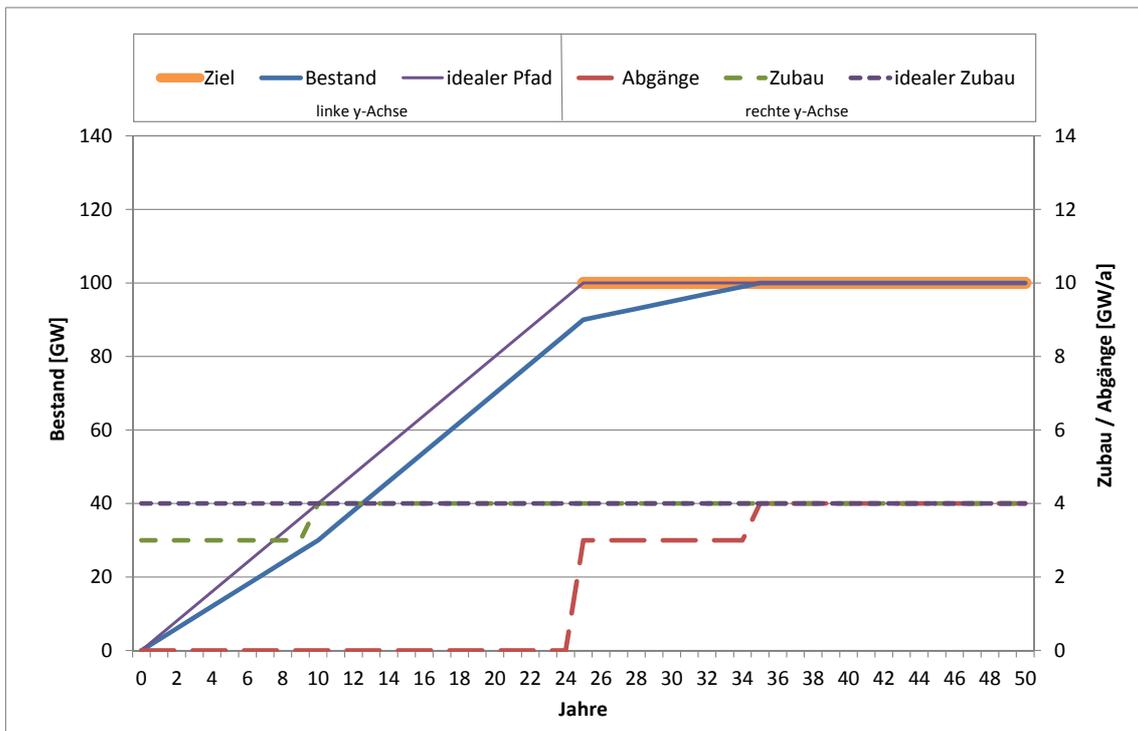


Abbildung 3: Vorübergehend geringerer Zubau als für den idealen Pfad erforderlich.



### 1.2.3 Kompensation von Zubau unterhalb der idealen Rate

Im nächsten Schritt wird versucht, den über 10 Jahre zu geringen Ausbau in Höhe von 3 GW/a (anstatt der notwendigen 4 GW/a) zu kompensieren, indem in den folgenden 10 Jahren 1 GW/a mehr, also 5 GW/a, zugebaut werden.

Dies führt dazu, dass das Zielniveau zwar wie geplant nach 25 Jahren erreicht wird, es aber anschließend für 20 Jahre um bis zu 10 GW überschritten wird, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt (Abbildung 4).

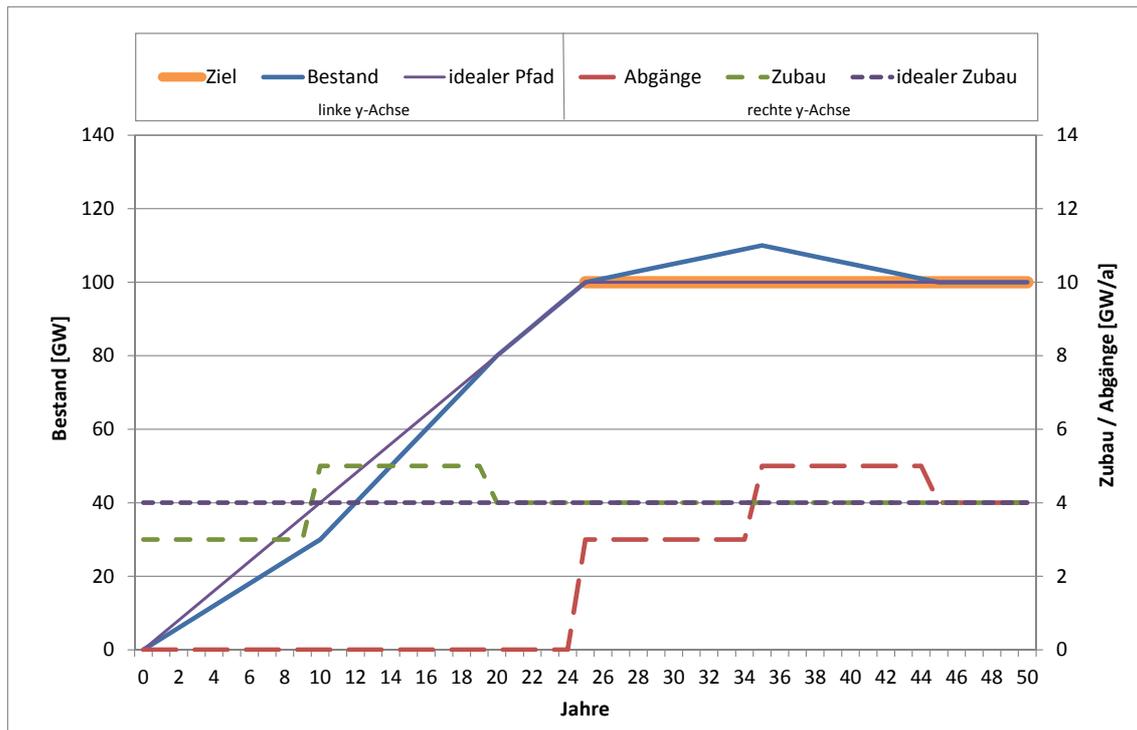


Abbildung 4: Kompensation eines Zubaus unterhalb der idealen Rate durch erhöhten Zubau.

Ein solches Vorgehen hat zwei Konsequenzen:

- Die zwischenzeitlich vom 10. bis zum 19. Jahr benötigte zusätzliche Errichtungskapazität in Höhe von 1 GW kann danach nicht mehr genutzt werden.
- Über 20 Jahre, nämlich von Jahr 24 bis 44, wird die Stromerzeugungskapazität höher sein als angestrebt und es wird somit mehr Strom erzeugt werden können als gedacht.

Wird der Zubau dagegen so erhöht, dass das Zielniveau nach 20 Jahren linear erreicht und danach weder unter- noch überschritten wird – z.B. um die angesprochene Belastung der Stromverbraucher zu vermeiden – ergeben sich dauerhaft Zyklen beim Zubau, die zwischen 3 und 5 GW/a pendeln (Abbildung 5).

Auf die je nach Zubaupfad resultierenden Interessenskonflikte zwischen Stromverbrauchern einerseits und den Investoren, Anlagenbauern und deren Arbeitnehmern andererseits wird weiter unten eingegangen.

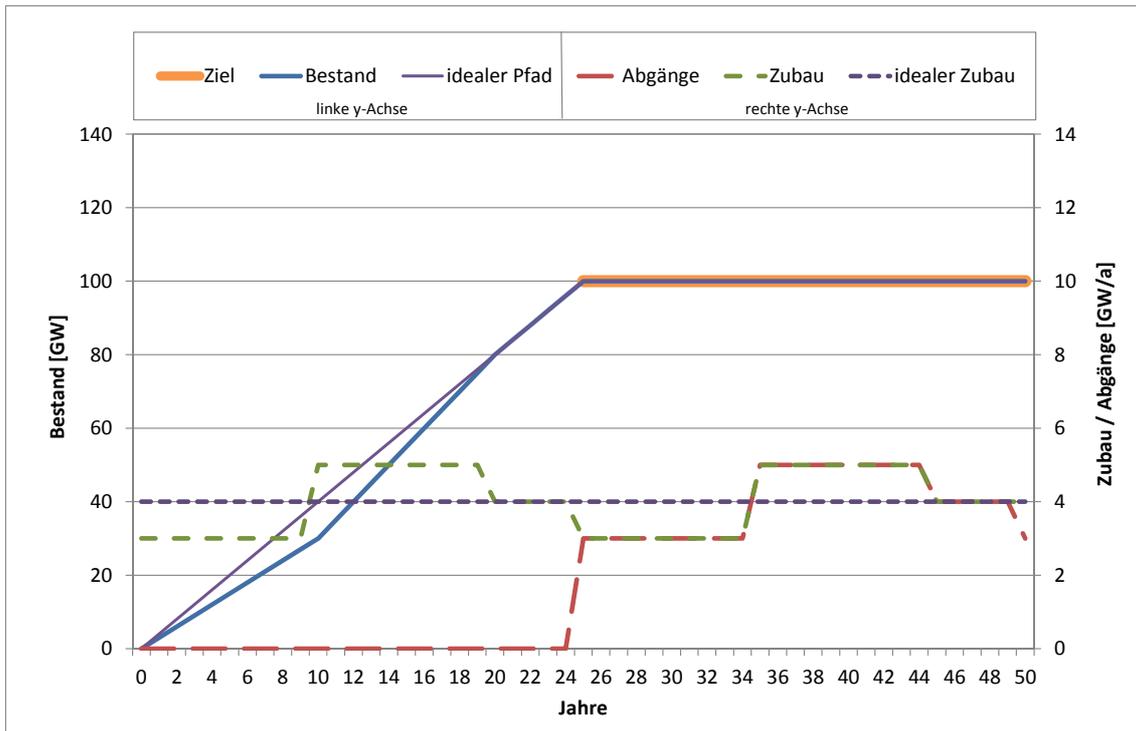


Abbildung 5: Kompensation eines Ausbaus unterhalb der idealen Zubaurate durch erhöhten Zubau ohne Überschreiten der Zielniveaus.

### 1.2.4 Zubau oberhalb der idealen Rate

Wird dauerhaft mehr Kapazität zugebaut als durch die ideale Zubaurate vorgegeben, dann stellt sich ein höheres Endniveau ein. Abbildung 6 zeigt die Auswirkungen eines dauerhaft um 1 GW/a erhöhten Zubaus im oben beschriebenen Beispiel.

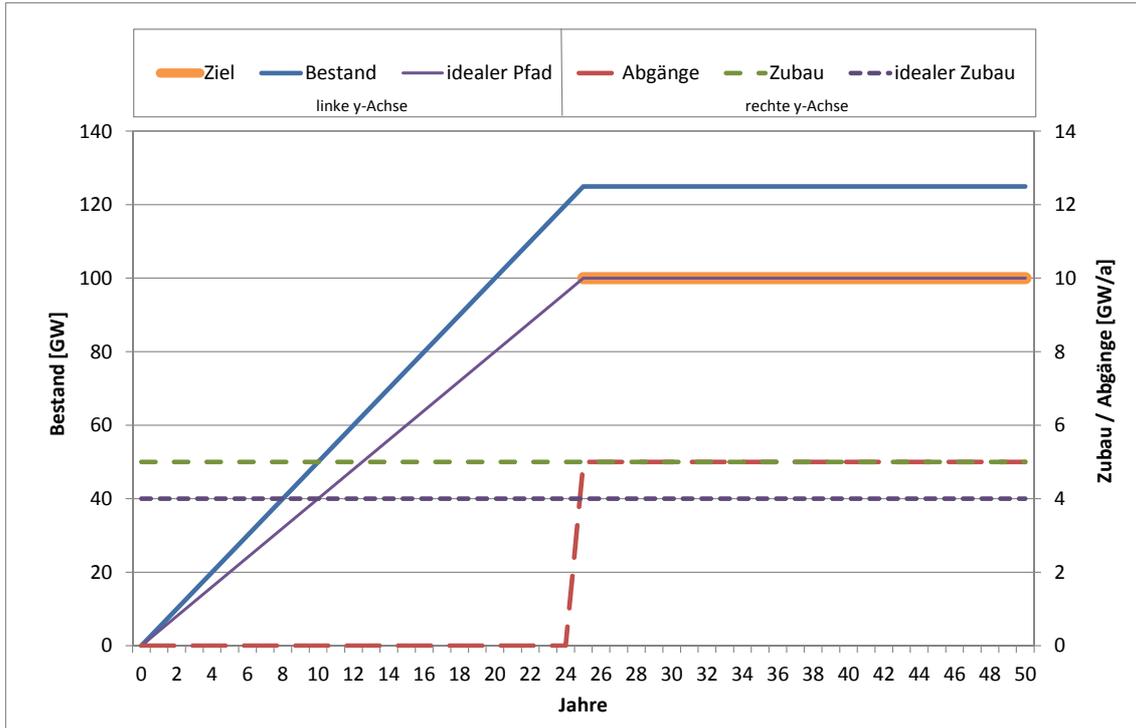


Abbildung 6: Ausbau dauerhaft oberhalb der idealen Zubaurate.

Wird nur für einen bestimmten Zeitraum von z.B. 10 Jahren 1 GW/a mehr zugebaut als erforderlich ist, um das Ausbauziel auf dem idealen Pfad zu erreichen (Abbildung 7), dann wird das Ausbauziel bereits im 23. Jahr erreicht und – auch wenn der Zubau nach 10 Jahren auf das eigentlich ideale Niveau von 4 GW/a fällt – in der Folge überschritten. Im 25. Jahr wird eine maximale Kapazität von 110 GW erreicht, die um 10 GW oder 10% über Zielniveau liegt. Danach sinkt die Kapazität 10 Jahre lang, bis sie im 35. Jahr dann auf dem ursprünglich anvisierten Niveau den Gleichgewichtszustand erreicht.

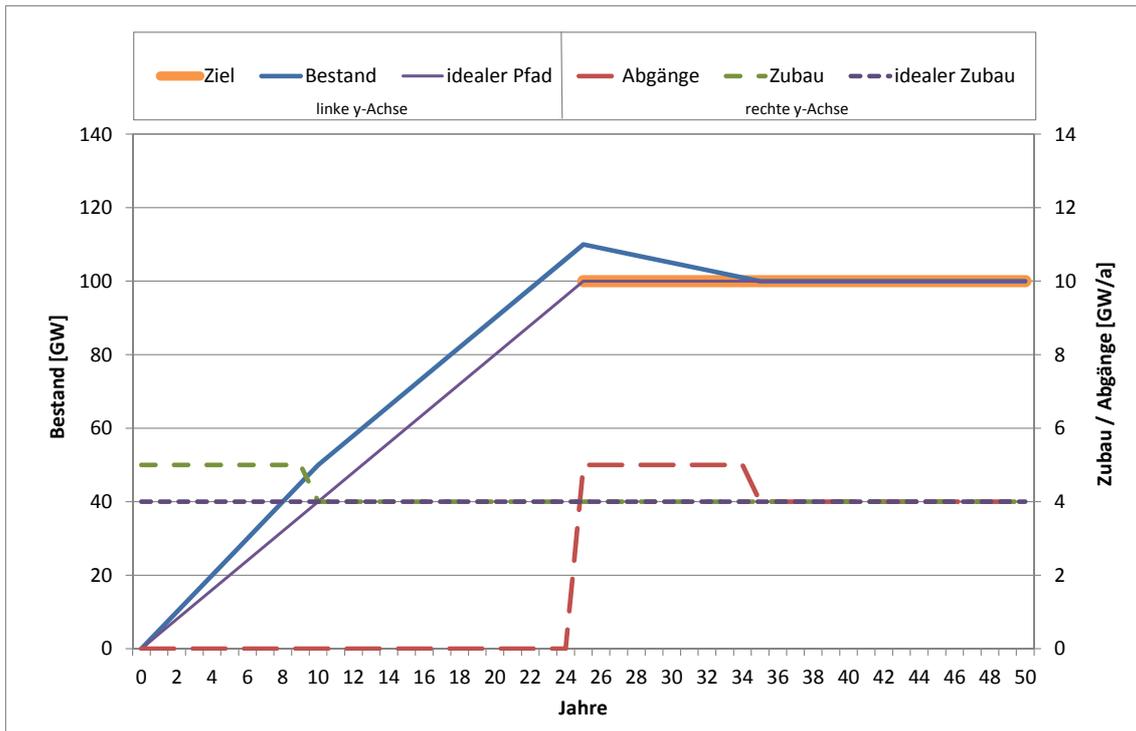


Abbildung 7: Vorübergehend höherer Ausbau als beim idealen Pfad.

### 1.2.5 Kompensation von zu hohem Zubau

Wird der Zubau nach Erreichen des Zielniveaus im Jahr 23 so angepasst, dass dieses Niveau in der Folge gehalten wird, dann ergeben sich Zyklen für den Zubau, die zwischen null und 5 GW/a pendeln (siehe Abbildung 8).

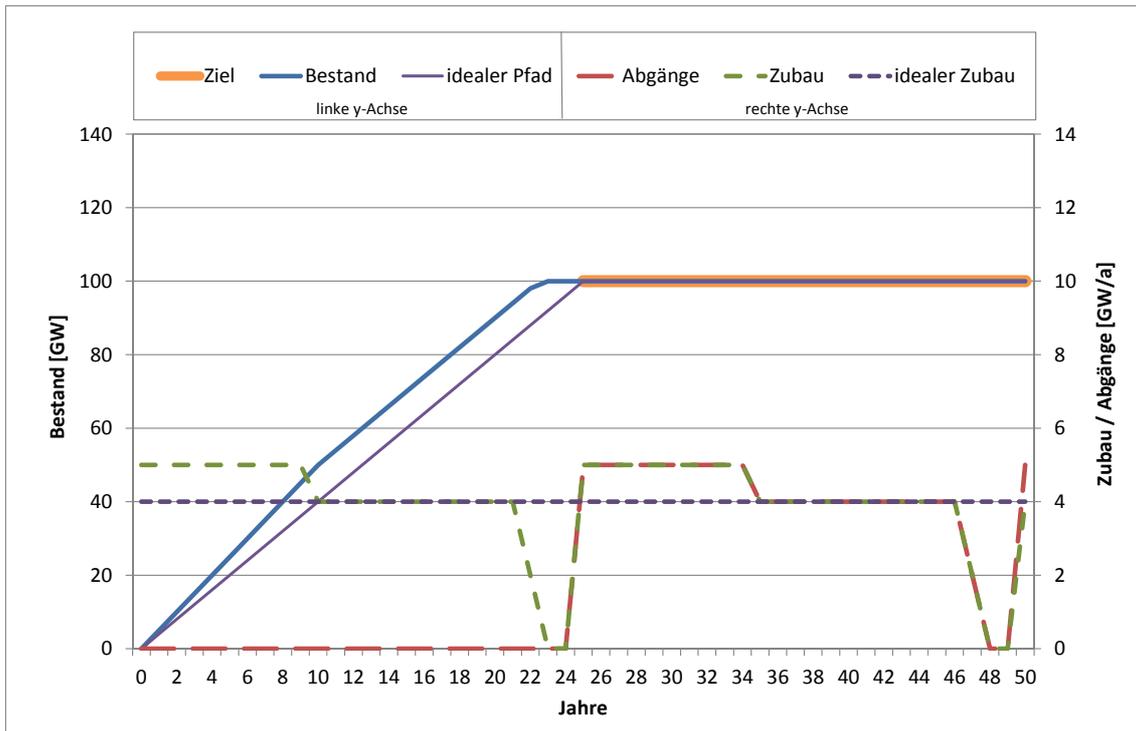


Abbildung 8: Zyklen, die durch Deckelung des Zubaus entstehen, wenn das Zielniveau durch Ausbau oberhalb der idealen Zubaurate vorzeitig erreicht wird.

Wenn ein Ausbau, der 10 Jahre lang um 1 GW/a zu hoch im Vergleich zum idealen Ausbaupfad, dadurch kompensiert wird, dass in den 10 Folgejahren jeweils 1 GW/a weniger als im idealen Fall installiert wird, dann wird das Zielniveau zwar nach 25 Jahren zunächst erreicht, anschließend gehen aber die zunächst zu viel errichteten Anlagen außer Betrieb und die Erzeugungskapazität sinkt (Abbildung 4). Erst nach weiteren 20 Jahren stellt sich der angestrebte Gleichgewichtszustand ein. Als Konsequenz ergibt sich eine geringere Stromerzeugungskapazität als angestrebt (blaue Linie) und damit auch eine geringere Stromproduktion.

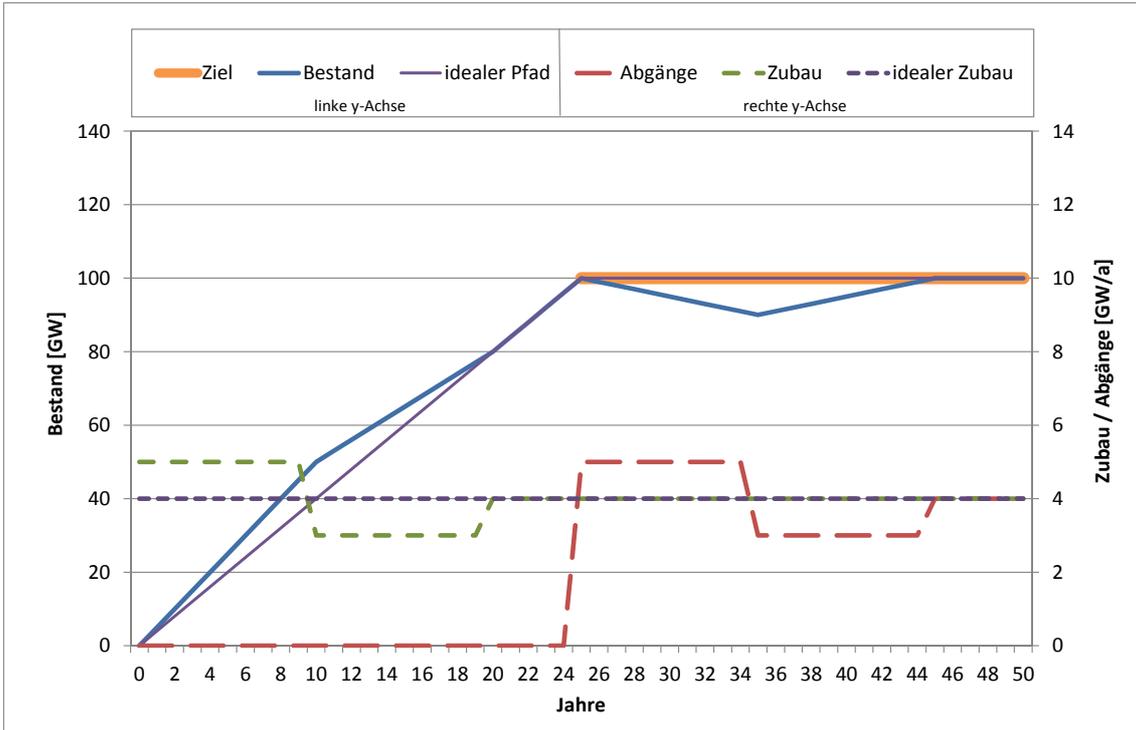


Abbildung 9: Kompensation eines Ausbaus oberhalb der idealen Zubaurate durch niedrigeren Zubau in den Folgejahren.

Wird der Zubau dagegen so gesteuert, dass das Zielniveau nicht unterschritten wird, dann ergeben sich wiederum Zyklen beim Zubau, die zwischen 3 und 5 GW/a pendeln (Abbildung 10).

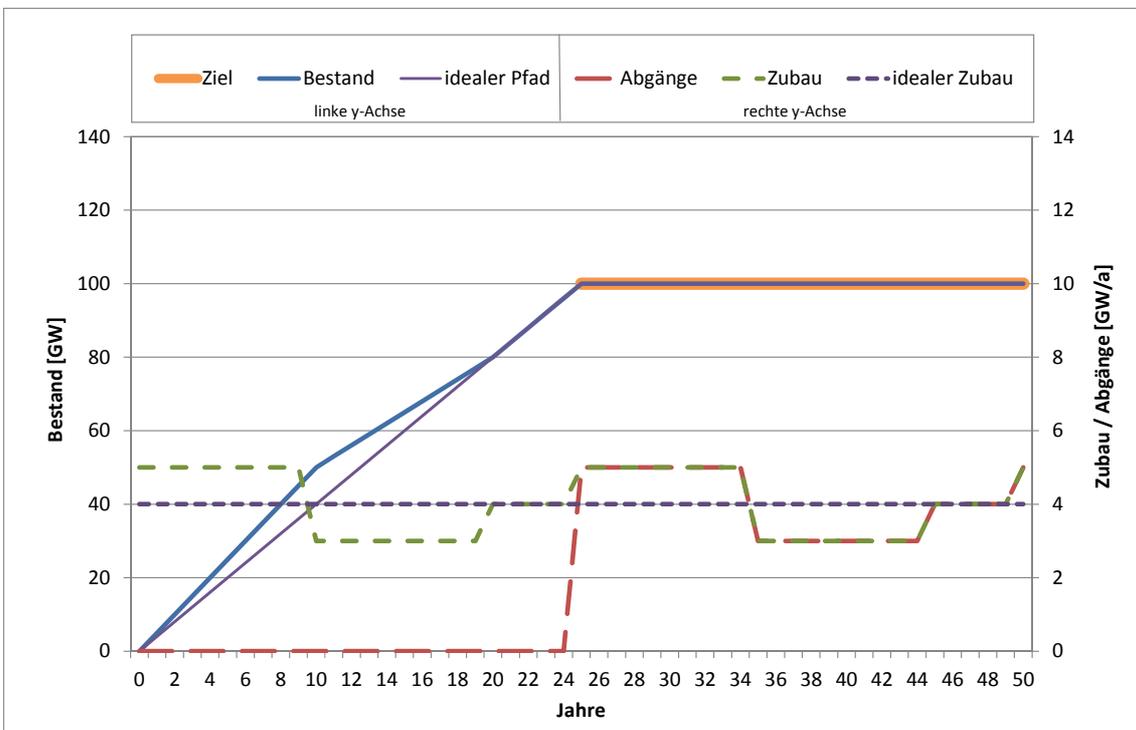


Abbildung 10: Kompensation eines Ausbaus oberhalb der idealen Zubaurate durch niedrigeren Zubau in den Folgejahren ohne Unterschreiten der Zielniveaus.



### 1.2.6 Zeit bis Zieljahr größer als Lebensdauer der Anlagen

Nach den oben gemachten Überlegungen sollte die Länge der Ausbauphase, in der die Kapazitäten mit der idealen Zubaurate vergrößert werden, der Lebensdauer der Anlagen entsprechen. Steht bis zum Zieljahr mehr Zeit zur Verfügung, teilt sich die Ausbauphase auf in eine Vorphase und eine Zielerreichungsphase (Abbildung 11).

Solange die Zubaurate in der Vorphase unterhalb der idealen Zubaurate verbleibt, entstehen keine unerwünschten Fluktuationen beim Zubau in den späteren Phasen.

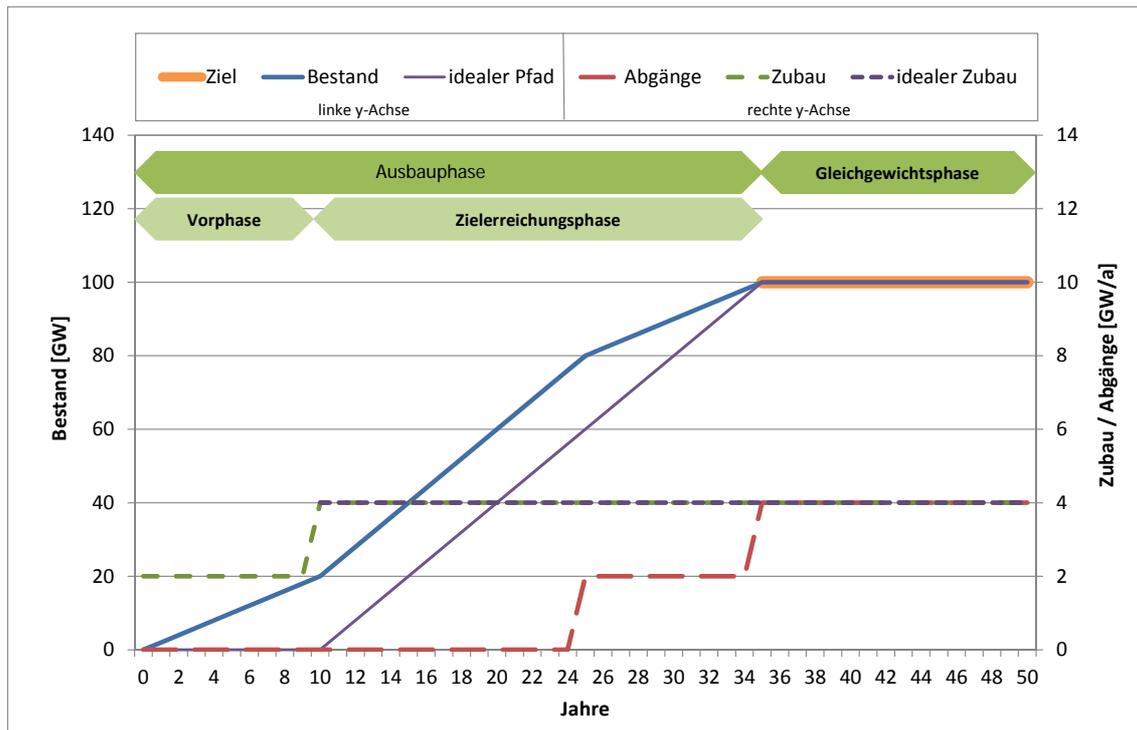


Abbildung 11: Aufspaltung der Ausbauphase, wenn die Zeit bis zum Zieljahr länger ist als die Lebensdauer der Anlagen.

### 1.2.7 Fazit

Die ideale Zubaurate für Kapazitäten zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird definiert durch den Quotienten aus Zielniveau und Lebensdauer der Anlagen. Wird sie konsequent realisiert, stellt sich nach einem Zeitraum, der der Lebensdauer der Anlagen entspricht, ein Gleichgewichtszustand ein. Die Zubaurate ist über Erweiterungs- und Gleichgewichtsphase konstant.

Weicht der Zubau von dem so definierten linearen Pfad ab, so bestehen drei Möglichkeiten:

1. Das Zielniveau wird (zeitweise) unterschritten.
2. Das Zielniveau wird (zeitweise) überschritten.
3. Es entstehen Zyklen beim Zubau.



Im 1. Fall fehlen Stromerzeugungskapazitäten und damit auch Strommengen – das Ausbauziel wird nicht oder verspätet erreicht. Diese Mengen müssen durch andere Anlagen kompensiert werden.

Im 2. Fall entstehen höhere Stromerzeugungskapazitäten als angestrebt und somit kann mehr Strom erzeugt werden als geplant. Dies kann die Erzeugung aus anderen Anlagen verdrängen, deren Wirtschaftlichkeit dadurch beeinträchtigt wird. Unter Umständen kann sogar mehr Strom erzeugt werden als überhaupt benötigt wird. In einem solchen Fall müssen die betreffenden Anlagen selbst abgeschaltet werden. Dies führt entweder dazu, dass die Betreiber Erlösausfälle hinnehmen müssen, oder, wenn diese kompensiert werden, zu höheren Kosten für die Verbraucher.

Im 3. Fall müssen sich die Hersteller der Anlagen zur Stromerzeugung auf erhebliche Schwankungen ihrer Produktion einstellen. Ob bzw. wie sie damit umgehen können, ist zurzeit unklar.

Soweit es sich um Produktionsanlagen handelt, könnte ein Teil des Outputs gegebenenfalls exportiert werden. Bei nicht handelbaren Dienstleistungen – wie z.B. der Errichtung der Fundamente von Windkraftanlagen – würde ein spürbarer Nachfragerückgang entstehen.

Als Konsequenz aus einem zeitweise zu hohen Zubau wäre also zu entscheiden, ob die Stromverbraucher höhere Kosten durch nicht oder nicht vollständig genutzte Anlagen zur Stromerzeugung zu tragen haben oder ob die Investoren und Unternehmen die Kosten aus der – gegebenenfalls vorübergehenden – Stilllegung von Produktionskapazitäten tragen müssen.



## 2 Analyse der aktueller Ausbaupläne

Aufbauend auf den theoretischen Überlegungen in Kap. 1 wird im Folgenden analysiert, ob die Zielvorstellungen und die Zubauraten, die im Entwurf zur Überarbeitung des EEG vom Februar 2014 konsistent sind.

Die Ausbauziele für erneuerbare Energien in der Stromerzeugung sind im EEG nicht in absoluten Werten definiert, sondern als prozentuale Anteile:

- 40-45% bis 2025,
- 55-60% bis 2035 und
- mindestens 80% bis 2050.

Um daraus die Zubauraten abzuleiten, die notwendig sind, um diese Ziele zu erreichen, müssen Annahmen über die erwartete Stromnachfrage getroffen werden.

Es gibt eine Vielzahl von Studien darüber, wie hoch der künftige Strombedarf sein wird und welche Kapazitäten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in dafür in der Zukunft erforderlich sein werden. Im Folgenden werden daher zwei Szenarien betrachtet:

### A) Strombedarf 500 TWh/a:

- Ausgangspunkt ist das Ziel gemäß EEG, im Jahr 2050 80% des benötigten Stroms aus erneuerbaren Energien zu erzeugen.
- Der Stromverbrauch ist im Wesentlichen so hoch wie heute, d.h. Effizienzgewinne und Zuwachs in Bereichen wie IT halten sich die Waage.
- Es gibt keine neuen Einsatzfelder für elektrische Energie mit Ausnahme der Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien, der nicht direkt genutzt werden kann.
- Die erforderlichen Kapazitäten der Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien werden der Studie „Die künftigen Kosten der Stromerzeugung“ entnommen (Arrhenius 2014).

### B) Strombedarf 800 TWh/a

- Ausgangspunkt ist das Klimaschutzziel, in 2050 mindestens 80% weniger Treibhausgase zu emittieren als 1990.
- Das erfordert den Einsatz elektrischer Energien in den Bereichen Wärmeversorgung und Verkehr.
- Ziel ist wiederum 80% des benötigten Stroms aus erneuerbaren Energien zu erzeugen.
- Die Anlagenkapazitäten werden der Studie „Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergien für die Energiewende“ entnommen (IWES 2013).

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in den Studien abgeleiteten Ausbauziele sowie die sich daraus ergebenden idealen Zubauraten für Lebensdauern der Anlagen von 20 und 30 Jahren. Zum Vergleich werden die jüngst vom Kabinett beschlossenen Zubauziele der Bundesregierung (2014) sowie die aktuellen Zubauraten der letzten Jahre angeführt.

Sofern als Zieljahr 2050 angestrebt wird, liegt dies jenseits der Lebensdauer aller heute errichteten Anlagen. Daher wird es neben der eigentlichen Zielerreichungsphase eine Vorphase geben (vgl. Abbildung 11).

Tabelle 3: Ausziele- und Zubauraten für Windenergie und Photovoltaik in verschiedenen Szenarien.

	Windenergie onshore	Windenergie offshore	Photovoltaik
<b>Szenario A</b> <b>Zielniveau (Nachfrage 500 TWh/a)</b>	80 GW	32,5 GW	60 GW
idealer Zubau bei Lebensdauer			
- 20 Jahre	4,0 GW/a	1,6 GW/a	3,0 GW/a
- 30 Jahre	2,7 GW/a	1,1 GW/a	2,0 GW/a
<b>Szenario B</b> <b>Zielniveau (Nachfrage 800 TWh/a)</b>	138 GW	54 GW	150 GW
idealer Zubau bei Lebensdauer			
- 20 Jahre	6,9 GW/a	2,7 GW/a	7,5 GW/a
- 30 Jahre	4,6 GW/a	1,8 GW/a	5,0 GW/a
<b>Zubauziele der Bundesregierung</b> (Lt. Kabinettsbeschluss vom Januar 2014)			
Zubau	2,5 GW/a	1,5 GW/a	2,5 GW/a
erreichbares Niveau bei Lebensdauer			
- 20 Jahre	50 GW	30 GW	50 GW
- 30 Jahre	75 GW	45 GW	75 GW
<b>aktueller Zubau</b>			
- 2012	2,2 GW	0,2 GW	7,6 GW
- 2013	ca. 3 GW	0,6 GW	ca. 3,5 GW
- maximaler Zubau bisher	3,2 GW (2002)	1 GW (2014) *	7,6 GW (2012)

\* erwartet

## 2.1 Szenario A – Strombedarf 500 TWh/a

### 2.1.1 Windenergie onshore

Geht man davon aus, dass Windkraftanlagen an Land eine Lebensdauer von 20 Jahren erreichen, dann ist ein dauerhafter Zubau von 4 GW/a erforderlich, um im Szenario A mit einem Strombedarf von 500 TWh/a das Ausbauziel von 80 GW zu erreichen (Abbildung 12).

Wenn das Ziel, 80% der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu bestreiten, erst für 2050 angestrebt wird, muss die Zubaurate von 4 GW/a erst ab 2030 erreicht werden.

Deshalb sind in Abbildung 12 zwei Phasen dargestellt: Die *Zielerreichungsphase* von 2030-2050 mit einem konstanten Zubau von 4 GW/a und die *Vorphase* von heute bis 2029. Wenn es lediglich darum geht, die oben beschriebene Zyklusbildung langfristig zu vermeiden, dann ist in der Vorphase jede Zubaurate zwischen 0 und dem idealen Wert von 4 GW/a zulässig. Es erscheint jedoch wenig sinnvoll, ein einmal erreichtes Produktionsniveau zu verringern, wenn bereits feststeht, dass es langfristig wieder benötigt wird. Zudem ist abzuwägen, ob aus Kostengründen eine Erhöhung der Zubaurate auf den erforderlichen Wert möglichst spät erfolgen soll oder ob nicht eine schrittweise Erhöhung für die betreffenden Unter-



nehmen besser umsetzbar ist. In Abbildung 12 wird die Zubaurate in der Vorphase linear vom Status quo in 2013 bis auf den Wert von 4 GW/a erhöht wird.

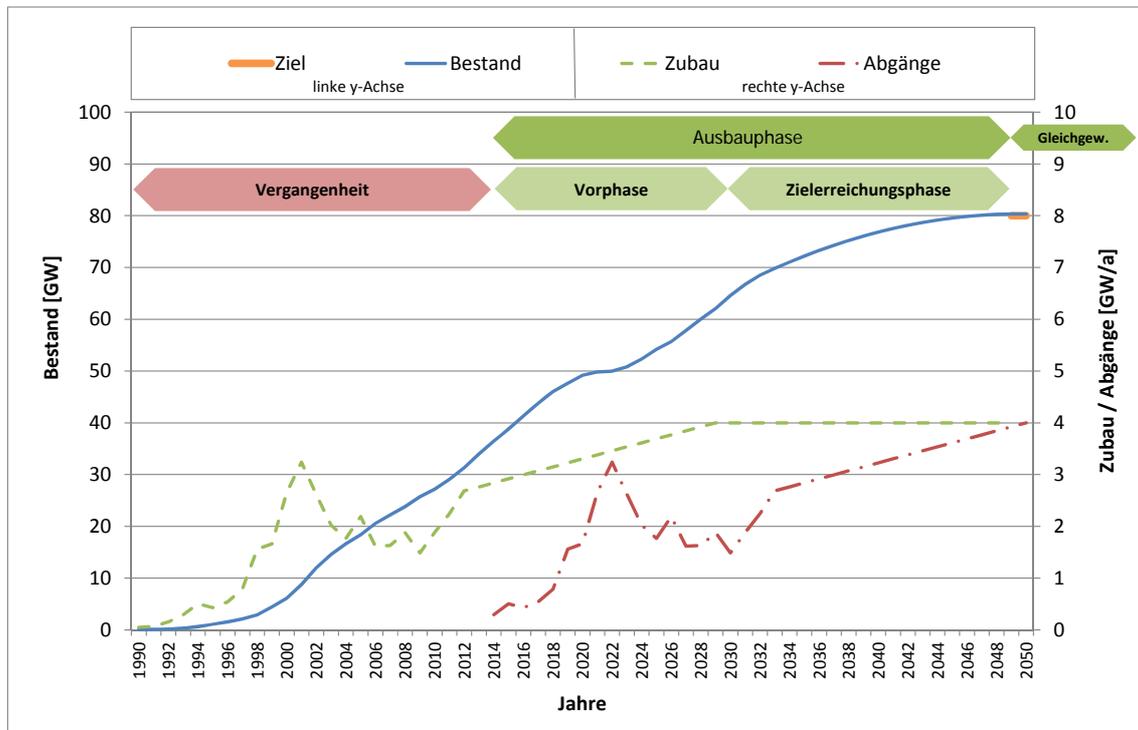


Abbildung 12: Idealer Ausbau der Windenergie an Land auf 80 GW im Zeitraum 2030-2050 und lineare Steigerung der Zubaurate auf den idealen Wert in der Vorphase von heute bis 2029.

### 2.1.2 Windenergie offshore

Unterstellt man für Windkraftanlagen auf See ebenfalls eine Lebensdauer von 20 Jahren, dann ist für das Ausbauziel des Szenarios A von 32,5 GW eine Zubaurate von 1,6 GW/a erforderlich, die Offshore-Windenergie um 1,5 GW/a auszubauen. Eine solche Rate wurde bislang noch erreicht, da die Branche erst im Aufbau ist, entspricht aber deren Plänen.

Abbildung 13 zeigt den Ausbau, wenn zunächst bis 2030 1,5 GW/a zugebaut werden und dieser Wert anschließend auf die erforderlichen 1,6 GW/a erhöht wird. Da Ausbauziel des Szenarios A von 32,5 GW wird auf diese Weise punktgenau erreicht und kann anschließend gehalten werden.

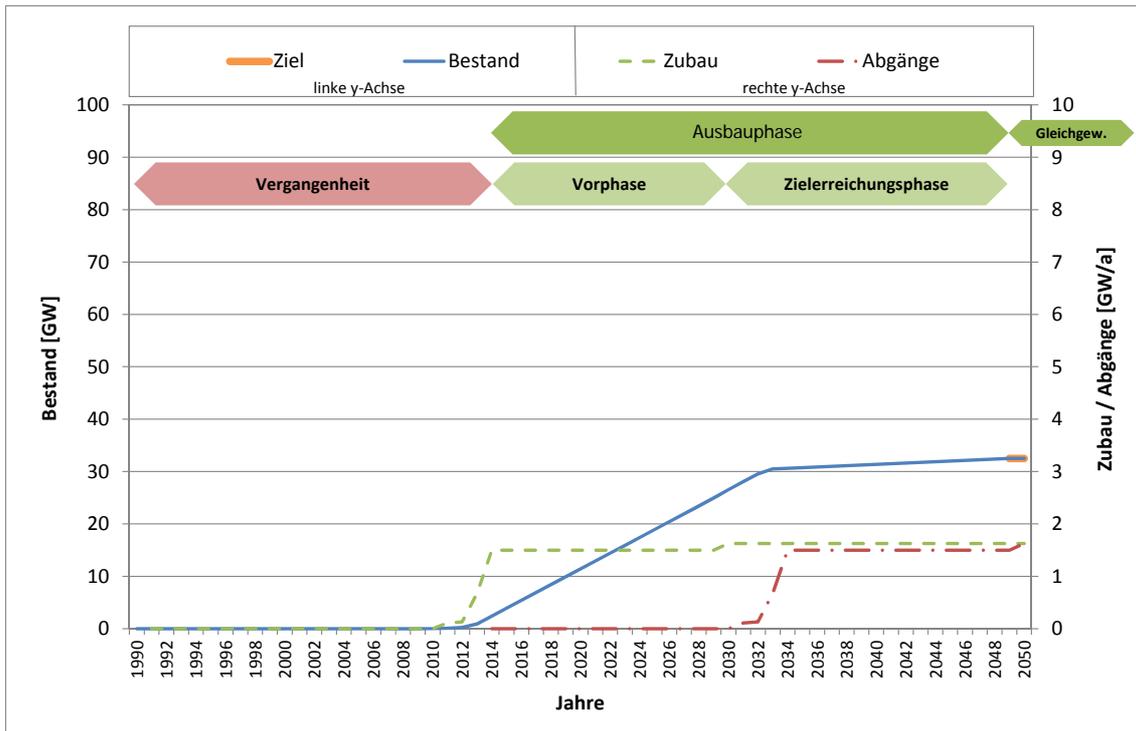


Abbildung 13: Ausbaupfad für Windenergie auf See auf 32,5 GW in 2050.

### 2.1.3 Photovoltaik

Für PV-Anlagen wird üblicherweise eine Lebensdauer von 30 Jahren angenommen. Daraus ergibt sich eine Zubaurate von 2,0 GW/a, um die im Szenario A anvisierte Kapazität von 60 GW zu erreichen und zu halten. Bei einer Lebensdauer der Anlagen von nur 20 Jahren erhöht sich die erforderliche Zubaurate auf 3,0 GW/a.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf des Anlagenbestandes der Photovoltaik, wenn kontinuierlich mit der idealen Rate von 2 GW/a zugebaut wird. Da diese Rate heute überschritten wird, wird der Zubau schon während der Vorphase, d.h. ab sofort, auf die ideale Rate begrenzt. Das Zielniveau von 60 GW wird dann schon im Jahr 2026 erreicht und anschließend überschritten. Bis zum Jahr 2038 steigt die installierte Leistung bis auf nahezu 80 GW an bevor sie dann wie abfällt und 2050 das Zielniveau von 60 GW erreicht.

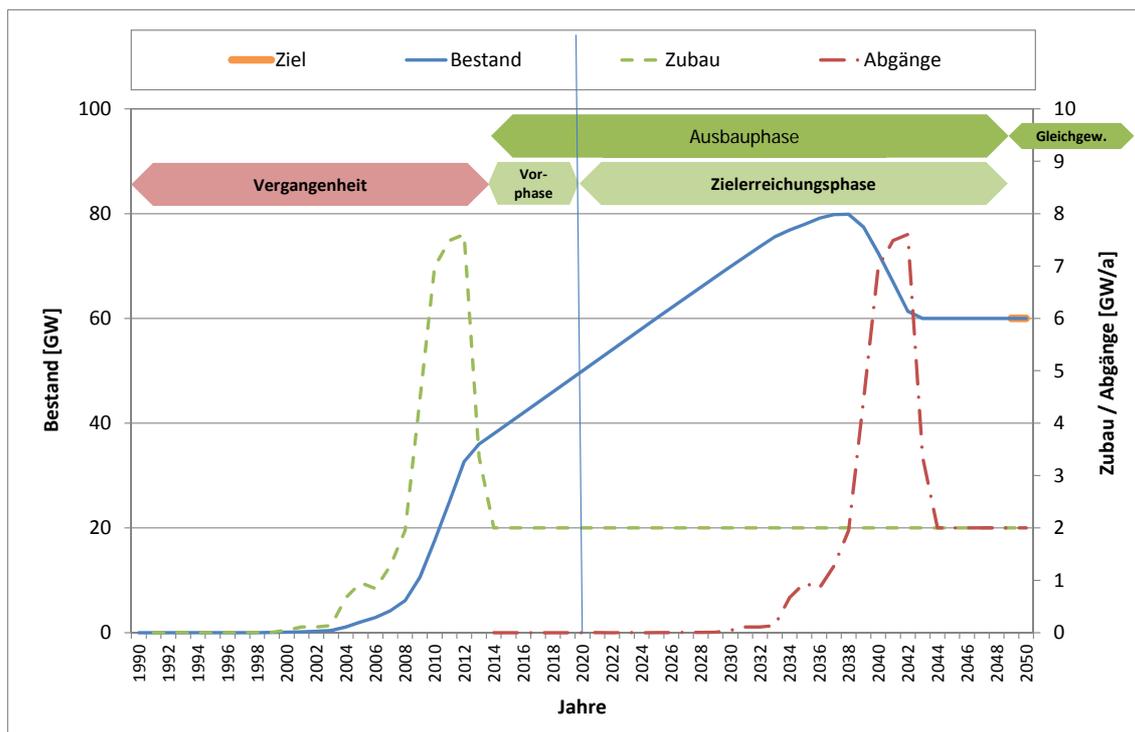


Abbildung 14: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 60 GW in 2050 mit theoretisch notwendiger Rate von 2 GW/a.

Um das Überschwingen des Gesamtbestandes im Zeitraum 2026 bis 2042 zu begrenzen (siehe Abbildung 14), könnte der Zubau der PV beispielsweise zunächst für 15 Jahre auf 1 GW/a (anstelle der idealen 2 GW/a) begrenzt und dann ab 2040 auf 3 GW/a erhöht werden (Abbildung 15). Allerdings würde der Zielwert von 60 GW immer noch deutlich früher – im Jahr 2034 statt 2050 – erreicht und anschließend überschritten werden, bevor die installierte PV-Leistung zwischen 2040 und 2050 zunächst noch einmal abnimmt, um dann 2050 den Zielwert wieder zu erreichen. Da die installierte Kapazität im Zeitverlauf nochmal unter das Zielniveau fällt, sind in Abbildung 15 die Ausbauphase und die Zielerreichungsphase nicht eingetragen.

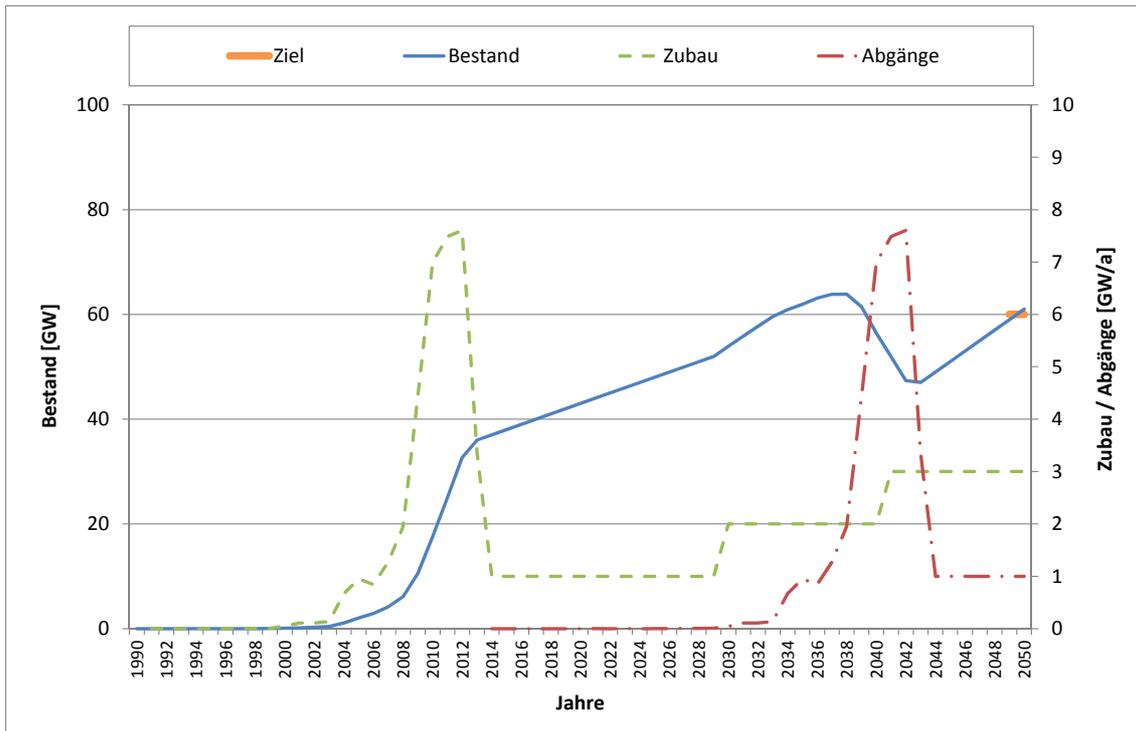


Abbildung 15: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 60 GW in 2050 mit Begrenzung des Überschwingens.

Es bleibt festzuhalten, dass der PV-Boom Anfang der 2010er Jahre langfristige Folgen hat. Bleibt es bei einem weiteren Zubau in der Größenordnung von 2 bis 2,5 GW/a, dann wird das Zielniveau der Bundesregierung von 52 GW deutlich überschritten. Es kommt außerdem zu einem Überschießen über den mit diesen Zubauraten verbundenen Gleichgewichtszustand hinaus.

Wird dagegen versucht, ein Ausbauniveau von 60 GW nicht zu überschreiten, werden Zyklen mit sehr großen Amplituden bei den Zubauraten induziert, die auch über das Jahr 2050 hinaus wirken.



## 2.2 Szenario B – Strombedarf 800 TWh/a

### 2.2.1 Windenergie onshore

Bei sonst gleichen Bedingungen müsste die Zubaurate in der Zielerreichungsphase auf 6,9 GW/a erhöht werden, um das Ausbauziel von 138 GW des Szenarios B mit einem Strombedarf von 800 TWh/a zu erreichen (Abbildung 16). In der Vorphase wird der Zubau wiederum linear auf diesen Wert angehoben.

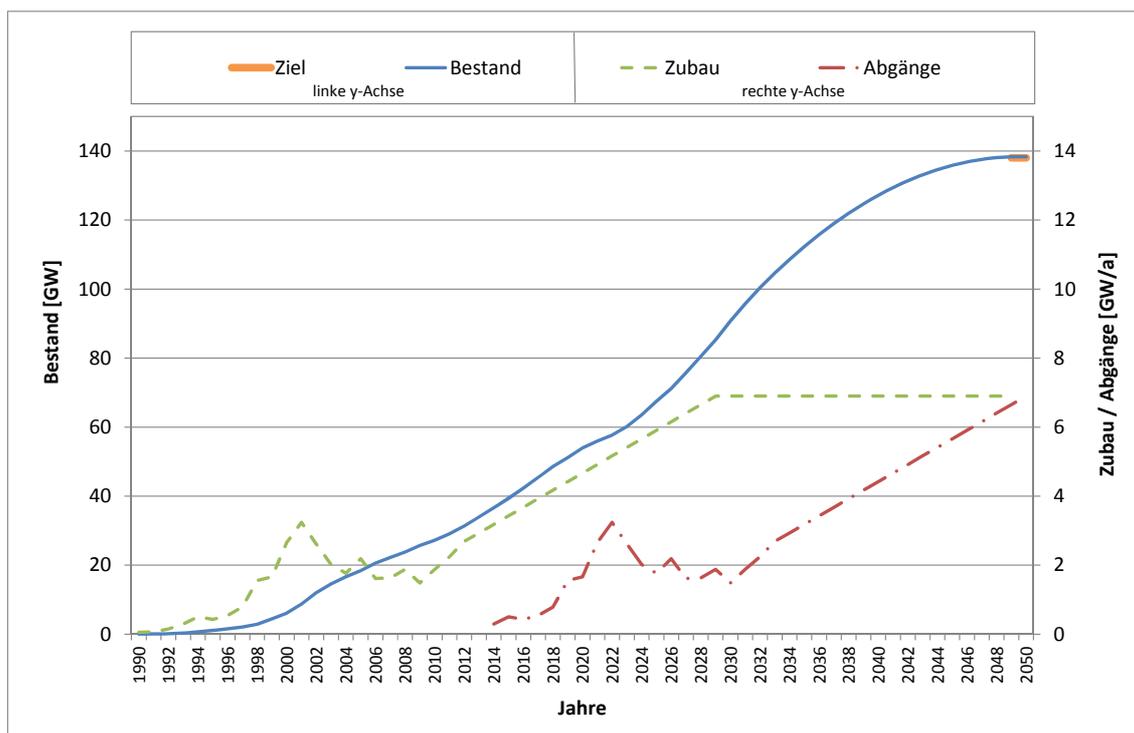


Abbildung 16: Idealer Ausbau der Windenergie an Land auf 138 GW im Zeitraum 2030-2050 und lineare Steigerung der Zubaurate auf den idealen Wert in der Vorphase von heute bis 2029.

### 2.2.2 Windenergie offshore

Um das Ausbauziel des Szenarios B in Höhe von 57 GW bis 2050 umzusetzen, müsste der Zubau ab dem Jahr 2030 2,7 GW/a betragen.

### 2.2.3 Photovoltaik

Um das Ausbauziel des Szenarios B in Höhe von 150 GW zu erreichen, müssten 5 GW/a installiert werden. Einen Zubau auch in dieser Höhe hat es in der Vergangenheit durchaus schon gegeben, so dass er als technisch möglich gelten kann. Bei diesem Ausbauziel führt der dann notwendige Zubau von 5 GW/a nur zu einem geringen Überschwingen von rund 5 GW (Abbildung 17).

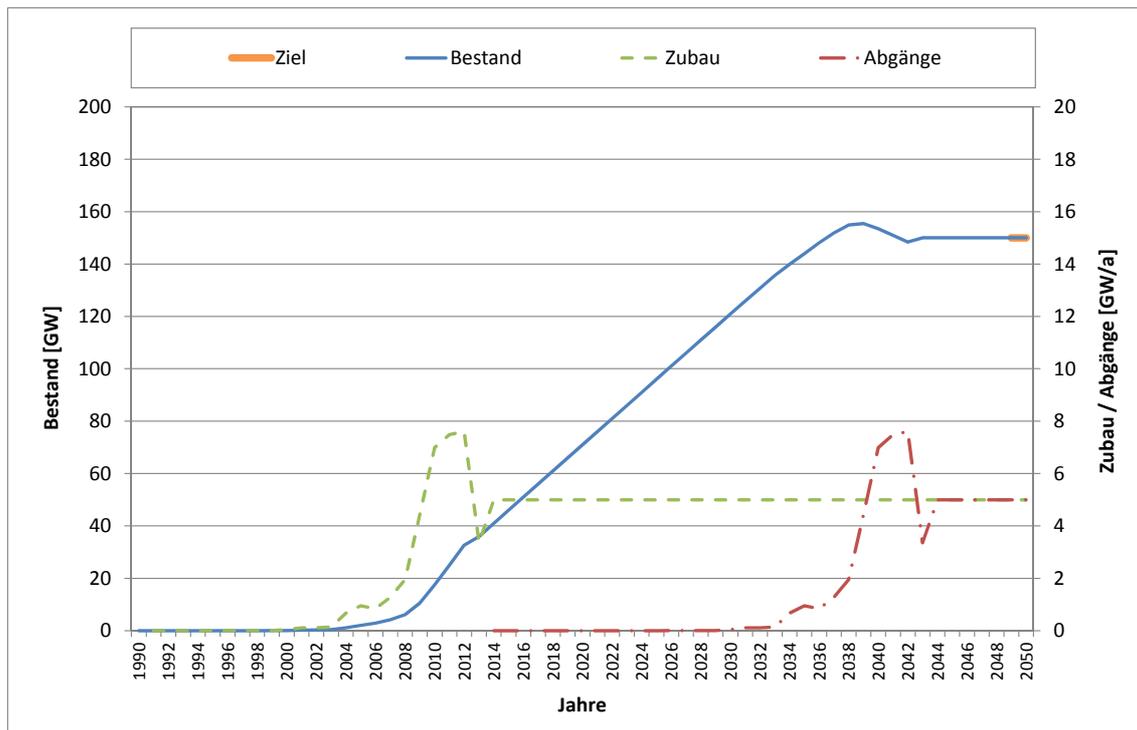


Abbildung 17: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 150 GW in 2050 mit theoretisch notwendiger Rate von 5 GW/a.

## 2.3 Beschleunigung des Ausbaus

Es wird von verschiedenen Seiten gefordert, den Ausbau der erneuerbaren Energien zu beschleunigen und die oben genannten Ausbauziele des EEG-Reformvorschlages schon deutlich früher zu erreichen (z.B. Bündnis90/ Die Grünen 2014).

Aus der theoretischen Analyse in Kap. 1 folgt, dass ein Ausbau oberhalb der idealen Zubauraten zu möglicherweise problematischen Fluktuationen führt.

Will man dies vermeiden, aber dennoch möglichst schnell den Gleichgewichtszustand erreichen, dann sollten die Zubauraten sofort auf den Idealwert gebracht werden.

Dies könnte für die Windenergie an Land schwierig werden. Hier sind bislang nie mehr als 3 GW/a installiert worden, nötig wären aber 4 GW/a. Würde der Zubau ab sofort auf diesen Wert angehoben, so würde sich ab dem Jahr 2034 ein Gleichgewichtszustand auf dem Zielwert von 80 GW einstellen. Will man diesen Wert bereits bis 2030 erreichen, dann muss der Zubau auf bis zu 6 GW/a erhöht werden, was dann aber zu Fluktuationen in den folgenden Jahren führt.

Für die Windenergie offshore wurden für die Vorphase in der Analyse in Kap. 2.1 1,5 GW/a statt der erforderlichen 1,6 GW/a unterstellt. Die Anhebung auf den Idealwert sollte somit keine allzu große Hürde darstellen.

Für die Photovoltaik ist der Wert von 2 GW/a zumindest für Szenario A mit einem Strombedarf von 500 TWh/a in der Vergangenheit überschritten worden, so dass hier eher über eine Begrenzung als eine Erhöhung zu sprechen ist.



## 2.4 Die EEG-Reform 2014

Was lässt sich aus den bisher angestellten Analysen für die Überarbeitung des EEG im Jahr 2014 ableiten?

### 2.4.1 Windenergie onshore

Abbildung 18 zeigt, dass für Windenergie an Land mit der Zubaurate von 2,5 GW/a, die die Bundesregierung anstrebt, bis 2030 ein Niveau von 50 GW erreicht wird, das dann aber nicht überschritten wird. Ein Ausbauziel von 80 GW würde also verfehlt, wenn diese Zubaurate nicht erhöht wird.

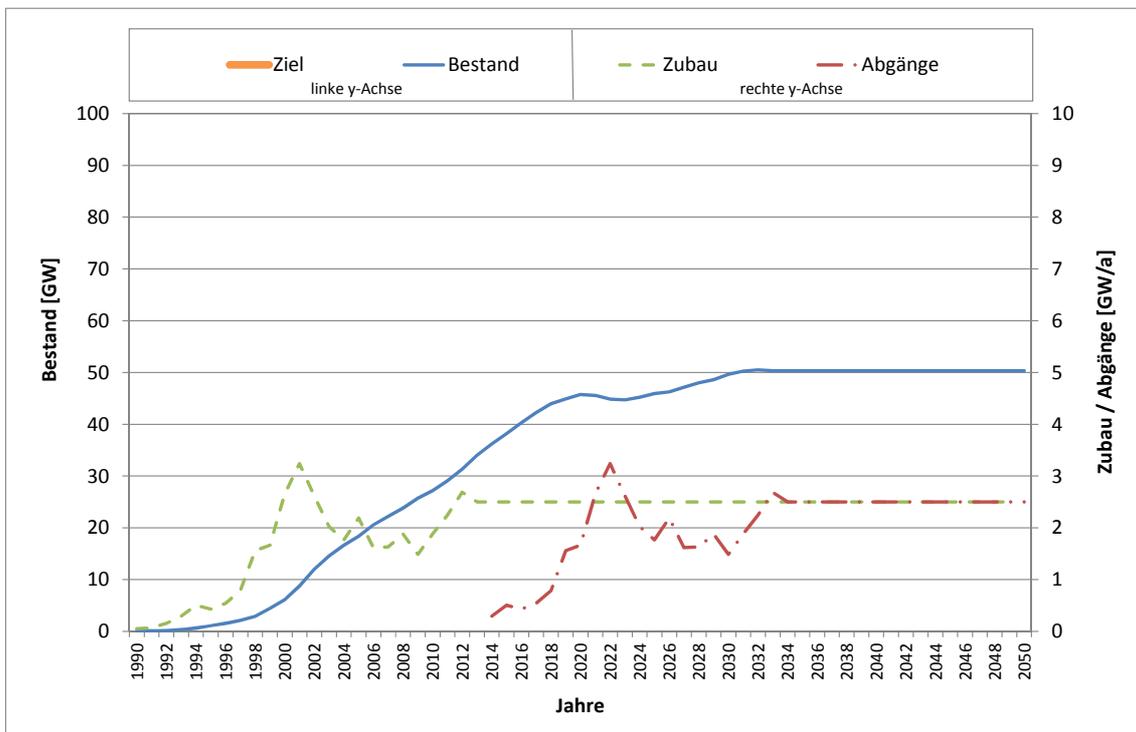


Abbildung 18: Ausbaupfad für Windenergie onshore gemäß Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom Januar 2014.

Sofern das Ziel im Jahr 2050 erreicht werden soll, reicht es aber aus, wenn die Zubaurate im Jahr 2030 den erforderlichen Wert von 4 GW/a erreicht (Abbildung 19) oder bis dahin schrittweise erhöht wird (vgl. Abbildung 12 und Diskussion dort im Text).

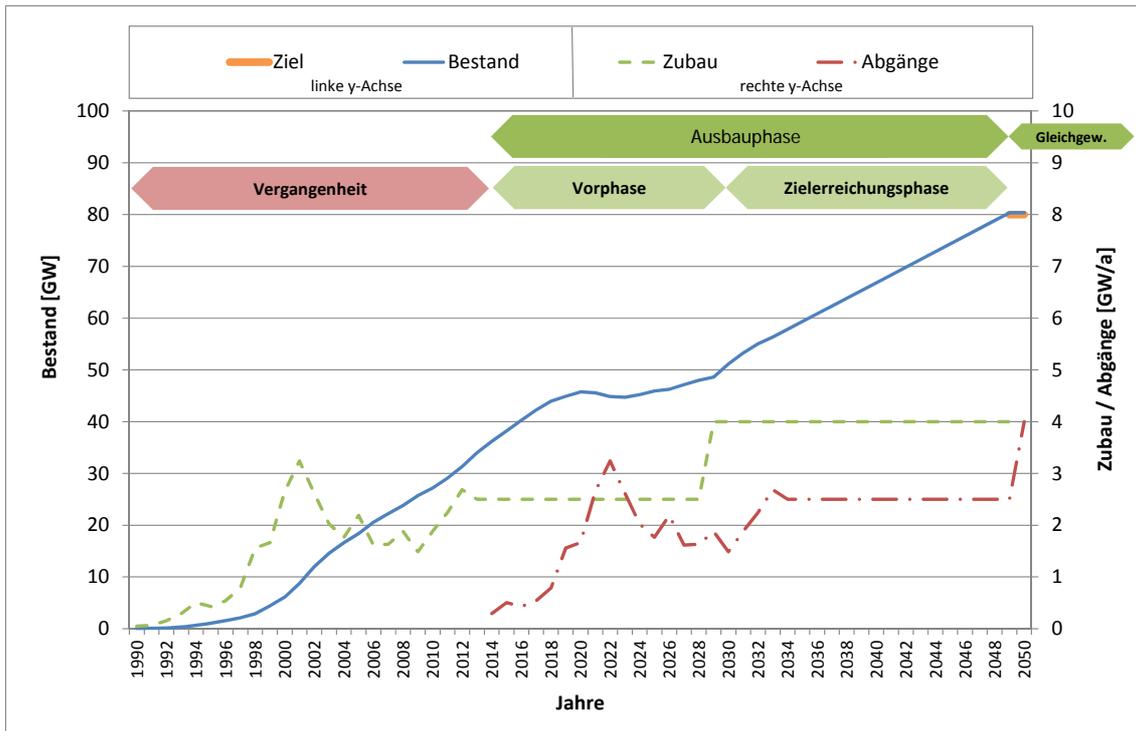


Abbildung 19: Ausbaupfad für Windenergie onshore gemäß Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom Januar 2014 bis 2029 und anschließend Erhöhung der Zubaurate auf den idealen Wert von 2030-2050.

## 2.4.2 Photovoltaik und Windenergie offshore

Unterstellt man für die Photovoltaik die von der Bundesregierung anvisierte Zubaurate von 2,5 GW/a, dann wird im Jahr 2038 bei 92 GW das Maximum der installierten Leistung erreicht, bevor diese dann auf 75 GW zurückfällt. Beides liegt deutlich über dem für Szenario A erforderlichen Ausbauziel von 60 GW.

Für die Windenergie auf See weicht die von der Bundesregierung angestrebte Zubaurate nur geringfügig vom Idealwert ab, mit dem ein Ausbau auf die in Szenario A vorgesehenen 32,5 GW erreicht würde.

Abbildung 20 vergleicht die Ausbauziele der Bundesregierung für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit der Stromerzeugung, die sich aus den im EEG 2014 anvisierten Zubauraten ergibt.

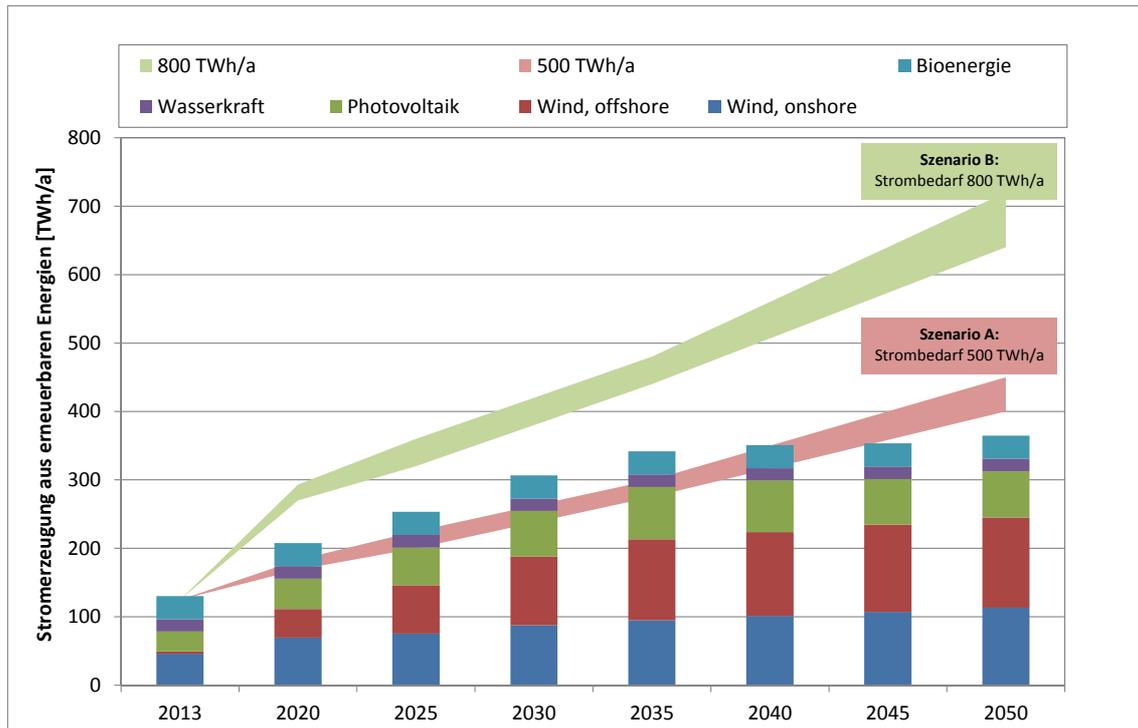


Abbildung 20: Ausbauziele und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bei Einhaltung der vorgesehenen Zubauraten im EEG 2014.

Es ist festzustellen, dass die Ausbauziele und Zubauraten bis zum Jahr 2040 konsistent sind, wenn ein Strombedarf von 500 TWh/a unterstellt wird.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass eine Erhöhung der Zubauraten nicht erst 2040 erfolgen sollte, sondern (für Windenergie) spätestens 2030, um das Zielniveau in 2050 zu erreichen, ohne Fluktuationen beim Zubau zu induzieren.

Wenn jedoch ein Strombedarf von 800 TWh/a bis 2050 zu 80% aus erneuerbaren Energien gedeckt werden soll, dann müssen die Zubauraten aller Technologien deutlich erhöht werden. Allerdings müssen die entsprechenden idealen Zubauraten für die PV erst ab 2020 und für die Windenergie ab 2030 erreicht werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die im Rahmen der anstehenden EEG-Reform vorgeschlagenen Zubauraten im Hinblick auf das Ziel, in 2050 80% des Stroms aus erneuerbaren Energien zu erzeugen, für die nächsten 10 bis 15 Jahre sinnvoll gewählt sind und ein späteres Nachjustieren auf dann für 2050 gewünschte Stromanteile erlauben.



## ANHÄNGE

### Abkürzungen und Glossar

€	Euro
€/MWh	Euro je Megawatt-Stunde 1 €/MWh = 1/10 ct/kWh
a	Jahr
ct	Euro-Cent
ct/kWh	Euro-Cent je Kilowatt-Stunde
EE	Erneuerbare Energie(n)
EE-Anlage	Anlage zur Nutzung von erneuerbaren Energien (hier: zur Stromerzeugung)
EE-Anteil	Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GW	Gigawatt = 1.000 MW
GWh	Gigawatt-Stunde = 1.000 MWh
h	Stunde
kW	Kilowatt = 1.000 Watt
kWh	Kilowatt-Stunde = 1.000 Wattstunden
M€	Millionen €
MW	Megawatt = 1.000 kW
MWh	Megawatt-Stunde = 1.000 kWh
MWh <sub>th</sub>	Megawatt-Stunde (thermischer Energiegehalt, z.B. bei Methan)
PV	Photovoltaik
TWh	Terawatt-Stunde = 1 Million MWh
W	Watt (elektrische Leistung)
Wh	Watt-Stunden (physikalische Arbeit)

### Größenordnungen

c	Centi = $10^{-2}$
k	Kilo = $10^3$
M	Mega = $10^6$
G	Giga = $10^9$
T	Tera = $10^{12}$



## Referenzen

- arrhenius 2014: arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik, Die zukünftigen Kosten der Stromerzeugung, Studie im Auftrag von Germanwatch e.V. und Allianz Climate Solutions GmbH, 2014 (forthcoming).
- Bündnis 90 / Die Grünen 2014: Fraktionsbeschluss vom 17.01.2014 – Eckpunkte für die Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG).
- IWES 2013: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergien für die Energiewende, Studie im Auftrag der Stiftung Offshore-Windenergie, 2013.

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen. ....	5
Tabelle 2: Ideale jährliche Zubaurate in Abhängigkeit vom Ausbauniveau und der Lebensdauer der Anlagen. ....	7
Tabelle 3: Ausziele- und Zubauraten für Windenergie und Photovoltaik in verschiedenen Szenarien..	19

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Idealer Zubaupfad für eine fiktive Technologie zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Zielniveau 100 GW, Lebensdauer der Anlagen 25 Jahre). ....	8
Abbildung 2: Zubau dauerhaft unterhalb der idealen Rate. ....	9
Abbildung 3: Vorübergehend geringerer Zubau als für den idealen Pfad erforderlich. ....	9
Abbildung 4: Kompensation eines Zubaus unterhalb der idealen Rate durch erhöhten Zubau. ....	10
Abbildung 5: Kompensation eines Ausbaus unterhalb der idealen Zubaurate durch erhöhten Zubau ohne Überschreiten der Zielniveaus. ....	11
Abbildung 6: Ausbau dauerhaft oberhalb der idealen Zubaurate. ....	12
Abbildung 7: Vorübergehend höherer Ausbau als beim idealen Pfad. ....	13
Abbildung 8: Zyklen, die durch Deckelung des Zubaus entstehen, wenn das Zielniveau durch Ausbau oberhalb der idealen Zubaurate vorzeitig erreicht wird. ....	14
Abbildung 9: Kompensation eines Ausbaus oberhalb der idealen Zubaurate durch niedrigeren Zubau in den Folgejahren. ....	15
Abbildung 10: Kompensation eines Ausbaus oberhalb der idealen Zubaurate durch niedrigeren Zubau in den Folgejahren ohne Unterschreiten der Zielniveaus. ....	15



Abbildung 11: Aufspaltung der Ausbauphase, wenn die Zeit bis zum Zieljahr länger ist als die Lebensdauer der Anlagen. ....	16
Abbildung 12: Idealer Ausbau der Windenergie an Land auf 80 GW im Zeitraum 2030-2050 und lineare Steigerung der Zubaurate auf den idealen Wert in der Vorphase von heute bis 2029. ...	20
Abbildung 13: Ausbaupfad für Windenergie auf See auf 32,5 GW in 2050. ....	21
Abbildung 14: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 60 GW in 2050 mit theoretisch notwendiger Rate von 2 GW/a. ....	22
Abbildung 15: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 60 GW in 2050 mit Begrenzung des Überschwingens. ....	23
Abbildung 16: Idealer Ausbau der Windenergie an Land auf 138 GW im Zeitraum 2030-2050 und lineare Steigerung der Zubaurate auf den idealen Wert in der Vorphase von heute bis 2029. ...	24
Abbildung 17: Verlauf des Anlagenbestandes der PV bei Ausbau auf 150 GW in 2050 mit theoretisch notwendiger Rate von 5 GW/a. ....	25
Abbildung 18: Ausbaupfad für Windenergie onshore gemäß Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom Januar 2014. ....	26
Abbildung 19: Ausbaupfad für Windenergie onshore gemäß Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom Januar 2014 bis 2029 und anschließend Erhöhung der Zubaurate auf den idealen Wert von 2030-2050. ....	27
Abbildung 20: Ausbauziele und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bei Einhaltung der vorgesehenen Zubauraten im EEG 2014. ....	28