

SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

Analyse

Februar 2015

Wechselwirkungen im Energiesystem Mechanismen – Interaktionen – Beispiele

Florian Ausfelder | Frank-Detlef Drake | Marian Paschke | Ferdi Schüth
Michael Themann | Kurt Wagemann | Hermann-Josef Wagner

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Impressum

Autoren

Dr. Florian Ausfelder
DECHEMA – Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e. V.

Dr. Frank-Detlef Drake
RWE AG

Prof. Dr. Marian Paschke
Universität Hamburg

Prof. Dr. Ferdi Schüth
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung

Michael Themann
Rheinisch-Westfälisches Institut für
Wirtschaftsforschung

Prof. Dr. Kurt Wagemann
DECHEMA – Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e. V.

Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner
Ruhr-Universität Bochum

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Residenz München, Hofgartenstraße 2, 80539 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Empfohlene Zitierweise

Ausfelder, Florian et al.: *Wechselwirkungen im Energiesystem* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft),
München 2015.

Redaktion

Selina Byfield, acatech

Koordination

Dr. Florian Ausfelder, DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.

Gestaltung und Satz

unicommunication.de, Berlin

Druck

koenigsdruck.de, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in EC

Stand: September 2014

ISBN: 978-3-9817048-2-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Wechselwirkungen im Energiesystem

Mechanismen – Interaktionen – Beispiele

Florian Ausfelder | Frank-Detlef Drake | Marian Paschke | Ferdi Schüth
Michael Themann | Kurt Wagemann | Hermann-Josef Wagner

Vorwort

Deutschland hat mit der Energiewende eine der größten, selbstgewählten Herausforderungen der Zukunft in Angriff genommen. Sie ist nichts weniger als der Versuch, die Energieversorgung, die gegenwärtig überwiegend auf der Nutzung fossiler Rohstoffe basiert, weitgehend auf erneuerbare Energien umzustellen. Das Ziel ist es, eine nachhaltigere, sicherere und bezahlbare Energieversorgung zu gewährleisten. Für diese Zielsetzung gibt es einen breiten gesellschaftlichen Konsens. Diese Transformation einer erfolgreichen Industrienation wird auch im Ausland interessiert verfolgt.

Das vorliegende Dokument ist keine politische Bewertung der Energiewende oder deren Ziele. Das Augenmerk liegt auf der Analyse von Effekten, die durch einzelne Maßnahmen im Gesamtsystem entstehen. Diese systemische Sichtweise eröffnet eine neue Perspektive auf den „Maschinenraum“ der Energiewende. Sie erlaubt es zu fragen, ob eine gewählte Maßnahme im Gesamtsystem die in sie, häufig aus isolierter Betrachtung heraus, gesetzten Erwartungen erfüllt oder ob unerwünschte und unvorhergesehene Effekte auftreten. Letztere können die Wirksamkeit einer spezifischen Maßnahme bezüglich der Ziele der Energiewende beeinflussen.

Nach Überzeugung der Autoren ist eine möglichst genaue Kenntnis dieser systemischen Wechselwirkungen die Grundvoraussetzung, um die Energiewende durch Maßnahmen so zu gestalten, dass ihre Ziele möglichst effizient und effektiv erreicht werden. Diese systemorientierte Sichtweise der Analyse kann helfen, zukünftige Anpassungen der Energiewende verstärkt auf Ziele auszurichten und unnötige Belastungen oder unerwünschte Effekte zu vermeiden.



Prof. Dr. Ferdi Schüth
Leiter Ad-hoc-Gruppe „Regelungsgeflecht im Energiesystem“

Inhalt

Zusammenfassung.....	6
Abkürzungen	7
1. Einleitung.....	8
2. Die Ziele von Maßnahmen im Energiesystem	10
3. Relevante Mechanismen im Energiesystem	12
3.1 Europäisches Emissionshandelssystem.....	13
3.2 Förderung der Erneuerbaren Energien (EEG).....	14
3.3 Tarife/Kostenallokation im Energiemarkt.....	18
3.4 Definition des Bilanzraums.....	19
3.5 Kopplung der Energiepreise	19
3.6 Speicherbarkeit von Energieträgern.....	20
3.7 Mechanismen, die zu Rebound-Effekten führen.....	21
4. Zusammenspiel verschiedener Wirkmechanismen.....	22
4.1 Ziele des EEG stehen nicht im Einklang mit den Effekten, die durch die Förderung der dezentralen Photovoltaik entstehen	22
4.2 Betrieb von elektrischen Wärmepumpen wird durch die EEG-Umlage unrentabler	25

5.	Steckbriefe.....	29
5.1	Ziele des EEG stehen nicht im Einklang mit den Effekten, die durch die Förderung der dezentralen Photovoltaik entstehen	29
5.2	Umweltfreundlicher Betrieb von elektrischen Wärmepumpen wird durch die EEG-Umlage unrentabler.....	33
5.3	Sinkende Börsenpreise an der Strombörse kommen nicht beim privaten Endverbraucher an.....	36
5.4	Ausbau der Photovoltaik verteilt Belastungen und Gewinne ungleich.....	40
5.5	Photovoltaik-Ausbau reduziert Wirtschaftlichkeit von Stromspeichern (Pumpspeicherkraftwerke).....	43
5.6	Ausbau kleiner dezentraler KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) erhöht die CO ₂ -Emissionen	45
5.7	Förderung erneuerbarer Energien erhöht die Laufzeit von Kohlekraftwerken	48
5.8	Ausbau von Photovoltaik und Windkraft benötigt das Vorhalten von fossilen Backup-Kraftwerken und Speichern	51
5.9	Die öffentliche Diskussion um den Netzausbau entspricht nicht dem auf verschiedenen Ebenen entstehenden Aufwand	54
5.10	Elektromobilität führt nicht zu einer Erhöhung der CO ₂ -Emissionen im Stromsektor	57
6.	Fazit	62
	Tabellenanhang	64
	Literatur.....	68
	Über das Akademienprojekt.....	73

Zusammenfassung

Ein funktionierendes Energiesystem ist die Grundlage für eine moderne Industriena-tion. Ein vertieftes Verständnis der systemischen Zusammenhänge bildet wiederum die Basis für eine erfolgreiche Energiepolitik hinsichtlich ihrer formulierten Ziele, nämlich Nachhaltigkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Die Entwicklung des Energiesystems wird dabei von komplexen Wechselwirkungen verschiedener Entscheidungen, Maßnahmen und Akteure beeinflusst. Viele dieser Entscheidungen und Maßnahmen sind jeweils mit einer klaren Zielstellung, aber aus einer eingeschränkten Perspektive heraus geplant und implementiert worden. Sie werden in der Regel jedoch nicht der Komplexität der Wechselwirkungen innerhalb des Systems gerecht.

Im Ergebnis greifen die bestehenden und neuen Mechanismen, in Kombination mit den diversen Akteuren, häufig überraschend ineinander und ergeben neuartige, unvorhergesehene Situationen, die den beabsichtigten Effekt einer Maßnahme abschwächen, ins Gegenteil verkehren oder in eine vollständig andere Richtung lenken.

Wesentliche Wirkmechanismen des aktuellen Energiesystems – insbesondere das europäische Emissionshandelssystem und die gesetzliche Förderung erneuerbarer Energien im Stromsektor sowie Kostenallokation, Rebound-Mechanismen, Bilanzräume, die Kopplung von Energiepreisen und die unterschiedliche Speicherbarkeit von Energieträgern – werden im Folgenden näher beschrieben. Es ist allerdings nicht Anspruch dieser Analyse, alle Wirkmechanismen darzustellen.

Anhand einer Reihe von Beispielen, an denen Effizienzverluste aufgrund der unterschiedlichen Mechanismen besonders deutlich werden, wird die Interaktion dieser Mechanismen aufgezeigt. So werden durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) regenerative Energien in Deutschland gefördert, unter anderem mit dem Ziel, CO₂-Emissionen einzusparen. Weil das Europäische Emissionshandelssystem (ETS) den europäischen Emissionen jedoch bereits eine effektive Obergrenze setzt, werden diese Emissionen jedoch lediglich in andere Bereiche (Länder und Wirtschaftssektoren) verschoben, der beabsichtigte Effekt wird nicht erreicht.

Für dieses und weitere Beispiele werden im Folgenden die Mechanismen dargestellt und ihre Wechselwirkung untereinander beschrieben. Die entstehenden Effekte werden erläutert und im Sinne der obigen energiepolitischen Zieltrias analysiert. Je nach Beispiel können die nicht-beabsichtigten Effekte eine wirtschaftliche, technische oder soziale Dimension aufweisen oder mehrere Dimensionen miteinander kombinieren.

Abkürzungen

AusglMechV	Ausgleichsmechanismusverordnung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
CDM	Clean Development Mechanism, Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, kurz Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange (Börse)
EFTA	European Free Trade Association, Europäische Freihandelsassoziation
ESYS	Energiesysteme der Zukunft
ETS	Emission Trading System, Emissionshandelssystem
EU	Europäische Union
ICE	Intercontinental Exchange (Börse)
JI	Joint Implementation, Gemeinschaftsreduktion
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NAP	National Allocation Plan, nationaler Zuteilungsplan
Phelix	Physical Electricity Index, Stromindex
PV	Photovoltaik
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilnetzbetreiber

Einheiten und physikalische Größen

E	Energie
€	Euro
€ct	Eurocent
g	Gramm (Masse)
G	Giga (Präfix) = Milliarden
h	Stunde (Zeit)
k	Kilo (Präfix) = Tausend
l	Liter (Volumen)
m	Meter (Länge)
M	Mega (Präfix) = Millionen
t	Tonne (Masse)
T	Tera (Präfix) = Billionen
P	Leistung
W	Watt (Leistung)
Wh	Wattstunde (Energie)
Wh_{Wärme}	Wattstunde Wärme (Energie)
Wh_{REG}	Wattstunde regenerative (Energie)
W_p	Watt Peak (Leistung)

1. Einleitung

Ein funktionierendes Energiesystem ist die elementare Grundvoraussetzung für die Befriedigung individueller und gesellschaftlicher Bedürfnisse in einer modernen Industrienation und bildet eine der Grundlagen für nachhaltigen Wohlstand.

Das Energiesystem ist hochkomplex – entstanden und sich ständig ändernd durch einen kombinierten politisch-wirtschaftlich-gesellschaftlich-technischen Prozess. Gesetzgeberische oder regulatorische Maßnahmen versuchen steuernd in dieses System einzugreifen und bestimmte politische Leitlinien und Zielsetzungen zu etablieren. Neben dem technischen Aufbau ist das Energiesystem insbesondere durch die wirtschaftlich-regulatorischen Rahmenbedingungen und die Interaktionen der verschiedenen Akteure geprägt. So steigt im Zuge der Energiewende die Zahl der miteinander wechselwirkenden Akteure (viele dezentrale Produzenten statt wenige große Energieversorger, Unternehmen, die dezentrale Produzenten aggregieren etc.) und damit der Grad der Vernetzung und die Interdependenz zwischen den Akteuren.

Der Komplexität des Systems wird in der Ausgestaltung von Maßnahmen oft nur unzureichend Rechnung getragen. Dies erschwert es erheblich, die Effekte einer Maßnahme auf andere Bereiche des Energiesystems *a priori* zu identifizieren und quantitativ abzuschätzen.

Dies gilt insbesondere für solche Effekte, die nicht im Fokus der Maßnahme stehen. So treten in der Umsetzung häufig nicht-intendierte Effekte auf, die unter Umständen dazu führen, dass die

geplante Zielsetzung verfehlt wird, Konflikte zu anderen Zielsetzungen offenbar werden oder die relative Bedeutung der Akteure in dem System sich sprunghaft ändert.

Ein gegebenes Energiesystem führt aus seiner Struktur heraus zu einer De-facto-Priorisierung von Zielsetzungen. Unter den gegebenen Bedingungen werden bestimmte Zielvorgaben relativ zu den anderen mehr oder weniger erreicht. Dies ist häufig unabhängig davon, ob politisch explizit eine Priorisierung vorgenommen wurde.

Die vorliegende Analyse hat zum Ziel, anhand einer Reihe von Beispielen dafür zu sensibilisieren, dass die Zusammenhänge – auf technischer, wirtschaftlicher, rechtlicher und gesellschaftlicher Ebene – so vielfältig und komplex sind, dass Eingriffe in das System vielfach den gewünschten Effekt nicht oder nicht vollständig erzielen oder sogar ins Gegenteil verkehren. Außerdem werden häufig nicht-intendierte Folgen in anderen Bereichen ausgelöst. In Kenntnis dieser Komplexität und der Durchdringung der Zusammenhänge könnte eine bessere Steuerung des Energiesystems möglich werden, besonders in einer Phase starker Veränderungen, wie wir sie derzeit in Deutschland erleben.

Zunächst werden die Ziele, denen eine Energie(system)politik dienen kann, kurz dargestellt und reflektiert. Es werden dann für den Zweck dieses Papiers sechs Ziele formuliert, von denen die Autoren annehmen, dass sie von Politik und Gesellschaft für wesentlich gehalten werden

und die durch die Struktur des Energiesystems erreicht werden sollen. Eine solche Zielsetzung ist niemals unumstritten, auch die Gewichtung der Ziele wird von verschiedenen Akteuren unterschiedlich vorgenommen. Eine separate Analyse, die sich mit dem Problem der Zielformulierung beschäftigt, wird im Rahmen des Akademienprojektes „Energiesysteme der Zukunft“ vorbereitet.¹ Auf die hier angenommenen Ziele sind aber offenbar viele Maßnahmen ausgerichtet. In jedem Falle führt der Versuch, mehrere konkurrierende Ziele zu erreichen, typischerweise zu Konflikten.

Darauf folgend werden die wichtigsten Wirkmechanismen im Energiesystem und ihre Auswirkungen nach dem gegenwärtigem Stand beschrieben. Die isolierte Betrachtung einzelner Wirkmechanismen ist zum Verständnis hilfreich, wenn auch die Komplexität des Energiesystems im Wesentlichen durch die Verzahnung der verschiedenen Wirkmechanismen entsteht.

Diese Verzahnung und die daraus entstehenden – zum Teil kontraintuitiven – Wirkungen von Maßnahmen werden dann anhand von ausgewählten Beispielen aus unterschiedlichen Bereichen des Energiesystems dargestellt. Bei der Auswahl der Beispiele wurde darauf geachtet, dass die Zusammenhänge trotz ihrer Komplexität möglichst deutlich werden. Darüber hinaus decken die Beispiele nicht nur den Bereich der elektrischen Energie ab, der derzeit im Vordergrund der Diskussion steht, sondern adressieren auch die Themen Wärme und Mobilität.

Die Liste der Beispiele ist sicherlich unvollständig, und die Diskussion erhebt nicht den Anspruch, den jeweiligen Sachverhalt abschließend zu behandeln. Allerdings beleuchten die Beispiele

schlaglichtartig die komplexen Zusammenhänge und zeigen die wirkenden Mechanismen in ihrer Wechselwirkung. Sie verdeutlichen somit die komplexen Systemzusammenhänge im Energiesystem und die Notwendigkeit, Eingriffe in dieses System mit größter Sorgfalt zu planen und Folgen auch jenseits der Sphäre des unmittelbaren Eingriffs zu berücksichtigen. Die Beispiele werden in ihren Wirkungen auf die verschiedenen Ziele des Energiesystems jeweils als neutral, positiv oder negativ bewertet.

¹ Umbach 2015.

2. Die Ziele von Maßnahmen im Energiesystem

Das Energiesystem ist jenseits der rein technischen Ebene eine komplexe Struktur, beeinflusst durch ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen und Regelungen, die seine Ausgestaltung bestimmen, Entwicklungsmöglichkeiten eröffnen, aber auch zu inneren Widersprüchen und Zielkonflikten führen.

Wenn klare Ziele formuliert sind, kann ein Energiesystem darauf hin analysiert werden, ob es dazu dient, die erklärten Ziele der Energiepolitik zu erreichen. Allerdings ist fraglich, wie präzise in Deutschland und auch auf europäischer Ebene die Ziele der Energiepolitik formuliert sind. Im Rahmen des gemeinsamen Projektes der wissenschaftlichen Akademien² „Energiesysteme der Zukunft“ wird diese Zielsetzung der Energiepolitik in dem Dokument mit dem Titel „Priorisierung der Ziele“ ausführlich charakterisiert und analysiert.³ Selbstverständlich muss berücksichtigt werden, dass eine eventuell vorgenommene politische Priorisierung der Ziele immer abhängig von ökonomischen Gegebenheiten und politischen Wahrnehmungen und damit niemals statisch ist. Daher sollte ein Energiesystem idealerweise adaptionsfähig sein.

Das vorliegende Dokument legt seinen Schwerpunkt auf eine Analyse der Effekte, die energiepolitische Maßnahmen und Gegebenheiten des Energiesystems bezüglich der offiziell formulierten Ziele der Energiepolitik (energiepolitische

Trias oder energiepolitisches Zieldreieck), nämlich Versorgungssicherheit, Klima- und Umweltverträglichkeit sowie Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit (im Folgenden weiter präzisiert in jeweils zwei Teilziele), entfalten.

Jedem der einzelnen Ziele kann man unter kompletter Vernachlässigung der jeweils anderen Ziele nahekommen. Zwar sind auch Maßnahmen vorstellbar, die zur gleichzeitigen Erreichung aller Ziele beitragen, in der Praxis wirken jedoch häufig Maßnahmen, die die Realisierung eines Ziels erlauben, negativ in Bezug auf die anderen Ziele. Im Sinne einer Gesamtoptimierung müssen daher Kompromisse in kleinerem oder größerem Umfang eingegangen werden. Ein Beispiel dafür ist der Ausbau von Wind- und Solarenergie, um CO₂-Emissionen zu reduzieren – allerdings zu erhöhten Kosten gegenüber fossilen Energietechnologien.

Die Bewertungen der Effekte einzelner Wirkmechanismen (vergleiche Kapitel 3) werden in den Steckbriefen (vergleiche Kapitel 5) für jedes der Ziele im energiepolitischen Zieldreieck in Bezug auf jeweils zwei von den Autoren als prioritär gesehene Teilziele qualitativ vorgenommen. Dadurch wird insgesamt ein Sechseck, wie in Abbildung 1 dargestellt, mit folgenden Teilzielen aufgespannt: „Systemstabilität“ und „Verfügbarkeit von Energierohstoffen“ für die „Versorgungssicherheit“, „Klimaschutz“ und „Ressourcenschutz“ für „Klima- und Umweltverträglichkeit“ sowie „Wettbewerbsfähigkeit der Industrie“ und „Bezahlbarkeit für den Endverbraucher“ für das Ziel „Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit“.

² Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acadtech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.

³ Umbach 2015.

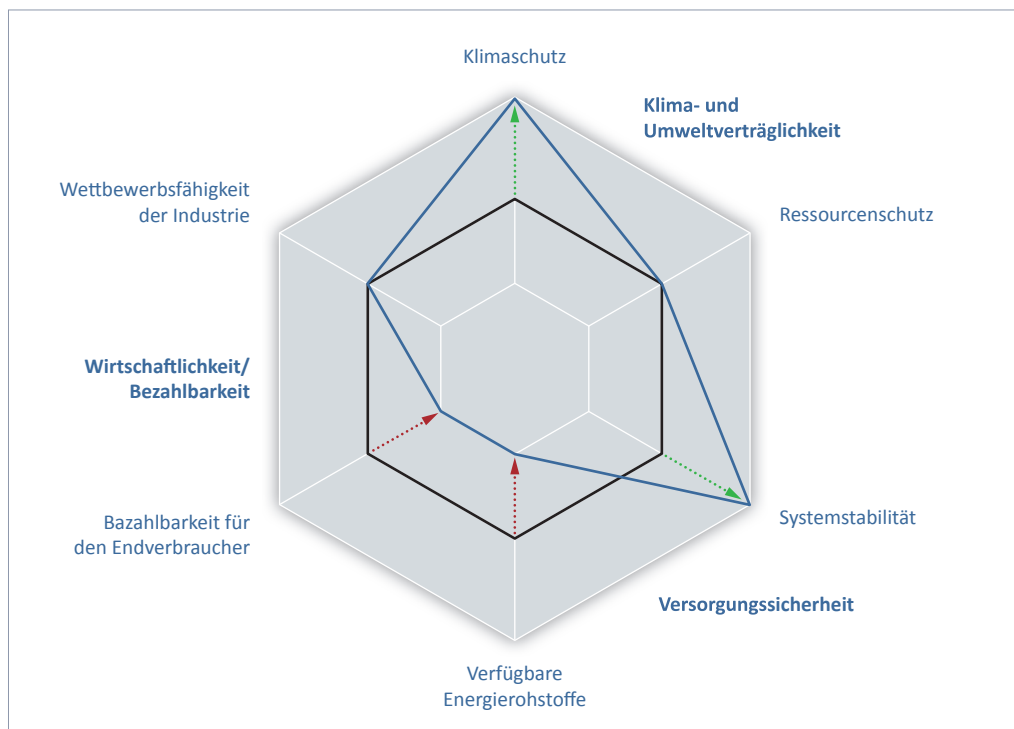


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Analyse einer Maßnahme bezüglich der Ziele des energiepolitischen Zieldreiecks. Die Ausgangssituation ist durch das zentrale schwarze Sechseck gegeben. Das eingeschriebene und das äußere graue Sechseck stellen Verschlechterungen beziehungsweise Verbesserungen in Bezug auf den Ausgangszustand dar. Die qualitativen Effekte der Maßnahme sind durch farbige Pfeile gekennzeichnet. Rote Pfeile, die in das Zentrum zeigen, stellen eine Verschlechterung des betrachteten Parameters dar, während grüne Pfeile, die nach außen zeigen, eine Verbesserung des Parameters anzeigen. In diesem Beispiel führt die Maßnahme zu einer Verbesserung der betrachteten Parameter Systemstabilität und Klimaschutz, aber gleichzeitig zu einer Verschlechterung bei den Parametern der Bezahlbarkeit für den Endverbraucher und der Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Die Maßnahme hat keinen Einfluss auf die Parameter Ressourcenschutz und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie. Die Darstellung soll lediglich die Richtung eines Effekts illustrieren und ist nicht quantitativ zu interpretieren.

3. Relevante Mechanismen im Energiesystem

Das Energiesystem ist von einer hohen Komplexität und durch die Interaktion von technischen, wirtschaftlichen, regulatorischen und gesellschaftlichen Zusammenhängen gekennzeichnet. In diesem Kapitel werden wichtige Wirkmechanismen und ihre Auswirkungen allgemein beschrieben. Tabelle 1 verknüpft die verschiedenen Mechanismen mit den Bereichen, in denen sie vornehmlich angesiedelt sind und wirken.

Die Liste der Mechanismen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, denn das primäre Ziel dieser Darstellung ist die Sensibilisierung für die Komplexität des Systems. Der Fokus der vorliegenden Analyse liegt vornehmlich auf den techno-ökonomischen Aspekten des Energiesystems, da hier Kausalzusammenhänge besonders deutlich sichtbar werden. Die

Autoren sind sich aber bewusst darüber, dass das Energiesystem von zahlreichen Akteuren geprägt ist, deren Verhalten die Entwicklung stark beeinflussen kann. Diese Einflüsse zu analysieren, bleibt allerdings einer späteren Veröffentlichung vorbehalten, in der insbesondere die gesellschaftlichen Gesichtspunkte verstärkt in die Analyse einbezogen werden.

Außerdem sollte berücksichtigt werden, dass die im Folgenden diskutierten Effekte häufig vereinfachend als monokausal (wenn A dann B) dargestellt werden. Aufgrund der Komplexität des Systems müssen aber in den meisten Fällen weitere Bedingungen erfüllt sein beziehungsweise es gelten Ceteris-paribus-Klauseln („unter sonst gleichen Bedingungen“). Hierauf wird nicht gesondert hingewiesen.

Mechanismus	Regulatorisch	Technisch	Wirtschaftlich	Gesellschaftlich
Europäisches Emissionshandelssystem (ETS)	X			
Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)	X			
Speicherbarkeit		X		
Tarife/Kostenallokation	X		X	
Bilanzräume	X		X	
Kopplung der Energiepreise		X	X	
Rebound-Effekte		X	X	X

Tabelle 1: Übersicht über die diskutierten Wirkmechanismen.

3.1 Europäisches Emissionshandelssystem

Das Europäische Emissionshandelssystem (Emissions Trading System, ETS) ist der zentrale Mechanismus zur Erreichung der Emissionsziele innerhalb der Europäischen Union (EU). Sie wurden im Rahmen des Kyoto-Protokolls (verabschiedet 1997, in Kraft getreten 16.02.2005) vereinbart.⁴ Die Emissionsziele berücksichtigen verschiedene Treibhausgase.⁵

Der zentrale Prozess des Emissionshandels ist das sogenannte „cap and trade“: Es wird jährlich nur eine begrenzte Anzahl an Emissionszertifikaten zugewiesen oder versteigert.⁶ Als direkte Folge ist die Höchstmenge (Cap) der erlaubten Emissionen von Treibhausgasen innerhalb des Handelssystems festgelegt. Ein Emissionszertifikat (kurz: Zertifikat) erlaubt die Emission von einer Tonne CO₂ oder der entsprechenden Menge an anderen Treibhausgasen. Die im Emissionshandel eingebundenen Akteure können diese Zertifikate innerhalb einer festgelegten Handelsperiode frei untereinander handeln (Trade). Jeder Anlagenbetreiber muss für seinen Ausstoß an Treibhausgasen die entsprechende Menge an Zertifikaten vorweisen, die dann dem Handel entzogen werden, sonst werden Strafzahlungen⁷ fällig. Der damit festgelegte Preis für die Emission führt dann dazu, dass jene emissionsmindernden Maßnahmen, die günstiger sind als der zu erwartende äquivalente Zertifikatepreis, umgesetzt werden.

Das ETS wird in Handelsphasen gegliedert. An der ersten Phase des Handelssystems von 2005 bis 2007 nahmen der Energiesektor (Strom und Wärme) sowie einige energieintensive industrielle Prozesse teil. Die Menge an Zertifikaten wurde in Absprache mit den Stakeholdern auf Basis nationaler Allokationspläne (NAP) festgelegt und zugeteilt. Das führte zu einer deutlichen Überallokation an Zertifikaten. Der Zertifikatepreis fiel am Ende der Handelsperiode auf null, da die Zertifikate nicht in die zweite Phase übertragen werden konnten.

Die verifizierten Emissionen der ersten Phase bildeten die Basis für die Allokation in der zweiten Phase (2008 bis 2012). Die kostenlose Zuteilung erzeugte beträchtliche Zusatzgewinne für die betroffenen Unternehmen.⁸ Einige Staaten versteigerten die verbliebenen Zertifikate. Außer den EU-Mitgliedsstaaten nehmen ab der zweiten Phase auch die Mitgliedsstaaten der Europäischen Freihandelsassoziation (EFTA) am ETS teil. Die Emissionen können darüber hinaus durch zugeteilte oder zugekaufte Zertifikate innerhalb des ETS oder durch internationale Klimaschutzanstrengungen kompensiert werden.⁹

Der Flugverkehr wurde Anfang 2012 in das ETS integriert. Er erhält 85 Prozent der Zertifikate auf Basis von 97 Prozent der historischen Emissionen kostenlos zugeteilt. Es werden aktuell nur Flüge innerhalb des Geltungsbereichs des ETS berücksichtigt. Die Einbeziehung des Schiffsverkehrs in das ETS ist noch nicht erfolgt. Der Vorschlag der entsprechenden Verordnung vom 28.6.2013 (COM(2013) 480 final) ist noch nicht in Kraft getreten.¹⁰

In der dritten Phase des ETS (2013-2020) müssen Anlagen aus dem Energie-

4 UNO 1997.

5 Die Liste der Treibhausgase umfasst (im Fettdruck: Gase, die im ETS während der dritten Phase berücksichtigt werden): **Kohlendioxid (CO₂)**, Methan (CH₄), **D Stickstoffoxid/Lachgas (N₂O)**, Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), **Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC)**, Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃).

6 Die Versteigerungen werden über die akkreditierten Börsen European Energy Exchange (EEX) in Leipzig oder ICE Futures Europe, London, abgewickelt.

7 40 €/tCO₂ in der ersten Handelsperiode, 100 €/tCO₂ ab der zweiten Handelsperiode.

8 Öko-Institut/WWF 2011.

9 Der Clean Development Mechanism (CDM) adressiert Aktivitäten in Entwicklungsländern, während Joint Implementation (JI) Aktivitäten in Industrieländern berücksichtigt.

10 EU 2013-1.

sektor sämtliche Zertifikate kaufen, sofern sie nicht unter Sonderregelungen fallen.¹¹ Industrieanlagen erhalten 80 Prozent der Zertifikate auf Basis der 10 Prozent der effizientesten Anlagen eines Prozesses (Benchmarking) zugeteilt. Dieser Anteil reduziert sich um 7,14 Prozent-Punkte jährlich auf 30 Prozent bis 2020.¹² Für energieintensive Industrieanlagen im internationalen Wettbewerb werden weiterhin Zertifikate in Höhe des jeweiligen Benchmarks kostenfrei zugeteilt.¹³ Industrieanlagen mit einer Leistung über 20 MW sind emissionshandlungspflichtig.¹⁴ Außerdem ist ein Großteil der Grundstoffindustrie emissionshandlungspflichtig.¹⁵ In Abbildung 2 ist eine schematische Übersicht über die betroffenen Sektoren dargestellt. Die kostenlose Allokation von Zertifikaten für die energieintensive Industrie in Deutschland hat in der Vergangenheit die Emissionen deutlich überstiegen. So wurde von 2008 bis 2012 insgesamt ein Zuteilungsüberschuss von rund 101,3 Millionen Zertifikaten erreicht.¹⁶

Die zweite Phase litt unter einer erheblichen Überallokation an Zertifikaten. Für die dritte Phase wurde die Anzahl der Zertifikate um 6,5 Prozent reduziert und eine jährliche Abnahme um 1,74 Prozent eingeführt. Diese Maßnahmen konnten jedoch den Rückgang der Nachfrage durch die schwierige wirtschaftliche Situation der Teilnehmerstaaten nicht kompensieren. Beim Übergang von der zweiten in die dritte Phase (2012/2013) wurde

das Problem der Überallokation besonders akut. Insgesamt sind aktuell rund zwei Milliarden Zertifikate mehr im ETS, als für die jährlichen Emissionen benötigt werden.^{17,18} Der aktuelle Überschuss entspricht in etwa der jährlichen Emissionsmenge der im ETS erfassten Anlagen. Der Zertifikatspreis lag in den ersten Jahren des ETS zwischen 10 und 20 €/t CO₂, aktuell liegt er bei ca. 5 €/t CO₂.

Um den Zertifikatspreis zu stabilisieren, werden 900 Millionen Zertifikate zeitlich versetzt in den Markt eingebracht.^{19,20} Dieser Vorgang („back-loading“) reduziert nicht die Gesamtmenge an Zertifikaten in einer Handelsperiode, sondern verschiebt nur deren zeitlichen Eintrag in das Handelssystem.

Das ETS erfasst gegenwärtig rund 53 Prozent der Treibhausgasemissionen in Europa. Eine tabellarische Übersicht über die ETS-Handelsperioden ist in Tabelle 5 im Tabellenanhang zusammengestellt.

Das ETS erfüllt seine Funktion in der Regulierung der CO₂-Emissionen innerhalb der berücksichtigten Sektoren. Durch das Handelssystem wird ein Preis für die Emission von CO₂ definiert und der durch den Cap gesetzte Deckel an Gesamtemissionen wird eingehalten.

Soll das ETS hingegen über die reine Emissionsreduktion hinaus auch Innovationsanreize zur Entwicklung von emissionsarmen Technologien geben, so ist angesichts der Überallokation von Zertifikaten und des damit einhergehenden geringen Preises der Zertifikate unklar, ob das ETS derzeit diese zusätzliche Steuerungswirkung entfaltet. Ein reformiertes Marktdesign des ETS könnte diese Steuerungswirkung über den Zertifikatspreis verbessern.

11 Für Anlagen unter 25 MW Feuerungsleistung sind Ausnahmen möglich. In Sonderfällen können auch dem Energiesektor kostenlose Zertifikate zugeteilt werden, wenn gleichzeitig mindestens äquivalente Investitionen im Energiesektor vorgenommen werden. Für die Bereitstellung von Wärmeleistung können auch weiterhin Zertifikate kostenlos allokiert werden.

12 EU 2011.

13 Ausnahmen gibt es für Anlagen, um das „Carbon Leakage“, das heißt die Abwanderung energieintensiver Industriezweige aus dem ETS, zu verhindern. Anlagen, die den Benchmarkwert einhalten, erhalten die Zertifikate vollständig kostenlos zugewiesen. Schlechtere Anlagen erhalten proportional weniger kostenfreie Zertifikate.

14 Ausgenommen sind Anlagen, die hauptsächlich Biomasse, Siedlungsabfälle und gefährliche Stoffe zur Verbrennung einsetzen.

15 EU 2012-1.

16 DEHSt 2013.

17 EU 2014-1.

18 EU 2012-2.

19 EU 2013-2.

20 EU 2014-2.

Auswirkungen und Effekte

- Eine Erhöhung der Emissionen in einem am Emissionshandel beteiligten Sektor führt nicht zu einer Erhöhung der Gesamtemissionen im ETS, da diese durch das Cap gedeckelt sind, sondern zu einer Erhöhung des Zertifikatepreises. Umgekehrt führen geringere Emissionen ebenfalls nur zu einem geringeren Zertifikatepreis.
- Ein hoher Zertifikatepreis führt dazu, dass emissionsintensive Anlagen sich relativ verteuern. Umgekehrt ist in Zeiten schwacher wirtschaftlicher Dynamik ein niedriger Zertifikatepreis zu erwarten und emissionsintensive Anlagen sind weiterhin relativ konkurrenzfähig. Das Handelssystem führt mit dem Cap nicht nur zu einer oberen Grenze an Emissionen, sondern de facto auch zu einer unteren Grenze. Mit dem Cap wird eine höhere Menge an Gesamtemissionen ebenso wie eine deutlich niedrigere Menge verhindert.
- Dies führt prinzipiell zu einem stabilisierenden Effekt für die Wirtschaft innerhalb der ETS-Zone, da Zusatzbelastungen in Form hoher Zertifikatepreise eher in Zeiten starker wirtschaftlicher Dynamik anfallen, die dann einen Anreiz für die Investitionen in emissionsärmere Technologien geben. Im Falle einer asymmetrischen wirtschaftlichen Entwicklung innerhalb der ETS-Zone treten lokal unterschiedliche Effekte auf.
- Ein Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien führt ebenfalls zu einem niedrigeren Zertifikatepreis und emissionsintensive Technologien bleiben weiterhin wettbewerbsfähig. Der Ausstieg aus der Kernenergie hat keine Auswirkungen auf die Gesamtemissionen im ETS, führt aber zu einer Erhöhung des Zertifikatepreises, da die Kraftwerksleistung zumindest teilweise durch fossile Kraftwerke kompensiert werden muss.
- Das ETS sorgt für gleiche Bedingungen für die Teilnehmer innerhalb des Systems. Gegenüber Wettbewerbern außerhalb des ETS haben diese jedoch einen Wettbewerbsnachteil. Dies gilt sowohl im internationalen Wettbewerb als auch innerhalb des geografischen Wirkungsradius des ETS, wenn zum Beispiel ein Sektor nur teilweise durch das ETS erfasst ist. So nehmen die Kraftwerke des elektrifizierten Schienenverkehrs am ETS teil, während der private Automobilverkehr nicht eingebunden ist und der Flugverkehr fast alle Zertifikate kostenlos zugeteilt bekommt. Eine starke Nachfrage nach Zertifikaten aus Sektoren, die nur innerhalb des Gültigkeitsrahmens des ETS im Wettbewerb zueinander stehen, hat einen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Industriezweige, die im externen Wettbewerb stehen.

3.2 Förderung der Erneuerbaren Energien (EEG)

Viele Länder fördern den Ausbau der erneuerbaren Energien durch spezielle Instrumente. In Deutschland übernimmt das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, kurz Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) seit 2000 diese Funktion. Die gegenwärtig gültige Fassung ist seit August 2014 in Kraft.²¹ Das EEG garantiert den vorrangigen Anschluss und die Abnahme von Strom aus erneuerbaren Energien sowie eine technologiespezifische Vergütung.

Das EEG hat als erklärte Ziele, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung unter Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten zu unterstützen, fossile Ressourcen zu schonen und Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien weiterzuentwickeln.

Hintergrund ist die Verpflichtung Deutschlands im Rahmen des Kyoto-Protokolls, den Anteil an erneuerbaren Energien in der Stromversorgung bis 2050 auf 80 Prozent auszubauen.²²

²¹ EEG 2014.

²² UNO 1997.

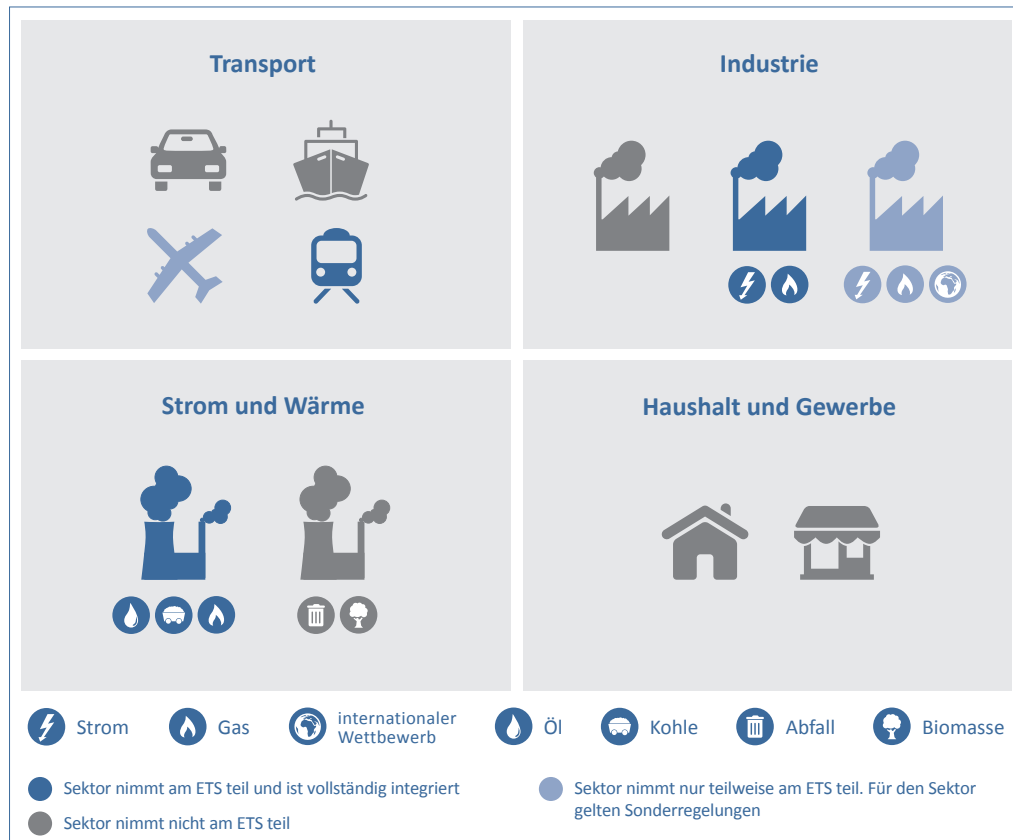


Abbildung 2: Übersicht der Sektoren im Emissionshandelssystem (ETS). Die Sektoren, die durch blau hinterlegte Symbole dargestellt werden, nehmen am ETS teil. Im Energiesektor nehmen Kraftwerke in vollem Umfang am Emissionshandel teil, soweit sie nicht mit Biomasse oder Abfällen befeuert werden. Im Verkehrssektor ist der elektrifizierte Schienenverkehr über seine Kraftwerke ebenfalls eingebunden. Im Flugverkehr sind nur Flüge innerhalb des ETS-Gebiets betroffen. Hierfür werden auf Basis von 97 Prozent Emissionen der Jahre 2004-2006 Zertifikate im Umfang von 85 Prozent kostenlos zugeteilt. Der energieintensive Industriesektor nimmt am Emissionshandel teil und erhält 80 Prozent der Zertifikate auf Basis eines Benchmarks, der jeweils 10 Prozent effizientesten Prozesse, kostenlos zugeteilt. Dieser Anteil sinkt im Laufe der dritten Handelsperiode auf 30 Prozent. Energieintensive Produktionsprozesse, deren internationale Wettbewerbsfähigkeit durch die zusätzlichen Kosten des Emissionshandels gefährdet wäre, erhalten die benötigten Zertifikate weiterhin kostenlos. Haushalte und Gewerbe sind nicht direkt im ETS eingebunden.

Ein Vergütungsanspruch besteht, wenn der Anlagenbetreiber seinen gesamten erzeugten Strom mit Ausnahme des Eigenbedarfs dem Netzbetreiber zur Verfügung stellt. Der Anlagenbetreiber kann seinen Strom auch direkt vermarkten. Die Vergütung wird durch den Zeitpunkt der Inbetriebnahme bestimmt und für die folgenden 20 Kalenderjahre gezahlt.

Entscheidet sich ein Anlagenbetreiber für die Direktvermarktung, so erhält er eine Marktprämie, die sich aus der Differenz des durchschnittlichen Strompreises zur EEG-Vergütung für die entsprechende Technologie ergibt, zuzüglich einer Ma-

nagementprämie. Der Anlagenbetreiber erzielt höhere Einnahmen durch die Direktvermarktung, wenn es ihm gelingt, seinen Strom zu einem höheren Preis als dem durchschnittlichen Preis in dem Referenzmonat zu verkaufen.

Das EEG legt technologiespezifische Vergütungssätze fest, die prinzipiell für kleinere Anlagen höher liegen als für größere Anlagen. Abhängig von den spezifischen technischen Herausforderungen oder Einsatzstoffen können die Vergütungssätze bei einigen Technologien angepasst werden. Die Vergütungssätze unterliegen einer technologieabhängigen, jährlichen Degression.

Für den Ausbau der Photovoltaik und der Windenergie an Land wurden Zubaukorridore (sogenannte „atmende Deckel“) eingeführt. Die Vergütung erhöht sich, wenn die Ausbauziele im Vorjahr nicht erreicht wurden und verringert sich, wenn diese überschritten wurden. Damit erfolgt eine dynamische Förderung des Zuwachses angepasst an die Erzeugungskapazitäten. Weiterhin kann die Stromerzeugung aus Biogasanlagen unter bestimmten Bedingungen durch eine Flexibilitätsprämie zusätzlich gefördert werden. Die Vergütung des Stroms aus Neuanlagen kann ebenfalls abgesenkt werden, wenn die Strombörse für Stundenkontakte über mindestens sechs aufeinanderfolgende Stunden negative Strompreise notiert.

Die Netzbetreiber können sich die gezahlten Vergütungen und Prämien abzüglich der Einnahmen aus dem Verkauf des EEG-Stroms vom Endverbraucher erstatten lassen. Diese sogenannte EEG-Umlage wird pro Kilowattstunde (kWh) gelieferten Stroms erhoben. Sie kompensiert die Differenz zwischen der im Gesetz zugesagten Vergütung und dem durchschnittlichen Strompreis. Die Höhe der Umlage wird auf Basis einer Prognose der Übertragungsnetzbetreiber im Voraus für das kommende Jahr berechnet.

Sonderregelungen gelten für den elektrifizierten Schienenverkehr (Bahn und Straßenbahnen) und die stromintensive Industrie sowie Eigenverbraucher. Stromerzeugung für den Eigenbedarf wird mit einer reduzierten Umlage belastet (gegenwärtig mit 30 Prozent der Umlage), wenn keine Sonderregelungen greifen. Da die Umlage anteilig auf alle Stromverbraucher umgelegt wird, führt die Begrenzung der EEG-Umlage für einige Verbraucher zu einem höheren Beitrag, der von den anderen Verbrauchern kompensiert werden muss. Abbildung 3 zeigt schematisch die Einbindung der verschiedenen Sektoren in das EEG.

Eine ausführliche Analyse und Bewertung des EEG bezüglich seiner Position und Wirkung im europäischen Binnenmarkt aus ökonomischer Sicht ist durch das gemeinsame Projekt der wissenschaftlichen Akademien „Energiesysteme der Zukunft“ durchgeführt worden und in der Stellungnahme „Die Energiewende europäisch integrieren – Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik“ hinterlegt.²³ Eine Bewertung des juristischen Rahmens des EEG wurde durch das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ unter dem Titel „Rechtliche Rahmenbedingungen für die Reform der Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland“ durchgeführt.²⁴

Auswirkungen und Effekte

- Das EEG leistet einen maßgeblichen Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien zur Energieerzeugung (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7 im Tabellenanhang).
- Dies erfolgt allerdings zu hohen Kosten: Insgesamt wurden über das EEG Vergütungen im Umfang von über 95 Milliarden Euro für insgesamt knapp 1000 TWh Strom (Zeitraum 2000-2012, nominal) ausgezahlt (vergleiche Tabelle 8 im Tabellenanhang). 2013 betrug die Höhe der Vergütungen 19,37 Milliarden Euro.²⁵
- Der Ausbau der erneuerbaren Energien durch das EEG hat zu einer deutlichen Erhöhung des Stromdargebots geführt, was den Strompreis an der Börse für Großverbraucher deutlich gesenkt hat. In der Folge ist jedoch die EEG-Umlage gestiegen, was zu höheren Kosten für Klein- und Privatverbraucher geführt hat.

²³ Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015.

²⁴ Wolfrum 2014.

²⁵ ÜNB 2014.

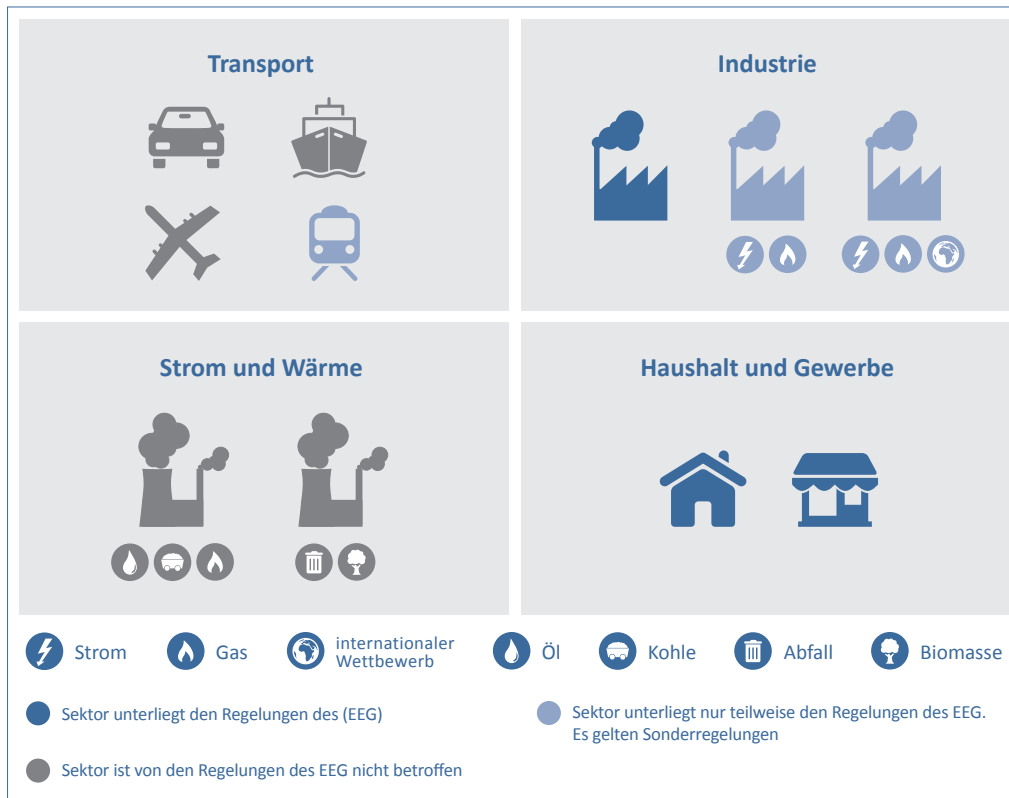


Abbildung 3: Betroffene Sektoren unter den Regelungen des EEG. Der elektrifizierte Schienenverkehr unterliegt besonderen Regelungen, ebenso wie die energieintensive Industrie. Haushalte, Handel und Gewerbe sowie nicht-energieintensive Industrie unterliegen den normalen Regelungen des Gesetzes.

3.3 Tarife/Kostenallokation im Energiemarkt

Das Energiesystem leidet unter einer Diskrepanz zwischen den Anforderungen der Kostenstruktur der Bereitstellung von Energiedienstleistungen und der Preisbildung für den Verbraucher. Der Verbraucher rechnet seine Energiekosten verbrauchsabhängig ab. Sie sind daher zum Beispiel durch Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussbar. Auf der anderen Seite wird die Kostenstruktur der Energiebereitstellung im Wesentlichen durch Fixkosten bestimmt (Investitionskosten in Anlagen und Netze sowie staatliche Abgaben), unabhängig davon, ob es sich um konventionelle oder erneuerbare Energiebereitstellung handelt.

hängig ab. Sie sind daher zum Beispiel durch Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussbar. Auf der anderen Seite wird die Kostenstruktur der Energiebereitstellung im Wesentlichen durch Fixkosten bestimmt (Investitionskosten in Anlagen und Netze sowie staatliche Abgaben), unabhängig davon, ob es sich um konventionelle oder erneuerbare Energiebereitstellung handelt.

Auswirkungen und Effekte

- Die Kosten des Energiesystems werden nicht verursachungsgerecht als fixe oder variable Kosten im Endkundenpreis widerspiegelt.
- Die Fixkosten fallen für die Bereitstellung der Infrastruktur des Energiesystems an, von der alle Verbraucher profitieren, unabhängig von der genutzten Energiemenge.
- Daraus entstehen betriebswirtschaftliche Anreize, die volkswirtschaftlich kontraproduktiv sein können. Maßnahmen, wie zum Beispiel der verstärkte Eigenverbrauch von selbst erzeugtem Photovoltaikstrom, sind aus Sicht des Erzeugers, der gleichzeitig auch Verbraucher ist, sinnvoll.
- Dies führt jedoch zu einer relativen Verlagerung der Fixkosten auf alle anderen Verbraucher, obwohl der Erzeuger auch weiterhin von den Systemdienstleistungen und dem Netz profitiert.
- Eine lokale Optimierung führt daher zu einer Verschiebung der Kostenanteile zwischen den verschiedenen Verbrauchern und ist nicht gleichbedeutend mit einer Optimierung des Gesamtsystems.

3.4 Definition des Bilanzraums

Eine klare Definition des Bilanzraums ist eine zentrale Voraussetzung für die angemessene Bewertung jeder Maßnahme. Eine bestimmte Maßnahme kann Effekte über den betrachteten Bilanzrahmen hinaus entfalten, die nicht immer erwünscht sind. Dies gilt insbesondere für die Definition von Zielsetzungen, da die Antwort auf die Frage, mit welcher Maßnahme die Zielsetzung erreichbar ist,

vom betrachteten Bilanzraum abhängig ist.

Der Begriff „Bilanzraum“ ist hierbei nicht ausschließlich geografisch zu verstehen. Ein Bilanzraum kann auch durch wirtschaftliche Sektoren, Finanzierungsregeln, Rechtsprechung, Zeiträume oder andere Strukturen definiert werden, solange innerhalb des betrachteten Raumes die gleichen Regeln bezüglich der gewählten Betrachtung gelten.

Auswirkungen und Effekte

- Im ETS möchte man das sogenannte „carbon leakage“ vermeiden, also die Abwanderung der energieintensiven Industrie aus dem Gültigkeitsraum des ETS. Die von dieser Industrie verursachten Emissionen würden dann nicht mehr dem Cap unterliegen und somit vollständig zusätzlich anfallen. Damit hätte man zwar erfolgreich Emissionen innerhalb des ETS gemindert, global wäre man diesem Ziel aber nicht näher gekommen. Die Situation würde sich sogar verschlechtern, wenn die Produktion am neuen Standort eine höhere Energieintensität bei gleicher CO₂-Intensität pro Energieeinheit oder eine höhere CO₂-Intensität bei gleicher Energieintensität aufwiese.
- Der Anbau von Energiepflanzen kann zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen führen, wenn zum Beispiel für den Anbau Wälder gerodet werden müssen (Landnutzungsänderungen).²⁶
- Bei der Substitution von Werkstoffen muss der Energieverbrauch entlang der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt werden (Life-Cycle-Analysis), da manche Produktions- oder Nutzungsschritte sehr energieintensiv sein können, wie zum Beispiel die Herstellung von Aluminium oder Carbonfasern als Ersatz für Stahl im Automobilbau.

3.5 Kopplung der Energiepreise

Verschiedene Energieträger können verschiedene Funktionen an unterschiedlichen Stellen des Energiesystems wahrnehmen. So wird Öl primär für die Mobilität in Form von Kraftstoffen verwendet, während Erdgas für den Wärmemarkt eine zentrale Rolle spielt. Uran und Kohle finden wiederum die Hauptanwendung in der Stromerzeugung. Strom selbst, als

exergetisch hochwertigste Energieform, findet sich in zahlreichen Anwendungen, in denen er nicht zu ersetzen wäre.

Die Anwendungen der einzelnen Energieträger werden durch die relativen Preise und die zur Verfügung stehenden Technologien für die Nutzung der jeweiligen Energieträger bestimmt. In den Bereichen der Strom- und Wärmeerzeugung sind prinzipiell alle Energieträger einsetzbar und im Rahmen der bestehenden Infrastruktur austauschbar. Welche Energieträger zum Einsatz kommen, hängt im Wesentlichen von der jeweiligen Preis- und Infrastruktur ab.

²⁶ Bei vielen Prüfsertifikaten, zum Beispiel nach der Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV), wird dies in den Kriterienkatalogen heute bereits berücksichtigt.

Auswirkungen und Effekte

- Die Preisstruktur in den Energiemärkten ist durchaus variabel (vergleiche Abbildung 4). So führt die gegenwärtige Entwicklung im Bereich des Schiefergases in den USA zu einer Transformation des Energiesystems hin zu Gas und weg von der (jetzt relativ teuren) Kohle. Diese erhöhte Nachfrage reguliert jedoch den Gaspreis wieder nach.
- Die Energieträger sind fundamental durch ihren jeweiligen Energiegehalt miteinander verknüpft und vergleichbar. Durch die Austauschbarkeit der Energieträger für die Stromerzeugung ist auch immer automatisch ein preislicher Referenzrahmen gegeben. Dies hat sich in der Vergangenheit sogar in Verträgen zur Gaslieferung formalisiert, in denen der Gaspreis explizit an den Ölpreis gekoppelt wurde. Umgekehrt führt jedoch ein hoher Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien zu einer Minderung des Preisdrucks auf fossile Energierohstoffe. Dies sollte in Szenarien, in denen eine hohe Durchsetzung des Energiesystems mit erneuerbaren Energien, insbesondere auf globaler Ebene, angenommen wird, berücksichtigt werden.

3.6 Speicherbarkeit von Energieträgern

Die Energieträger unterscheiden sich nicht nur in ihrem Energiegehalt, sondern auch darin, wie einfach sie zu speichern sind. Prinzipiell sind feste, flüssige und auch gasförmige Energieträger praktisch verlustfrei über unbegrenzte Zeiträume gut speicherbar. Fossile Energieträger bilden daher auch das Rückgrat der strategischen Spei-

cherung, um einen eventuellen Lieferengpass ausgleichen zu können. Aufgrund der hohen Energiedichte und der Handhabbarkeit eignen sich insbesondere flüssige Stoffe für den Einsatz in mobilen Systemen. Im Gegensatz dazu ist Strom aufgrund der geringen Energiedichte der Speichermedien oder geografisch limitierter Standorte heute nur mit relativ hohem Kostenaufwand, mit signifikanten Verlusten und nur in begrenztem Umfang speicherbar.

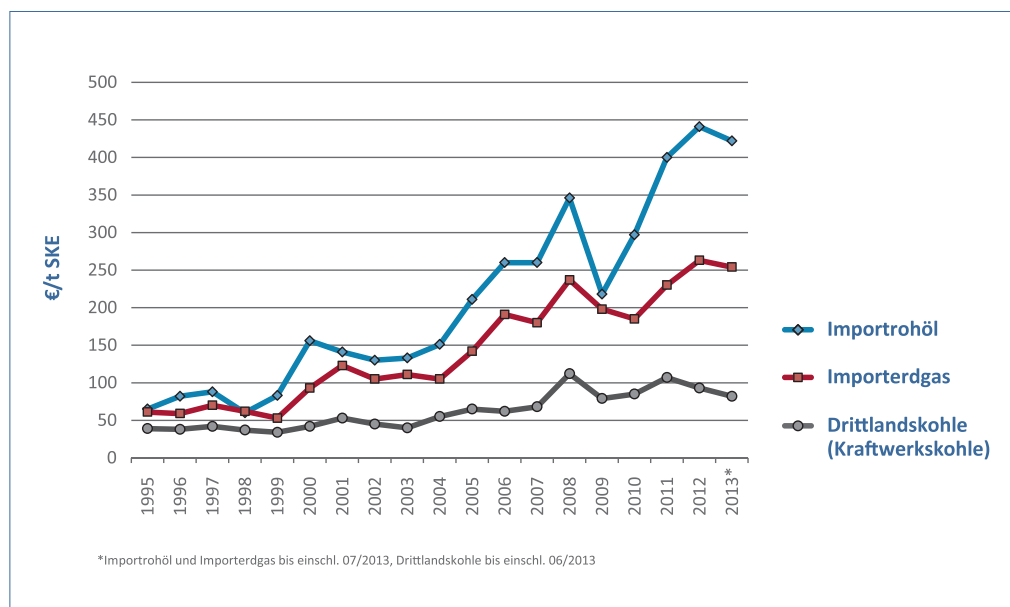


Abbildung 4: Preisentwicklung fossiler Energieträger.²⁷

²⁷ BDEW 2013-1.

Auswirkungen und Effekte

- Strom muss mit seiner Bereitstellung unmittelbar genutzt werden. Im Falle einer starken Einspeisung von Strom aus volatilen erneuerbaren Quellen sinkt der Wert des angebotenen Stroms. Im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern ist der Strompreis auf einer Zeitskala von 15 Minuten (Spotpreis) volatil, streng genommen sogar auf einer Sekundenzeitskala, wenn man die Primärregelenergie betrachtet. Diese Preisschwankungen sind prinzipiell gute Voraussetzungen für den Einsatz von Stromspeichern, da diese mit einer hohen Zyklenzahl Preisschwankungen ausnutzen könnten. Jedoch würde der verstärkte Ausbau von Stromspeichern zu einer verstärkten Nachfrage des volatilen Stroms und damit zu einer Verringerung der Preisdifferenzen von Hoch- und Tiefpreisen (Spread) führen, die wiederum die Wirtschaftlichkeit der Speicher gefährdet.
- Die Speicherung von Strom in Speichermedien und dessen spätere Wiedereinspeisung verläuft über eine Umwandlungskette, wobei jeder Umwandlungsschritt mit Verlusten verbunden ist. Je mehr Umwandlungsschritte erfolgen, desto teurer und verlustreicher wird im Allgemeinen die gesamte Speicherkette. In der Regel wird daher der Netzausbau zur direkten Nutzung von sonst überschüssigem Strom – zum Beispiel aus Wind oder Sonne – günstiger als die Speicherung von Strom sein.
- Der gegenwärtige Stand der Entwicklung von effizienten Stromspeichern für die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien ist unbefriedigend, aber von zentraler Bedeutung für die weitere Ausgestaltung der Energiewende.

3.7 Mechanismen, die zu Rebound-Effekten führen

Der Begriff „Rebound-Effekt“ beschreibt die nicht vollständige Ausschöpfung von Steigerungen der Effizienz von Energietechnologien oder gar Erhöhung des absoluten Energieverbrauchs trotz Stei-

gerung von Effizienz. Ursache hierfür sind eine ganze Reihe unterschiedlicher Mechanismen aus den verschiedensten Bereichen, die den möglichen Energieeinsparungseffekt abschwächen. Gerade im Bereich der Rebound-Effekte ist das Nutzerverhalten von entscheidender Bedeutung.

Auswirkungen und Effekte

- Beispielsweise entfalten Programme zum Austausch alter Kühlschränke durch effiziente neue Geräte nicht ihre maximale Wirkung, da die neuen Kühlschränke häufig größer dimensioniert werden oder der alte Kühlschrank wird im Keller zusätzlich weiterbetrieben.
- Einige Untersuchungen setzen die Reduzierung der eigentlich erwarteten Energieeinsparung durch Rebound-Effekte im Energiebereich bei bis zu 30 Prozent an.^{28,29}

²⁸ Galvin 2013.

²⁹ Madlener 2013.

4. Zusammenspiel verschiedener Wirkmechanismen

In den folgenden Abschnitten wird das Zusammenspiel der verschiedenen Wirkmechanismen exemplarisch an zwei Beispielen untersucht. Dabei ergeben sich Konstellationen, die entweder dem antizipierten Effekt zuwiderlaufen, bedeutende nicht-intendierte Wirkungen entfalten, oder es werden Maßnahmen identifiziert, die sinnvoll wären, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen, dennoch aber nicht ergriffen werden. Die beiden folgenden Unterkapitel stellen exemplarisch die Vorgehensweise bei der Analyse der diversen Problemstellungen vor. Es folgen in Kapitel 5 „Steckbriefe“ zu diesen beiden und weiteren Beispielen in schematisch strengerer Form. Die dort behandelten Themen sind:

- Ziele des EEG stehen nicht im Einklang mit den Effekten, die durch die Förderung der dezentralen Photovoltaik entstehen
- Betrieb von elektrischen Wärmepumpen wird durch die EEG-Umlage unrentabler
- Sinkende Börsenpreise an der Strombörse kommen nicht beim privaten Endverbraucher an
- Ausbau der Photovoltaik verteilt Belastungen und Gewinne ungleich
- Photovoltaik-Ausbau reduziert Wirtschaftlichkeit von Stromspeichern (Pumpspeicherkraftwerke)
- Ausbau kleiner dezentraler KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) erhöht die CO₂-Emissionen
- Förderung erneuerbarer Energien erhöht die Laufzeit von Kohlekraftwerken
- Ausbau von Photovoltaik und Windkraft benötigt das Vorhalten von fossilen Backup-Kraftwerken und Speichern

- Die öffentliche Diskussion um den Netzausbau entspricht nicht dem auf verschiedenen Ebenen entstehenden Aufwand
- Elektromobilität führt – anders als häufig diskutiert – nicht zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen im Stromsektor

4.1 Ziele des EEG stehen nicht im Einklang mit den Effekten, die durch die Förderung der dezentralen Photovoltaik entstehen

Das EEG enthält den Mechanismus in Deutschland zur Förderung der erneuerbaren Energien. Das EEG hat nach §1 EEG zum Ziel, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.³⁰

Durch das EEG wird geregelt, dass eine Stromerzeugungsanlage auf Basis erneuerbarer Energien an das Stromnetz angeschlossen werden muss und der erzeugte Strom genießt Einspeisevorrang. Der Betreiber erhält eine garantierte technologiespezifische Vergütung/Marktpremie, abhängig von dem Jahr der Inbetriebnahme und der Größe der Anlage.

Durch diese Regelungen ist ein starkes Wachstum in dem Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung entstanden. Ein besonders ausgeprägtes Wachstum

³⁰ EEG 2014.

fand im Bereich der Photovoltaik statt, was zum einen an den hohen Vergütungsprämien und der raschen Kostenreduktion lag und zum anderen daran, dass diese Technologie jedem Eigenheimbesitzer zugänglich ist.

Der erhoffte Effekt, durch Ausbau der Photovoltaik konventionelle Stromerzeugung zu verdrängen und damit CO₂-Emissionen zu reduzieren, stellt sich aber nicht ein, da die Stromerzeugung über CO₂-Zertifikate am ETS teilnimmt. Zwar verdrängt der Strom aus erneuerbaren Energiequellen den Strom aus konventionellen Kraftwerken im Netz. Daraus resultiert aber eine geringere Nachfrage des Stromsektors für CO₂-Zertifikate im ETS, was deren Preis senkt, ohne die Gesamtmenge an Zertifikaten und damit der Emissionen zu beeinflussen. Im Ergebnis fallen die Emissionen, die durch die Bereitstellung von Photovoltaikstrom „eingespart“ wurden, an anderer Stelle an.

Neben diesem horizontalen Verdrängungseffekt – weg von Emissionen aus Kraftwerken hin zu Emissionen aus Industriebetrieben – gibt es auch einen vertikalen Verdrängungseffekt innerhalb des Kraftwerksbereichs. Durch niedrigere Zertifikatspreise ist weniger CO₂-intensive Stromerzeugung (zum Beispiel aus Gaskraftwerken) relativ weniger konkurrenzfähig als CO₂-intensive Stromerzeugung, etwa in Kohlekraftwerken (vergleiche hierzu auch den Steckbrief in Kapitel 5.7: „Förderung erneuerbarer Energien erhöht die Laufzeit von Kohlekraftwerken“)

Da aber die Gesamtmenge an CO₂-Emissionen sich nicht reduziert, bleibt in erster Näherung auch der Verbrauch fossiler Energierohstoffe konstant. Wenn überhaupt, verändert er sich analog zu dem obigen vertikalen Verdrängungseffekt in Richtung von kohlenstoffhaltigeren Energieträgern (Kohle statt Öl oder Gas).

Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, komplementäre Erzeugungskapazitäten (fossile Kraftwerke) vorzuhalten, da die Speicherkapazitäten des Stromnetzes nicht ausreichen, um eine längere Flaute oder Zeit starker Bewölkung zu kompensieren (vergleiche hierzu Kapitel 5.8: „Ausbau von Photovoltaik und Windkraft benötigt das Vorhalten von fossilen Backup-Kraftwerken und Speichern“).

Die relativ hohe garantierte Vergütung für Strom im Rahmen des EEG führt zu einem beträchtlichen Anstieg der Stromkosten für die Endverbraucher über die EEG-Umlage, insbesondere auch durch die relativ großzügige Förderung der Photovoltaik. Für einige stromintensive Großverbraucher fällt die EEG-Umlage allerdings nicht an. Die entsprechenden Beträge werden auf die anderen Verbraucher umgelegt und erhöhen die EEG-Umlage.

Eine Abschätzung der gesamten volkswirtschaftlichen Effekte des EEG gestaltet sich schwierig. Die Studien kommen überwiegend zu leicht positiven Ergebnissen, die jedoch sehr stark von Faktoren wie Zertifikats- und Energiepreisen abhängen, die für die Zukunft kaum zuverlässig abzuschätzen sind.^{31,32}

Unbestritten ist, dass das starke (zeitlich begrenzte) Wachstum die heimische Photovoltaikindustrie zumindest zeitweise stimulierte – wenn auch zu hohen Kosten. Dieser Wettbewerbsvorteil ging allerdings verloren und der Produktionsschwerpunkt von Solarmodulen wurde nach Asien verlagert.³³ Durch die EEG-Förderung beziehungsweise deren teilweise Umlage auf den Strompreis sind Wettbewerbsnachteile für stromintensive Industrien entstanden. Diese und wei-

³¹ DLR/ISI 2006.

³² GWS/IFEU 2012.

³³ BMWi 2012.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
 - a. Die Treibhausgasemissionen werden nicht gesenkt.
 - b. Der Zertifikatepreis sinkt durch Ausbau der Photovoltaik.
 - c. Die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit von Anlagen mit hohen spezifischen Emissionen (Braunkohle, Steinkohle) verbessert sich im Vergleich zu Anlagen mit geringen spezifischen Emissionen (Erdgas).
 - d. Investitionen und Entwicklung in alternative, kostengünstigere CO₂-Minderungstechnologien unterbleiben.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. Der (Börsen-)Strompreis sinkt durch zunehmende Einspeisung.
 - b. EEG-Umlage und Haushaltsstromkosten steigen.
 - c. Ein verstärkter Ausbau der Verteilnetze wird nötig.
3. Tarife/Kostenallokation

Durch steigende Strompreise aufgrund von Umlagen (EEG, Netze etc.) wird die Investition in Photovoltaik für Selbstverbraucher auch ohne Förderung attraktiver, was zu einem weiteren Anstieg der Umlagen führt.
4. Bilanzraum

Die Erwartung steigender Energiekosten kann zu einer Abwanderung von energieintensiver Industrie in Regionen außerhalb des EEG- und ETS-Bereichs führen. Dies würde global gesehen zu höheren Treibhausgasemissionen führen.
5. Kopplung der Energiepreise

Der Ausbau an Stromerzeugungskapazitäten im Bereich der erneuerbaren Energien führt zu einer Senkung der Nachfrage für Erdgas und damit zu einem tendenziell sinkenden Preis.
6. Speicherbarkeit

Je mehr volatiler Photovoltaikstrom erzeugt wird, desto geringer ist sein (volkswirtschaftlicher) Wert. Gleichzeitig entsteht der betriebswirtschaftliche Anreiz für den Anlagenbetreiber zur dezentralen Speicherung, was unter den gegenwärtigen Bedingungen des EEG zu einer weiteren Belastung der Endverbraucher führt.

tere Faktoren, die einzeln und in ihrem Zusammenwirken kaum quantifizierbar sind, erschweren eine Analyse der volkswirtschaftlichen Wirkung der Photovoltaikförderung so weit, dass es kaum möglich ist, das Erreichen dieses speziellen Ziels des EEG zu verifizieren. Die aktuelle Struktur der EEG-Förderung, mit Ausnahme des Zubaukorridors für die Photovoltaik, setzt jedoch keine Anreize für eine volkswirtschaftliche Kostenoptimierung der Nutzung erneuerbarer Energien.

auf das EEG zurückgeführt.³⁴ Allerdings ist die innovationsfördernde Wirkung durch das EEG umstritten.³⁵ Durch den reduzierten Zertifikatepreis wiederum werden der Einsatz und die Entwicklung von Alternativen zur kostengünstigen CO₂-Emissionsminderung wirtschaftlich unattraktiver. Umgekehrt können veraltete Anlagen mit einem hohen spezifischen Ausstoß an Treibhausgasen aufgrund des reduzierten Zertifikatepreises länger wirtschaftlich betrieben werden.

Zusätzlich zur industriellen Entwicklung wurde der Aufschwung in der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bereich der Photovoltaik zum Teil

³⁴ ISI 2014.

³⁵ EFI 2014.

Diese Effekte gelten allerdings nur für den „Bilanzraum“ Europa, in dem das ETS seine Wirkung entfaltet. Weltweit betrachtet kann die Förderung der Photovoltaik in Deutschland durchaus einen Beitrag zur Senkung von Treibhausgasemissionen leisten. Wenn die Förderung zur oben beschriebenen Kostensenkung der Bereitstellung elektrischer Energie durch Photovoltaik führt, werden solche Anlagen an

günstigen Standorten eher wettbewerbsfähig im Vergleich zur Bereitstellung durch fossile Energieträger. Wenn in der Folge außerhalb des ETS-Raumes mehr elektrische Energie mit Hilfe der Photovoltaik erzeugt wird, sinken global die Emissionen von Treibhausgasen. Derselbe Mechanismus würde gleichzeitig zu einem geringeren Verbrauch an fossilen Energieressourcen außerhalb des ETS-Raumes führen.

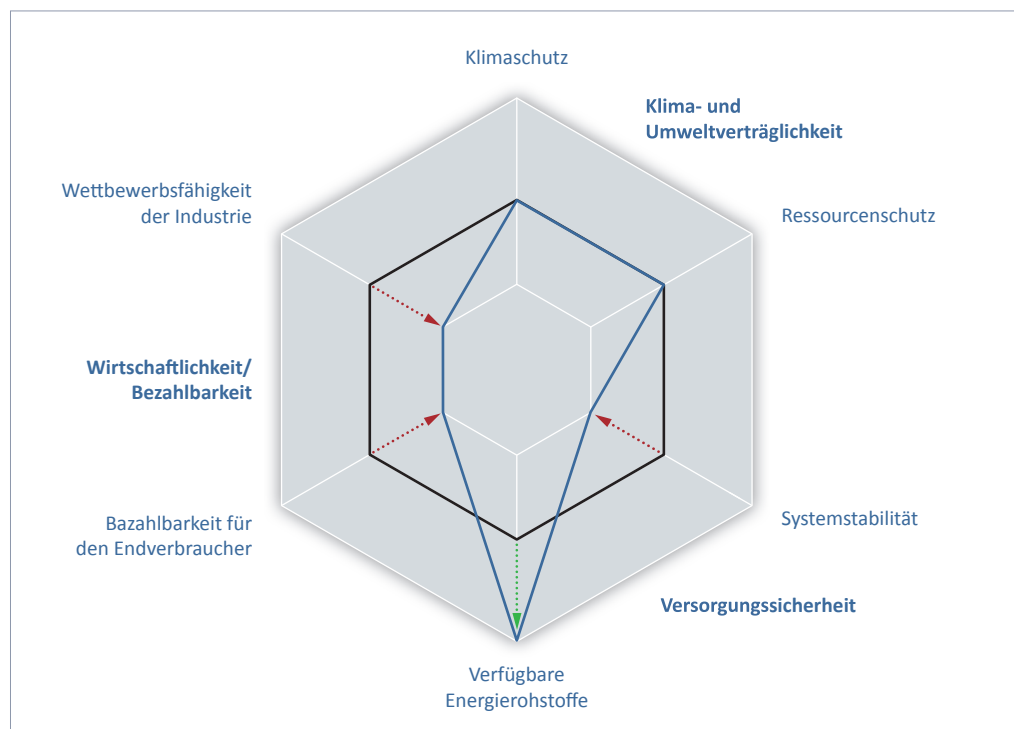


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Ausbaus der dezentralen Photovoltaik bezüglich der Ziele im energiepolitischen Zieldreieck. Die Änderungen sind relativ zur Ausgangssituation (mittleres schwarzes Sechseck). So verbessert (nach außen gerichteter, grüner Pfeil) sich die Verfügbarkeit von Energierohstoffen durch geringere Inanspruchnahme derselben, während sich die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und die Bezahlbarkeit für den Endverbraucher durch höhere Energiekosten ebenso verschlechtern (nach innen gerichtete, rote Pfeile) wie die Systemstabilität durch den Zubau und Einspeisevorrang volatiler Stromerzeugung (Wind und Photovoltaik). Bezüglich des Klima- und des Ressourcenschutzes ergeben sich keine relevanten Änderungen.

4.2 Betrieb von elektrischen Wärmepumpen wird durch die EEG-Umlage unrentabler

Die Förderung der erneuerbaren Energien durch das EEG zielt im Wesentlichen auf den Stromsektor ab. Die verschiedenen Energieverbrauchsformen Strom, Verkehr und Wärme, können aber nicht isoliert betrachtet werden. So gibt es im

Gebäudesektor verschiedene Möglichkeiten Raumwärme und Warmwasser zur Verfügung zu stellen. Eine Verknüpfung zwischen dem Stromsektor – und damit dem Wirkungsbereich des EEG – sowie der Wärmenutzung stellen Wärmepumpen dar. Sie funktionieren auf Grundlage einer Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung und einem Reservoir.

Ein flüssiges Arbeitsmedium mit niedrigem Siedepunkt nimmt die Wärme aus dem Reservoir (zum Beispiel dem Erdreich) in einem Verdampfer auf und verdampft. Der Dampf wird durch einen stromgetriebenen Kompressor verdichtet, wodurch er sich erwärmt. Der verdichtete Dampf kondensiert im Kondensator und gibt seine Wärme ab, zum Beispiel an die Raumheizung. Das Arbeitsmedium wird auf den Ausgangsdruck entspannt und wieder in den Verdampfer geleitet, wodurch der Kreislauf geschlossen ist, vergleiche Abbildung 6.

Neben der Umgebungswärme besteht der eigentliche externe Energieeintrag in der Stromversorgung des Kompressors. Für Wärmepumpen bieten alle großen Stromanbieter spezielle Tarife an, deren Preise ca. 5 €ct/kWh unter den regulären Strompreisen für Haushalte liegen. Im Haushaltsbereich stehen Wärmepumpen in direkter Konkurrenz zu anderen Heizsystemen, wie zum Beispiel einer Gasheizung.

Eine Nutzung von Wärmepumpen führt zu einem erhöhten Strombedarf. Die hierdurch entstehenden zusätzlichen CO₂-Emissionen sind aber durch die Einbindung des Stromsektors im ETS gedeckelt

und erhöhen die Gesamtmenge an Emissionen nicht, sondern wirken sich nur auf die Höhe des CO₂-Zertifikatepreises aus. Im Gegensatz dazu fallen Emissionen kleiner Heizeinrichtungen, wie zum Beispiel einer Gasheizung, zusätzlich an, da sie nicht durch das ETS erfasst werden. Im Vergleich zu anderen Wärmeversorgungssystemen schneidet die Kombination einer Wärmepumpe mit elektrischer Energie gemäß dem Strommix zwar in Bezug auf die Treibhausgasemissionen schlechter ab als ein Gaskraftwerk-betriebenes Fernwärmenetz, jedoch besser als eine lokal installierte Gas- oder Ölbrennwertheizung.³⁶ Im Sinne einer Reduzierung von CO₂-Emissionen wäre daher eine verstärkte Nutzung von Wärmepumpen wünschenswert.

Wärmepumpen können prinzipiell durch intelligentes Lastmanagement stabilisierend im Stromnetz integriert werden, indem sie in Zeiten mit hohem Wind-/Solardargebot und niedrigen Strompreisen eingesetzt und bei geringer Einspeisung der erneuerbaren Energien nach Möglichkeit weniger genutzt werden. Die Wärmespeicherkapazität des Gebäudes (oder auch eines Warmwassertanks) erlaubt einen dargebotsorientierten Betrieb im Tagesverlauf.³⁷

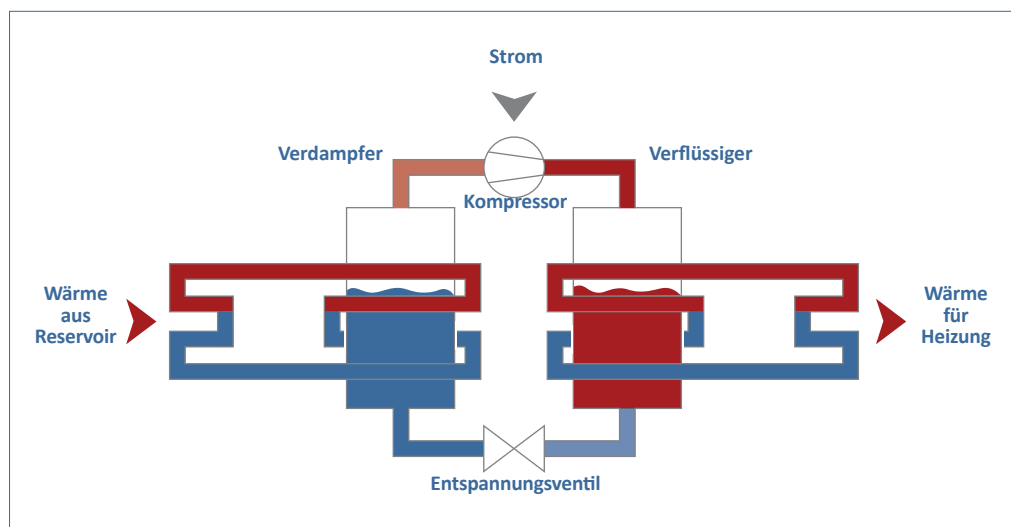


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer Wärmepumpe.

³⁶ Erdmann/Dittmar 2010.

³⁷ BDEW/ZVEI 2012.

Die Wirtschaftlichkeit eines Wärmepumpensystems für den Endverbraucher im Vergleich zu einem alternativen System, zum Beispiel einer Erdgasheizung, entscheidet sich über die Balance der jeweiligen Investitions- und Betriebskosten über die Lebensdauer. Die Betriebskosten können vereinfacht als die Kosten für benötigten Strom beziehungsweise das benötigte Erdgas definiert werden.

Für eine Wärmepumpe mit einer Arbeitszahl, also dem Verhältnis von produzierter Wärme zu eingesetztem Strom, von 4 und dem Wärmepumpensondertarif von 20 €/kWh liegt der Wärmepreis bei 5 €/kWh_{Wärme}. Im Vergleich dazu liegt der Erdgaspreis für Haushalte bei einer modernen Brennwertgasheizung bei ca. 7 €/kWh_{Wärme}. Allerdings liegen die Anschaffungskosten für Wärmepumpen in der Regel deutlich über denen ei-

ner modernen Erdgasbrennwertheizung. Die Wirtschaftlichkeit hängt also von der Einzelfallbetrachtung und den relativen Energiepreisen von Strom zu Erdgas ab.

Der Strompreis ist in der Vergangenheit deutlich stärker gestiegen als der Gaspreis, auch aufgrund der EEG-Umlage, welche die Förderung der erneuerbaren Energien mit einpreist. Je stärker der Anstieg, desto weniger rentiert sich die Investition in die Wärmepumpentechnologie für den Betreiber.

Volkswirtschaftlich betrachtet fallen für den Wärmepumpenbetrieb kaum Zusatzkosten an. Im Wesentlichen ist dies der Brennstoffmehrbedarf im Kraftwerkssektor. Ein zusätzlicher Netzausbau ist in der Regel nicht erforderlich und die CO₂-Emissionen unterliegen dem Cap des Emissionshandels, in den der Strom-

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
 - a. Keine Erhöhung der CO₂-Emissionen bei Ausbau der strombasierten Wärmeversorgung.
 - b. Erhöhung der CO₂-Preise, damit geringerer Kohle-, aber erhöhter Gaseinsatz.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. EEG-Umlage und Haushaltsstromkosten steigen.
 - b. Steigende EEG-Umlage senkt die betriebswirtschaftliche Attraktivität des Wärmepumpeneinsatzes für den Nutzer.
3. Tarife/Kostenallokation

Volkswirtschaftliche Vorteile spiegeln sich nicht in betriebswirtschaftlichen Kosten wider.
4. Bilanzraum

Unterschiede des Bilanzraumes von ETS und EEG führen dazu, dass die Vorteile, die sich im ETS ergeben, nicht im EEG berücksichtigt sind, trotz gleicher Zielsetzung (Minderung der Treibhausgasemissionen).
5. Kopplung Energiepreise

Direkte Konkurrenz von Energieträgern für das gleiche Produkt (Wärme); relative Preise entscheiden über die Wirtschaftlichkeit der Systeme.
6. Speicherbarkeit

Intelligente Wärmepumpen können zusammen mit der jeweiligen Wärmekapazität eines Wassertanks (oder des gesamten Gebäudes) als virtueller Stromspeicher und für Lastverschiebungen genutzt werden und leisten damit einen Beitrag für die Systemstabilität der Stromversorgung.
7. Rebound

Keine speziellen Effekte.

sektor eingebunden ist. Der zusätzliche Strombedarf für die Bereitstellung der Wärme über die Wärmepumpen führt tendenziell zu einer leichten Verteuerung der Zertifikate.

Eine verstärkte Nutzung der Wärmepumpentechnologie könnte (ungede-

ckelte) CO₂-Emissionen aus dem Wärmesektor in (gedeckelte) Emissionen im Stromsektor überführen und damit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Förderung der erneuerbaren Energien im Stromsektor führt jedoch zu einer Verteuerung des Strompreises, die andere Alternativen zur Wärmebereitstellung begünstigt.

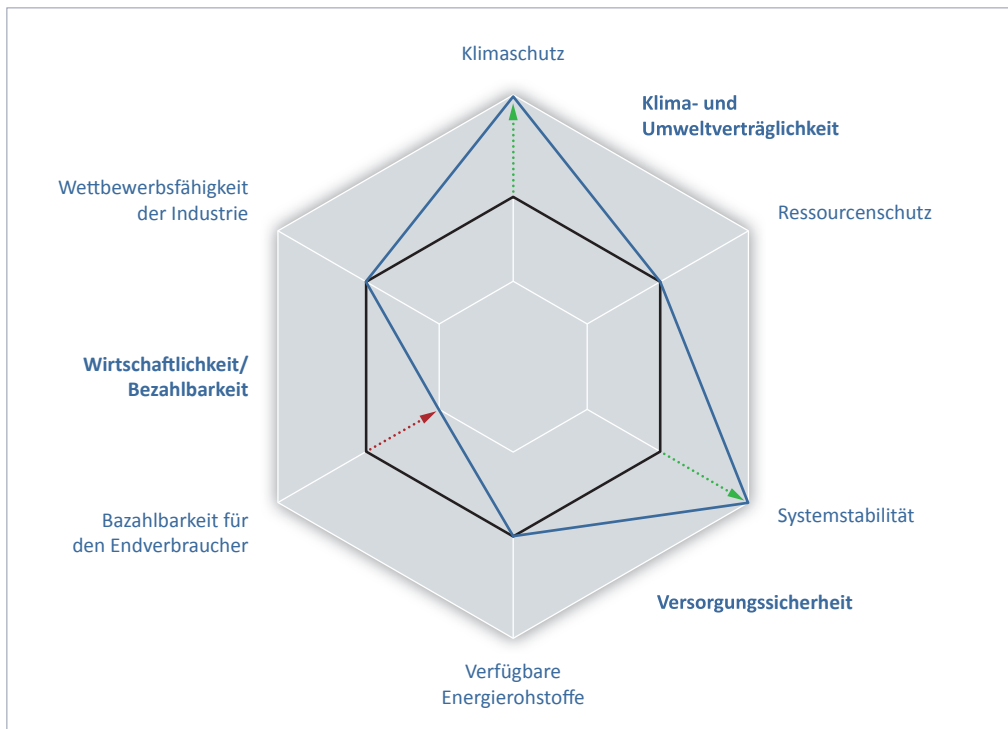


Abbildung 7: Auswirkungen eines verstärkten Wärmepumpeneinsatzes auf das energiepolitische Zieldreieck. Der Klimaschutz verbessert sich aufgrund der Integration eines zuvor nicht durch das ETS geregelten Bereichs in den durch das ETS geregelten Bereich. Ebenso profitiert die Systemstabilität durch die besseren Steuerungsmöglichkeiten der Wärmepumpe (nach außen gerichtete, grüne Pfeile). Dies geht mit einer erhöhten Kostenbelastung (nach innen gerichteter, roter Pfeil) für den Endverbraucher einher, da die EEG-Umlage die Betriebskosten relativ zu den Alternativen erhöht. Die anderen energiepolitischen Ziele sind davon nicht betroffen.

5. Steckbriefe

Im Folgenden werden verschiedene Widersprüche und Problemlagen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, vorgestellt und bewertet. Die Beispiele decken nicht nur den Sektor der elektrischen Energie ab, der derzeit im Vordergrund der Diskussion steht, sondern sie adressieren auch die Themen Wärme und Mobilität. Die Bewertung wird anhand der perspektivischen Leitlinien im Sinne der Ziele aus Kapitel 2 qualitativ vorgenommen. Die Analyse arbeitet heraus, in welcher Form die verschiedenen Wirkmechanismen ineinandergreifen und wie sich dies auf das Erreichen der Ziele innerhalb des energiepolitischen Zieldreiecks – jeweils aufgespalten in zwei Teilziele – auswirkt. Die ersten beiden Steckbriefe behandeln die gleichen Themenstellungen, die bereits in Kapitel 4 analysiert wurden, jedoch in einer anderen Darstellungsform.

5.1 Ziele des EEG stehen nicht im Einklang mit den Effekten, die durch die Förderung der dezentralen Photovoltaik entstehen

Der Inhalt dieses Steckbriefes wurde bereits in Kapitel 4.1. in anderer Form dargestellt. Das EEG hat nach §1 EEG die Ziele, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.³⁸

Maßnahme und intendierte Wirkung

Der Betrieb von Photovoltaikanlagen wird in Deutschland vornehmlich über das EEG gefördert. Danach gibt es einen Einspeisevorrang für erneuerbare Energien, und die Anlagenbetreiber erhalten eine garantierte Einspeisevergütung für den produzierten Strom in Abhängigkeit vom Jahr der Inbetriebnahme.

Tatsächliche Effekte

In Bezug auf Nachhaltigkeit wird eine zusätzliche Einsparung von Treibhausgasen nicht erreicht. Auch die Betrachtung des Effekts auf die Ressourcenschonung nimmt sich zumindest ambivalent aus. Untersuchungen zu den volkswirtschaftlichen Kosten der Förderung der Photovoltaik kommen zu positiven Ergebnissen (unterstellen jedoch hohe Zertifikats- und/oder Energiepreise).^{39,40} Die technologiespezifische Förderung durch das EEG schafft keine Anreize zu einer volkswirtschaftlichen Kostenoptimierung der Nutzung erneuerbarer Energien.

Erläuterung

Klima- und Umweltverträglichkeit (Klima- und Ressourcenschutz)

Eine verbesserte Nachhaltigkeit im Sinne einer Reduzierung von Treibhausgasen kann durch den Ausbau der Photovoltaik nicht erreicht werden, solange die Gesamtemissionen durch das Emissionshandelssystem in Europa festgeschrieben sind. Das Anbieten einer emissionsfreien Alternative wie der Stromerzeugung aus Photovoltaik reduziert die Nachfrage nach Zertifikaten in der Stromversorgung.

³⁸ EEG 2014.

³⁹ DLR/ISI 2006.

⁴⁰ GWS/IFEU 2012.

Der Ersatz einer kWh durchschnittlichen Stroms in Deutschland (570 g CO₂/kWh) würde einem Zertifikatspreis von rund 180 €/t CO₂ entsprechen, wenn damit die Förderung von 13,28 €ct (für Anlagen unter 10 kWp) erreicht werden müsste. Dies stellt also eine volkswirtschaftlich sehr kostspielige Maßnahme zur CO₂-Einsparung dar, die ohne die Förderung durch das EEG erst bei einem sehr hohen Zertifikatspreis im ETS in Erwägung gezogen werden würde. Die Tatsache, dass der Photovoltaikstrom nicht gesichert zur Verfügung steht, müsste zusätzlich in den Strompreis eingepreist werden.

Durch den reduzierten Zertifikatspreis wird der Einsatz und die Entwicklung anderer Alternativen zur kostengünstigen CO₂-Emissionsminderung wirtschaftlich unattraktiver. Umgekehrt können veraltete Anlagen mit einem hohen spezifischen Ausstoß an Treibhausgasen aufgrund des reduzierten Zertifikatspreises länger wirtschaftlich betrieben werden.

Versorgungssicherheit (Systemstabilität, Verfügbarkeit von Energierohstoffen)

Der Einfluss der Photovoltaikförderung auf den Ressourcenverbrauch ist nicht eindeutig positiv oder negativ zu bewerten. Dies ist ebenfalls auf den Mechanismus des ETS zurückzuführen. Wenn CO₂ emittiert wird, stammt es zum weit überwiegenden Teil aus der Nutzung von fossilen Energieressourcen. Da die Gesamtemissionen in Europa durch das ETS festgeschrieben sind, werden in erster Näherung die gleichen Mengen an fossilen Energieressourcen, bezogen auf Kohlenstoff, verbraucht. Allerdings beeinflusst der Zertifikatspreis die relative Verteilung innerhalb der Energieressourcen. Durch sinkende Zertifikatspreise werden solche Ressourcen relativ bevorzugt, die pro bereitgestellte Energieeinheit höhere CO₂-Emissionen verursachen, also Braunkohle und Steinkohle. Die EEG-Regelungen tendieren somit zu einer Verschiebung des Verbrauchs

der knapperen Ressourcen Öl und Gas zu den noch in großer Menge vorhandenen Ressourcen Braun- und Steinkohle. Im Sinne einer Schonung knapper Energierohstoffe wird somit das Ziel einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs erreicht.

Aus Sicht der Systemstabilität fällt die Bewertung durchwachsen aus. Zum einen ist die Stromerzeugung durch die Photovoltaik variabel und nur bedingt vorhersehbar, was die parallele Bereitstellung von Stromerzeugungskapazitäten voraussetzt. Zum anderen reduziert sie den Ausbaubedarf der Übertragungsnetze für die Vernetzung der südlichen Landesteile, da sie dort lokale Erzeugungskapazität bereitstellt. Für die Verteilnetze wiederum stellt sich die Situation schwieriger dar. Sie sind nicht auf eine dezentrale Einspeisung ausgelegt. Es erfordert beträchtliche Investitionen, um die Verteilnetze dem Ausbau der Photovoltaik anzupassen. In der öffentlichen Debatte nehmen die großen Übertragungsnetztrassen, die durch den Ausbau der Windenergie bedingt sind, einen breiten Raum ein. Die Mehrzahl der Aufwendungen und Investitionen fließt allerdings bereits jetzt in das Verteilnetz. Der Steckbrief in Kapitel 5.9 widmet sich speziell diesem Aspekt, vergleiche hierzu auch Abbildung 23.

Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit (Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, Bezahlbarkeit für den Endverbraucher)

Die Gesteungskosten von durch Photovoltaik erzeugtem Strom sind auf absehbare Zeit höher, als die von konventionellen Kraftwerken erzeugtem Strom. Externe Effekte, die durch die angestrebte Minderung der Emission von Treibhausgasen reduziert werden könnten, können sich nicht manifestieren, solange der ETS-Mechanismus die CO₂-Emissionen deckelt. Es gibt eine Reihe weiterer volkswirtschaftlicher Einflüsse, die allerdings schwierig zu quantifizieren sind.

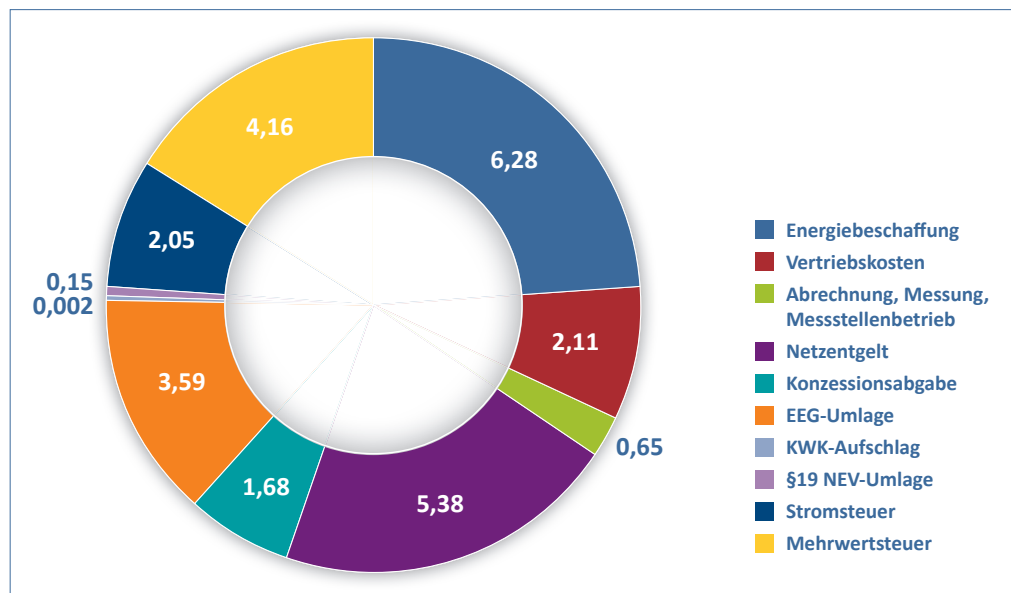


Abbildung 8: Zusammensetzung des Strompreises für Haushaltskunden in €ct für 2012.⁴¹ Durchschnittlicher Strompreis: 26,053 €ct/kWh.

Andererseits sorgte die Solarförderung für eine starke industrielle Entwicklung auf dem Gebiet in Deutschland, was einen positiven volkswirtschaftlichen Beitrag erbrachte. Leider ging dieser Wettbewerbsvorteil verloren und der Produktionsschwerpunkt von Solarmodulen ist nach Asien abgewandert. Durch die Förderung beziehungsweise die teilweise Umlage derselben auf den Strompreis sind Wettbewerbsnachteile für stromintensive Industrien entstanden. Diese und weitere Faktoren, die einzeln und in ihrem Zusammenwirken kaum quantifizierbar sind, erschweren eine Analyse der volkswirtschaftlichen Wirkung der Photovoltaikförderung so weit, dass es kaum möglich ist, das Erreichen dieses Ziels des EEG zu verifizieren.

Der Endverbraucher bezahlt die Förderung der Photovoltaik über die EEG-Umlage. Diese enthält (neben anderen Posten) die Differenz zwischen der Vergütung des Photovoltaikstroms und des damit erzielten Erlöses. Da die Vergütung deutlich höher liegt als der Marktpreis für Strom und die erneuerbaren Erzeugungskapazitäten weiter ausgebaut werden,

wird die Umlage absehbar weiter ansteigen. Die Übersicht der Zusammensetzung des Strompreises für Haushaltskunden in Abbildung 8 zeigt die unterschiedlichen Komponenten auf.⁴²

Weitere Aspekte

Auf den ersten Blick erreicht worden ist hingegen das Ziel, die Erforschung von Technologien zur Bereitstellung elektrischer Energie durch Photovoltaik zu fördern.⁴³ Deutschland ist auf diesem Gebiet international führend, und ein positiver Einfluss der Förderung der Marktdurchdringung erscheint naheliegend. Allerdings ist die innovationsfördernde Wirkung durch das EEG umstritten.^{44,45}

Alle oben beschriebenen Effekte gelten allerdings nur für den „Bilanzraum“ Europa, in dem das ETS seine Wirkung entfaltet. Weltweit kann die Förderung der Photovoltaik in Deutschland durchaus einen Beitrag zur Senkung von Treibhausgasemissionen entfalten. Wenn die Förderung

⁴² Ebd.

⁴³ ISI 2014.

⁴⁴ Ebd.

⁴⁵ EFI 2014.

⁴¹ BDEW 2013-1.

zur oben beschriebenen Kostensenkung der Bereitstellung elektrischer Energie durch Photovoltaik führt, werden solche Anlagen an günstigen Standorten eher wettbewerbsfähig im Vergleich zur Bereitstellung durch fossile Energieträger. Wenn also elektrische Energie außerhalb des ETS-Raumes durch günstiger werdende Photovoltaik erzeugt wird, sinken global die Emissionen von Treibhausgasen. Derselbe Mechanismus würde ebenfalls zu einem geringeren Verbrauch an fossilen Energieressourcen außerhalb des ETS-Raumes führen.

Fazit

Die Photovoltaikförderung durch das EEG verfehlt wesentliche im Gesetz in-

tendierte Ziele, möglicherweise mit Ausnahme der Technologieförderung und -weiterentwicklung. In der gegenwärtigen Ausprägung und in der Wechselwirkung, insbesondere innerhalb des ETS, liefert die Photovoltaikförderung keinen Beitrag zum Klimaschutz, einen nicht-eindeutigen Beitrag zur Ressourcenschonung und dies zu sehr hohen volkswirtschaftlichen Kosten. Das Verfehlen praktisch aller Ziele des EEG ist im Wesentlichen auf die gleichzeitige Geltung des ETS zurückzuführen. Wenn die Ziele des EEG Bestand haben sollen, sollte dieser grundsätzliche Konflikt zunächst aufgelöst werden, bevor die Regelungen des EEG angepasst werden.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem

- a. Senkung von Treibhausgasemissionen unterbleibt.
- b. Zertifikatepreis sinkt durch Ausbau der Photovoltaik.
- c. Verbesserte wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit von Anlagen mit hohen spezifischen Emissionen (Braunkohle, Steinkohle) im Vergleich zu Anlagen mit geringen spezifischen Emissionen (Erdgas).
- d. Investitionen und Entwicklung in alternative, kostengünstigere CO₂-Minderungstechnologien unterbleiben.

2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)

- a. (Börsen-)Strompreis sinkt durch zunehmende Einspeisung.
- b. EEG-Umlage und Haushaltsstromkosten steigen.
- c. Verstärkter Netzausbau der Verteilnetze nötig.

3. Tarife/Kostenallokation

Durch steigende Strompreise aufgrund von Umlagen (EEG, Netze, usw.) wird die Investition in Photovoltaik für Selbstverbraucher auch ohne Förderung attraktiver, was zu einem weiteren Anstieg der Umlagen führt.

4. Bilanzraum

Die Erwartung von steigenden Energiekosten kann zu einer Abwanderung von energieintensiver Industrie außerhalb des EEG- und ETS-Bereichs führen, was global höhere Treibhausgasemissionen zur Folge hätte.

5. Kopplung Energiepreise

Ausbau an Stromerzeugungskapazitäten im Bereich der erneuerbaren Energien führt zu einer Senkung der Nachfrage für Erdgas und damit zu einem tendenziell sinkenden Preis.

6. Speicherbarkeit

Je mehr volatiler Photovoltaikstrom erzeugt wird, desto geringer ist sein (volkswirtschaftlicher) Wert. Gleichzeitig entsteht der betriebswirtschaftliche Anreiz für den Anlagenbetreiber zur dezentralen Speicherung, was unter den gegenwärtigen Bedingungen des EEG zu einer weiteren Belastung der Endverbraucher führt.

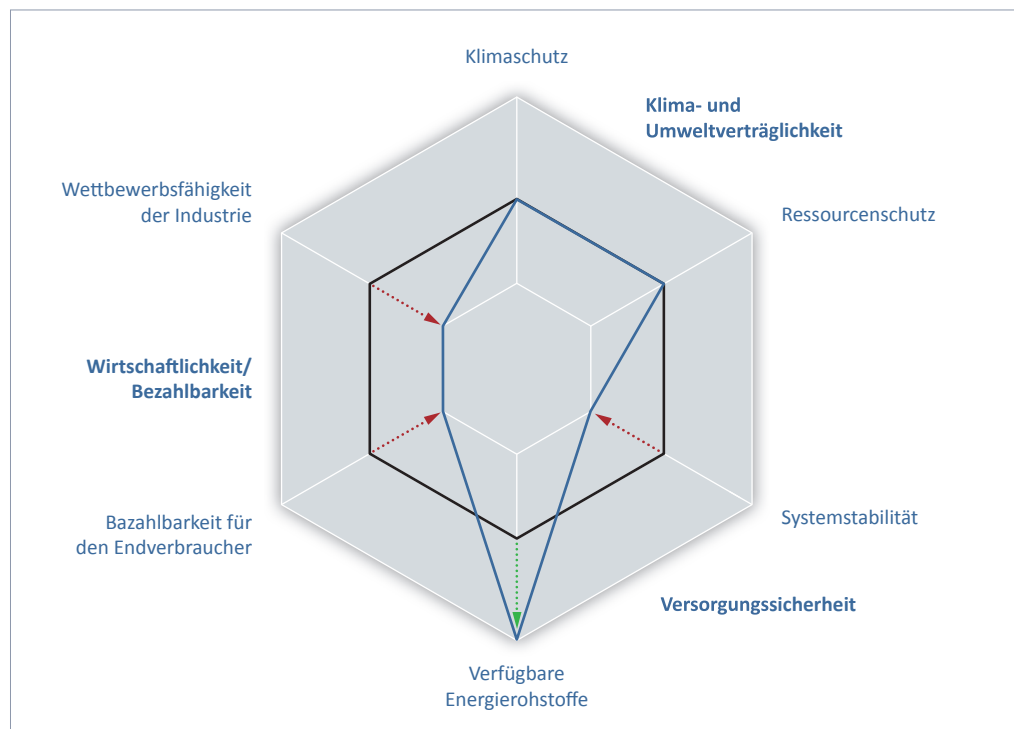


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Ausbaus der dezentralen Photovoltaik bezüglich der Ziele im energiepolitischen Zieldreieck. Die Änderungen sind relativ zur Ausgangssituation (mittleres schwarzes Sechseck). So verbessert (nach außen gerichteter, grüner Pfeil) sich die Verfügbarkeit von Energierohstoffen durch geringere Inanspruchnahme derselben, während sich die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und die Bezahlbarkeit für den Endverbraucher durch höhere Energiekosten ebenso verschlechtern (nach innen gerichtete, rote Pfeile) wie die Systemstabilität durch den Zubau und Einspeisevorrang volatiler Stromerzeugung (Wind und Photovoltaik). Bezüglich des Klima- und des Ressourcenschutzes ergeben sich keine relevanten Änderungen.

5.2 Umweltfreundlicher Betrieb von elektrischen Wärmepumpen wird durch die EEG-Umlage unrentabler

Der Inhalt dieses Steckbriefes wurde bereits in Kapitel 4.2 in anderer Form dargestellt.

Maßnahme und intendierte Wirkung

Mit dem EEG soll die Nutzung erneuerbarer Energien gefördert werden, indem Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien über Vergütungen und Marktprämien gefördert wird. Hiermit soll unter anderem ein positiver Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.

Tatsächlicher Effekt

Der Ausbau und Einsatz von unter Klimaschutzgesichtspunkten sinnvollen Wärmepumpen wird durch den EEG-finanzierten

Ausbau der erneuerbaren Energien wirtschaftlich unattraktiver.

Erläuterung

Wärmepumpen stellen Wärme für Warmwasser oder Heizungszwecke zur Verfügung. Während ein Großteil der produzierten Wärme aus der Umgebung entzogen wird, benötigt die Wärmepumpe elektrischen Strom, um ihren Kompressor anzutreiben. Im Vergleich zu einer alternativen Heizung, zum Beispiel mit Erdgas, stellt die Wärmepumpe eine umweltfreundlichere Alternative dar, da deutlich weniger Primärenergie eingesetzt wird.

Klima- und Umweltverträglichkeit (Klima- und Umweltschutz)

Wärmepumpen stellen eine umweltfreundlichere Alternative zu gängigen Systemen für die Raumheizung und Warm-

wasserbereitstellung dar. Sie funktionieren auf Grundlage einer Temperaturdifferenz der Umgebungstemperatur und einer Reservoirtemperatur. Ein flüssiges Arbeitsmedium mit einem niedrigen Siedepunkt nimmt die Wärme aus dem Reservoir (zum Beispiel dem Erdreich) in einem Verdampfer auf und verdampft. Der Dampf wird durch einen stromgetriebenen Kompressor verdichtet, wodurch er sich erwärmt. Der verdichtete Dampf kondensiert im Kondensator und gibt seine Wärme ab, zum Beispiel an die Raumheizung. Das Arbeitsmedium wird auf den Ausgangsdruck entspannt und wieder in den Verdampfer geleitet, wodurch der Kreislauf geschlossen ist, vergleiche hierzu auch Abbildung 6. Da Wärmepumpen nur auf Basis der Umgebungswärme und des zugeführten Stroms funktionieren, verursacht ihr Betrieb keine weiteren CO₂-Emissionen, denn der Stromsektor ist im ETS eingebunden. Im Gegensatz dazu fallen die Emissionen, die zum Beispiel ein erdgasbetriebener Heizkessel emittiert, zusätzlich zu den im ETS-System gedeckelten europäischen Emissionen an.

Versorgungssicherheit (Systemstabilität, Verfügbarkeit von Energierohstoffen)

Die Nutzung von Wärmepumpen reduziert die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen, die in alternativen Heizsystemen benutzt werden würden. Dies sind insbesondere Heizöl und Erdgas. Der Einsatz von Wärmepumpen nutzt „besser verfügbare“ Energierohstoffe, also Kohle, Kernkraft und erneuerbare Energien, und schont die „weniger verfügbaren“ Energierohstoffe Erdgas und Erdöl. Allerdings erhöht sich durch die vermehrte Stromnutzung prinzipiell der Zertifikatspreis und macht damit Erdgas relativ konkurrenzfähiger zur Nutzung als Kohle. Die Balance der beiden Mechanismen ist gegenwärtig nicht verlässlich abzuschätzen.

Wärmepumpen sind auch für das intelligente Lastmanagement geeignet, indem sie Zeiten mit hohem Wind-/Sollargebot mit niedrigen Strompreisen

nutzen und bei geringer Einspeisung der erneuerbaren Energien nach Möglichkeit weniger genutzt werden. Die Wärmespeicherkapazität des Gebäudes (oder auch eines Warmwassertanks) erlaubt einen dargebotsorientierten Betrieb im Tagesverlauf.⁴⁶

Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit (Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, Bezahlbarkeit für den Endverbraucher)

Die Wirtschaftlichkeit eines Wärmepumpensystems im Vergleich zu einem alternativen System, zum Beispiel einer Erdgasheizung, wird aus Sicht des Endverbraucher durch die jeweiligen Investitions- und Betriebskosten definiert. Letztere sind vereinfacht die Kosten für benötigten Strom beziehungsweise das benötigte Erdgas. Um Wärmepumpen zu fördern, bieten alle großen Stromanbieter spezielle Tarife für Wärmepumpen an, deren Preise ca. 5 €/kWh unter den regulären Strompreisen für Haushalte liegen. Wenn ein Strompreis von 20 €/kWh und eine Arbeitszahl von 4 angenommen werden, so liegt der Preis pro kWh generierte Wärme bei 5 €/kWh_{Wärme}. Im Vergleich dazu liegt der Erdgaspreis für Haushalte bei ca. 7 €/kWh_{Wärme}. Allerdings liegen die Anschaffungskosten für Wärmepumpen in der Regel deutlich über denen einer modernen Erdgasbrennwertheizung. Die Wirtschaftlichkeit hängt also von der Einzelfallbetrachtung und den relativen Energiepreisen von Strom zu Erdgas ab.

Durch die Förderung der erneuerbaren Stromerzeugung über das EEG wird der Strompreis zusätzlich und in Zukunft ansteigend belastet. Ein stärkerer Anstieg des Strompreises (+36 Prozent, nominal, Zeitraum 2006-2012), auch durch den Anstieg der EEG-Umlage, relativ zum Anstieg des Gaspreises (+11 Prozent, nominal, Zeitraum 2006-2012) führt zu einer schlechteren (betriebs-) wirtschaftlichen Einschätzung der Wärme-

⁴⁶ BDEW/ZVEI 2012.

pumpentechnologie relativ zur Alternative, der Erdgasbrennwertheizung,⁴⁷ Ohne den reduzierten Strompreis für Wärmepumpenbetreiber wären Wärmepumpen als Heizsysteme gegenüber der Gasbrennwertheizung nicht konkurrenzfähig.

Volkswirtschaftlich betrachtet fallen für den Wärmepumpenbetrieb kaum Zusatzkosten an. Im Wesentlichen ist dies der Brennstoffmehrbedarf im Kraftwerkssektor. Ein zusätzlicher Netzausbau ist in der Regel nicht erforderlich und die CO₂-Emissionen unterliegen dem Cap des Emissionshandels, in den der Stromsektor eingebunden ist. Der zusätzliche Strombedarf für die Bereitstellung der Wärme über die Wärmepumpen führt

tendenziell zu einer leichten Verteuerung der Zertifikate und damit zu einem wirtschaftlichen Anreiz für Technologien mit geringeren Emissionen (Gas- statt Kohlekraftwerke).

Fazit

Betriebswirtschaftliche Anreize sollten sich stärker an der volkswirtschaftlichen Attraktivität orientieren. Der Ausbau der Wärmepumpen erscheint sowohl aus volkswirtschaftlichen als auch aus Klimaschutzaspekten attraktiver, als er sich aktuell betriebswirtschaftlich darstellt. Die voraussichtlichen Strompreisanstiege durch die EEG-Umlage verschlechtern die betriebswirtschaftliche Bilanz der Wärmepumpe weiter.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
 - a. Keine Erhöhung der CO₂-Emissionen bei Ausbau der strombasierten Wärmeversorgung.
 - b. Erhöhung der CO₂-Preise, damit geringerer Kohle-, aber erhöhter Gaseinsatz.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. EEG-Umlage und Haushaltsstromkosten steigen.
 - b. Senkt die betriebswirtschaftliche Attraktivität des Wärmepumpeneinsatzes für den Nutzer.
3. Tarife/Kostenallokation

Volkswirtschaftliche Vorteile spiegeln sich nicht in betriebswirtschaftlichen Kosten wider.
4. Bilanzraum

Unterschiede des Bilanzraumes von ETS und EEG führen dazu, dass die Vorteile, die sich im ETS ergeben, nicht im EEG berücksichtigt sind, trotz gleicher Zielsetzung (Minderung der Treibhausgasemissionen).
5. Kopplung Energiepreise

Direkte Konkurrenz von Energieträgern für das gleiche Produkt (Wärme). Relative Preise entscheiden über die Wirtschaftlichkeit der Systeme.
6. Speicherbarkeit

Intelligente Wärmepumpen können zusammen mit der jeweiligen Wärmekapazität eines Wassertanks (oder des gesamten Gebäudes) als virtueller Stromspeicher und für Lastverschiebungen genutzt werden und damit einen Beitrag für die Systemstabilität der Stromversorgung leisten.
7. Rebound

Keine speziellen Effekte.

⁴⁷ BMWi 2014.

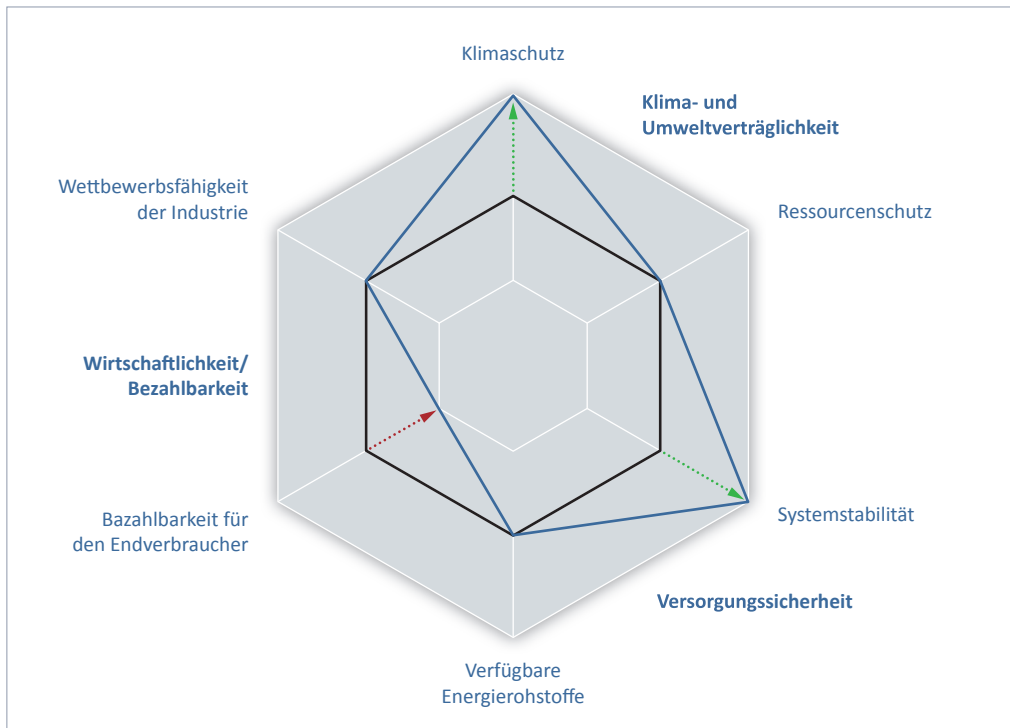


Abbildung 10: Auswirkungen eines verstärkten Wärmepumpeneinsatzes auf das energiepolitische Zieldreieck.

Der Klimaschutz verbessert sich aufgrund der Integration eines zuvor nicht durch das ETS geregelten Bereichs in den durch das ETS geregelten Bereich. Ebenso profitiert die Systemstabilität durch die besseren Steuerungsmöglichkeiten der Wärmepumpe (nach außen gerichtete, grüne Pfeile). Dies geht mit einer erhöhten Kostenbelastung (nach innen gerichteter, roter Pfeil) für den Endverbraucher einher, da die EEG-Umlage die Betriebskosten relativ zu den Alternativen erhöht. Die anderen energiepolitischen Ziele sind davon nicht betroffen.

5.3 Sinkende Börsenpreise an der Strombörse kommen nicht beim privaten Endverbraucher an

Sachverhalt

Der Ausbau erneuerbarer Energien führt zu sinkenden Börsenpreisen für elektrische Energie. Im selben Zeitraum sind aber die Verbraucherpreise erheblich gestiegen. Abbildung 11 zeigt die Entwicklung des Phelix Baseload Year Future über die vergangenen sieben Jahre (Spotpreise sind allerdings im Wesentlichen unverändert geblieben) und Abbildung 12 die Verbraucherpreise, wobei die gesamte Preissteigerung auf das Zusammenwirken mehrerer Faktoren zurückzuführen ist, wie in der Abbildung aufgeschlüsselt.

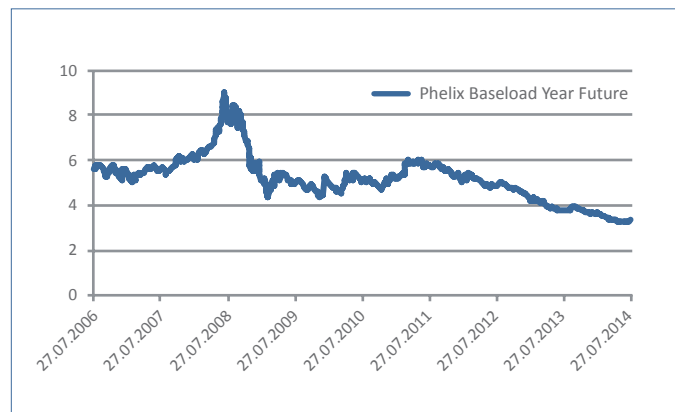


Abbildung 11: Preisentwicklungen für Strom in Deutschland, der Phelix Baseload Year Future in €/MWh. Der Phelix (Physical Electricity Index) Baseload Year Future gibt den Durchschnitt der erwarteten Preise ein Jahr in die Zukunft für die elektrische Energie der Grundlast an. Über derartige Termingeschäfte versorgen sich Großverbraucher typischerweise mit einem großen Teil ihrer elektrischen Energie.⁴⁸

⁴⁸ Phelix 2014.

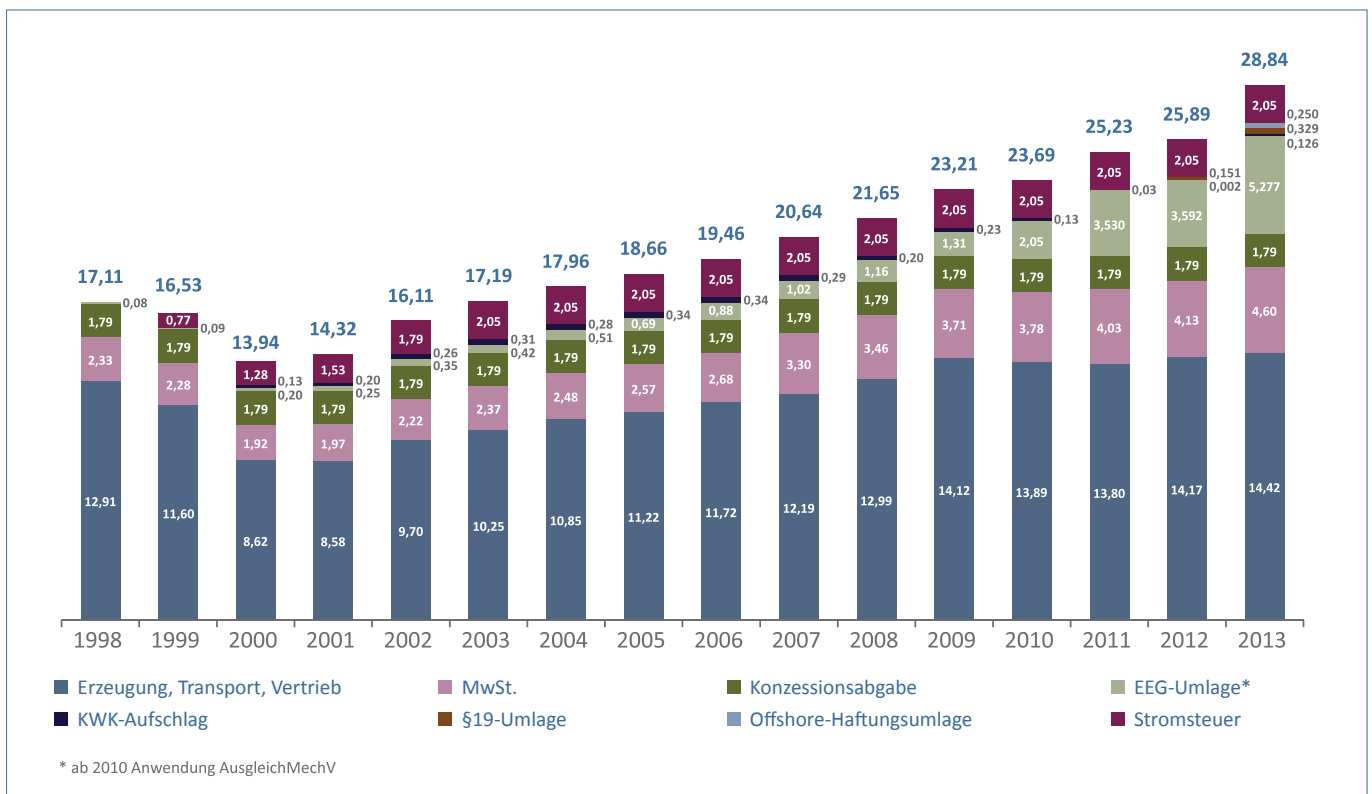


Abbildung 12: Durchschnittlicher Strompreis eines Drei-Personen-Haushaltes in €/kWh bei einem Jahresverbrauch von 3.500 kWh. Es wird die Strompreisentwicklung zwischen 1998 und 2012, aufgeschlüsselt nach Kostenanteilen, wiedergegeben.⁴⁹

Erläuterung

Der scheinbare Widerspruch ist auf das Zusammenwirken der Förderung von erneuerbaren Energien (EEG) und den dadurch erreichten Ausbau des Angebots elektrischer Energie und die Tarife/Kostenallokation im Energiemarkt zurückzuführen. Wenn das Angebot an elektrischer Energie, die im Falle erneuerbarer Energien zu einem festen Preis abgenommen wird, erhöht wird, dann führt dies zu einer Senkung der Marktpreise, da die höheren Kosten der geförderten erneuerbaren Energie durch die EEG-Umlage von den Endverbrauchern aufgefangen und bei der Preisbildung am Markt nicht einbezogen werden.

Die Strompreisbildung an der Börse verläuft über einen Merit-Order-Mechanismus auf Basis der Grenzkosten der Kraftwerke. Die benötigte Strommenge wird nach Abzug der Strommenge, die durch erneuerbare Energien (bevorzug-

te Einspeisung) bereitgestellt wird, und durch Must-run-Kraftwerke (zur Sicherung der Netzstabilität) durch jene Kraftwerke gedeckt, welche die niedrigsten Kosten für die Produktion einer weiteren Kilowattstunde Strom aufweisen.

Gemäß der Ausgleichsmechanismusverordnung (§2 AusglMechV) dürfen die Übertragungsnetzbetreiber den nach EEG vergüteten Strom nur am vortägigen oder untertägigen Spotmarkt einer Strombörse vermarkten.⁵⁰ Dabei ist zu beachten, dass der Strom aus EEG-geförderten Anlagen eingespeist werden muss und durch die EEG-Vergütung mit einem Festpreis außerhalb des Börsenhandels versehen ist. De facto wird EEG-geförderter Strom an der Börse mit einem Preis von 0,00 Euro versehen und senkt die Strommenge, die durch andere Kraftwerke bereitgestellt werden muss. Da durch die erneuerbare elektrische Energie ein zusätzliches

49 BDEW 2013-2.

50 AusglMechV 2014.

Dargebot am Spotmarkt angeboten wird, wird Strom aus Kraftwerken niedriger Merit-Order – der zu höheren Kosten bereitgestellt wird – nicht mehr an den Markt kommen. Der Spotmarktpreis sinkt damit, und zwar in der Tendenz umso stärker, je höher die zusätzlichen Mengen sind, die an den Markt kommen.

Auf Basis der Daten von 2008 wurde dieser Effekt auf 2,4 (€/MWh)/GWh_{REG} und eine Senkung des durchschnittlichen Strompreises von 11,0 €/MWh abgeschätzt.⁵¹ Bei einem Verbrauch von 492 TWh und einer EEG-Förderung von 8.717 Millionen Euro ergibt sich eine durchschnittliche EEG-Förderung von 17,7 €ct pro Kilowattstunde. Die Differenz zwischen dem Marktpreis und der Einspeisevergütung wird gemäß §37 EEG und §3 AusglMechV auf die Endverbraucherpreise umgelegt („EEG-Umlage“).

Bei erhöhter Einspeisung von erneuerbarer elektrischer Energie erhöht sich dabei über zwei Mechanismen der Endverbraucherpreis:

1. Aufgrund der höheren Menge erneuerbarer elektrischer Energie erhöht sich die EEG-Umlage.
2. Aufgrund des höheren Dargebots an erneuerbarer elektrischer Energie sinkt der Börsenpreis an der Strombörse. Damit steigt die pro Kilowattstunde zu zahlende EEG-Umlage (Differenz von garantierter EEG-Vergütung und Strompreis).

Beides wirkt in die gleiche Richtung, die Strompreise für den Endverbraucher steigen. Schließlich wird auf die EEG-Umlage zusätzlich Umsatzsteuer erhoben, was den Endverbraucherpreis nochmals steigen lässt.

Fazit

Der Ausbau erneuerbarer Energien, die unter das EEG fallen, und die EEG-Umlage

nach §37 EEG und §3 AusglMechV führen zu tendenziell sinkenden Börsenpreisen für elektrische Energie und steigende Endverbraucherpreise. Diese Diskrepanz ist den Bürgern nur schwer zu vermitteln und kann zu sinkender Akzeptanz der Energiewende führen. Wenn der EEG-Strom im Rahmen der Preisbildung an der Strombörse jeweils mit seiner entsprechenden EEG-Vergütung bewertet werden würde, bei gleichzeitigem Einspeisevorrang, so wären die Kosten für die Förderung der erneuerbaren Energien bereits eingepreist. Unter diesen Umständen würde keine EEG-Umlage anfallen (abgesehen von den anderen Beiträgen, insbesondere durch die Gegenfinanzierung der Ausnahmeregelungen). Dann würde sich die Entwicklung des Börsenpreises im Verbraucherpreis widerspiegeln.

Effekte höherer Ordnung

Der beschriebene Mechanismus ist über verschiedene Mechanismen rückgekoppelt. Steigende Verbraucherpreise wirken sich senkend auf die Nachfrage aus – wenn auch nur in geringem Maße, da der Stromverbrauch von Haushaltskunden nur wenig elastisch ist. Sinkende Nachfrage führt zu weiter sinkenden Börsenpreisen mit damit verbundener weiterer Erhöhung der EEG-Umlage – absolut aufgrund des größeren Abstands zwischen Börsenpreis und Einspeisevergütung und relativ aufgrund der Umlage auf einen insgesamt niedrigeren Verbrauch. Dieser Effekt kann aber durch zwei gegenläufige Mechanismen neutralisiert oder in sein Gegenteil verkehrt werden: (a) Steigende Haushaltspreise fördern den Eigenverbrauch regenerativ bereitgestellter Energie, die somit nicht mehr am Markt angeboten wird. (b) Die Nachfrage von Industriekunden ist elastischer als die von Haushalten. Da diese von sinkenden Börsenpreisen profitieren können, kann dies zu einer Erhöhung der Nachfrage führen. Welche Effekte überwiegen, muss durch eine genaue Modellierung ermittelt werden, wobei unklar ist, wie zuverlässig die gewonnenen Aussagen sind.

⁵¹ Roon/Huck 2010.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Keine speziellen Effekte identifiziert.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. Börsenstrompreis sinkt durch Einspeisevorrang der EEG-geförderten Anlagen.
 - b. EEG-Umlage steigt entsprechend.
3. Tarife/Kostenallokation
EEG-Umlage kompensiert reduzierten Börsenpreis und wird verbrauchsabhängig erhoben.
4. Bilanzraum
Keine speziellen Effekte identifiziert.
5. Kopplung Energiepreise
EEG-Strom hat einen Börsenwert von 0,00 Euro. Gemäß der Merit-Order der Kraftwerke sind Braunkohlekraftwerke wettbewerbsfähiger als Gaskraftwerke.
6. Speicherbarkeit
Keine speziellen Effekte identifiziert.
7. Rebound
Keine speziellen Effekte identifiziert.

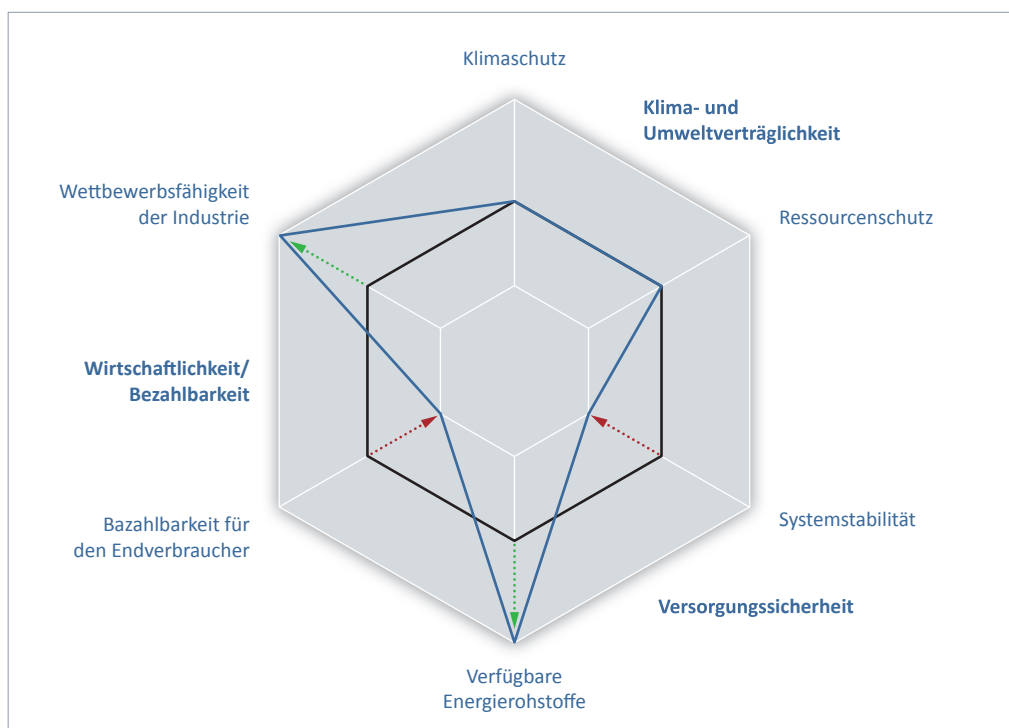


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Börsenpreiseffekts in dem energiepolitischen Zieldreieck. Die Wettbewerbsfähigkeit der (stromintensiven) Industrie verbessert sich durch niedrigere Strompreise bessere Verfügbarkeit der Energierohstoffe begründet durch den verminderten Verbrauch von fossilen Energieträgern (nach außen gerichtete, grüne Pfeile). Die Systemstabilität nimmt durch die Verdrängung der flexiblen Kraftwerke ab. Der Endverbraucher erfährt eine zusätzliche Kostenbelastung über die Förderung der erneuerbaren Energien über die EEG-Umlage (nach innen gerichtete, rote Pfeile).

5.4 Ausbau der Photovoltaik verteilt Belastungen und Gewinne ungleich

Zu den geografischen Unterschieden, die in der Natur der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien liegen, kommen soziale Ungleichgewichte hinzu.⁵² Zwar öffnet das EEG den Stromerzeugungsmarkt für eine neue Gruppe von Produzenten, nämlich für diejenigen, die sich die Investition (bei geeigneter Lage) insbesondere in Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) leisten können. In der Umsetzung bevorzugt sind daher Eigenheimbesitzer und Landwirte mit ausreichend Kapital für die anstehenden Investitionen. Diese wiederum werden über Vergütungen und die EEG-Umlage von allen nicht-befreiten Verbrauchern bezahlt.

Maßnahme und intendierte Wirkung

Der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland wird über den Umweg der EEG-Umlage vom Endverbraucher finanziert. Die EEG-Umlage wird als ein prozentualer Aufschlag auf die abgenommene Menge an elektrischer Energie erhoben. Hiermit wird eine gerechte Lastenverteilung auf alle Stromkunden (abgesehen von befreiten Industriezweigen) in Abhängigkeit von dem jeweiligen Elektrizitätsverbrauch angestrebt.

Tatsächlicher Effekt

In der Realität werden durch die EEG-Umlage ärmere Bevölkerungsschichten in mehrfacher Weise stärker belastet als einkommensstärkere. Diese Situation wird auch dann anhalten, wenn die Photovoltaikkosten Netzparität erreichen und keine Förderung mehr erforderlich ist.

Erläuterung

Der Effekt ist auf das Zusammenwirken der Förderung von erneuerbaren Energien (EEG) und die Tarife/Kostenallokation im Energiemarkt zurückzuführen.

Der Effekt wird auf drei Wegen hervorgerufen:

1. Zunächst macht bei einkommensschwächeren Bevölkerungsschichten der Verbrauch an elektrischer Energie einen prozentual höheren Anteil am Haushaltseinkommen aus im Vergleich zu einkommensstärkeren Bevölkerungsschichten (5,19 Prozent im untersten Dezil der Haushaltseinkommen versus 1,99 Prozent im obersten Dezil).⁵³ Eine Erhöhung der Strompreise wirkt sich also relativ zum verfügbaren Einkommen bei ärmeren Familien stärker aus.
2. Der Umverteilungseffekt geht allerdings über diesen Effekt hinaus. Die Förderung der Einspeisung von Photovoltaikstrom, die in der Vergangenheit gute Renditen abwarf, kann in der Regel von Besitzern von Eigenheimen genutzt werden, die zudem die erforderliche Investition finanzieren können. Dies ist der einkommensstärkere Teil der Bevölkerung.⁵⁴ Die EEG-Umlage – wie auch die Netzumlage – wird aber von allen Stromkunden finanziert. Die Kosten für die Förderung der elektrischen Energie aus EEG-geförderten Anlagen, eben auch aus Photovoltaik, werden auf alle Stromkunden umgelegt. Im Ergebnis zahlen die einkommensschwächeren Haushalte die Amortisierung und den Gewinn aus Anlagen, die größtenteils von den wohlhabenderen Haushalten betrieben werden.
3. Dieser Effekt bliebe auch dann wirksam, wenn bei Netzparität auf die Förderung erneuerbarer Energien nach dem EEG komplett verzichtet würde. Die Eigentümer von Eigenheimen würden dann einen Teil des Eigenverbrauchs durch die eigene Photovoltaikanlage decken, gegebenenfalls unterstützt durch einen

⁵³ Neuhoff et al. 2012.

⁵⁴ Destatis 2013-1.

⁵² IASS 2013.

Von ... bis unter ... Euro	Deutschland		Früheres Bundesgebiet		Neue Länder und Berlin	
	Mieter/ -innen	Eigentümer/ -innen	Mieter/ -innen	Eigentümer/ -innen	Mieter/ -innen	Eigentümer/ -innen
unter 900	86,4 %	13,6 %	85,8 %	14,2 %	87,8 %	12,2 %
900 bis 1 300	79,1 %	20,9 %	77,0 %	23,0 %	84,5 %	15,5 %
1 300 bis 1 500	70,4 %	29,6 %	67,7 %	32,3 %	78,4 %	21,6 %
1 500 bis 2 000	64,7 %	35,3 %	62,8 %	37,2 %	71,0 %	29,0 %
2 000 bis 2 600	52,1 %	47,9 %	49,8 %	50,2 %	61,0 %	39,0 %
2 600 bis 3 600	40,5 %	59,5 %	38,8 %	61,2 %	49,4 %	50,6 %
3 600 bis 5 000	29,2 %	70,8 %	28,4 %	71,6 %	34,2 %	65,8 %
5 000 bis 18 000	20,9 %	79,1 %	20,6 %	79,4 %	22,7 %	77,3 %

Tabelle 2: Haushaltseinkommen und Hausbesitz.⁵⁵

lokalen Batteriespeicher. Dennoch würde die Mehrzahl der Eigenheime aus Gründen der Versorgungssicherheit weiterhin ans Netz angeschlossen bleiben/werden. Dies würde wiederum dazu führen, dass die Besitzer von PV-Anlagen nur noch wenig elektrische Energie über das Netz beziehen und sich damit – aufgrund der rein verbrauchsabhängigen Kostenallokation – nur noch unwesentlich an der Netzzumlage beteiligen würden, obwohl die Netzkosten für diese Stromkunden im Wesentlichen unverändert bleiben würden. Um das Netz finanzieren zu können, müsste die Netzzumlage dann steigen, wodurch die Haushalte, die keinen Solarstrom für den Eigenverbrauch produzieren können (Mietwohnungen), höher belastet würden. Auch dies führt im Ergebnis zu einem höheren Beitrag für die Netzzumlage und die EEG-Umlage durch einkommensschwächere Haushalte.

Fazit

Das EEG, jetzt bereits über die Einspeisevergütung, zukünftig verstärkt auch über die Netzzumlage, wird nach den derzeitigen Regelungen überproportional durch einkommensschwächere Haushalte finanziert. Dies birgt erhebliches soziales Konfliktpotenzial. Insbesondere droht hierdurch die Akzeptanz für die Energiewende zu schwinden. Bei weiterem Ausbau insbesondere der Photovoltaik im Eigenheimbereich könnte daher eine veränderte Tarifstruktur auf dem Elektrizitätsmarkt erforderlich werden.

Effekte höherer Ordnung

Mögliche „einfache“ Lösungen des Problems (verbrauchsunabhängige Netzzumlage, „Flatrate“ für Strom...) würden Anreize zum unerwünschten verschwenderischen Umgang mit elektrischer Energie setzen. Daher sind hier innovative Lösungen zu entwickeln, mit denen die Lasten des Ausbaus erneuerbarer Energien gerechter verteilt werden können.

⁵⁵ Destatis 2013-2.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Keine speziellen Effekte identifiziert.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
EEG-Umlage und Haushaltsstromkosten steigen.
3. Tarife/Kostenallokation
 - a. Volkswirtschaftliche Vorteile Kosten (Netzkosten) spiegeln sich nicht in betriebswirtschaftlichen Kosten (PV-Anlagenbetreiber) wider.
 - b. Verteilung Fixkosten auf eine kleinere Gruppe führt zu höherer Umlage, die verstärkt einkommensschwache Haushalte trifft.
 - c. Strommengenbezogene Umlagen (EEG-Umlage, Netzumlage) belasten jene Endverbraucher, die keinen Strom für den Eigenverbrauch erzeugen können stärker als jene, die über eine eigene EEG-geförderte Stromerzeugung verfügen.
4. Bilanzraum
Keine speziellen Effekte identifiziert.
5. Kopplung Energiepreise
Keine speziellen Effekte identifiziert.
6. Speicherbarkeit
In Kombination mit dem Rebound-Effekt wird die Investition in dezentrale Batteriespeicher in Kombination mit Photovoltaikanlagen attraktiv.
7. Rebound
Höhere Umlagen begünstigen den vermehrten Eigenverbrauch.

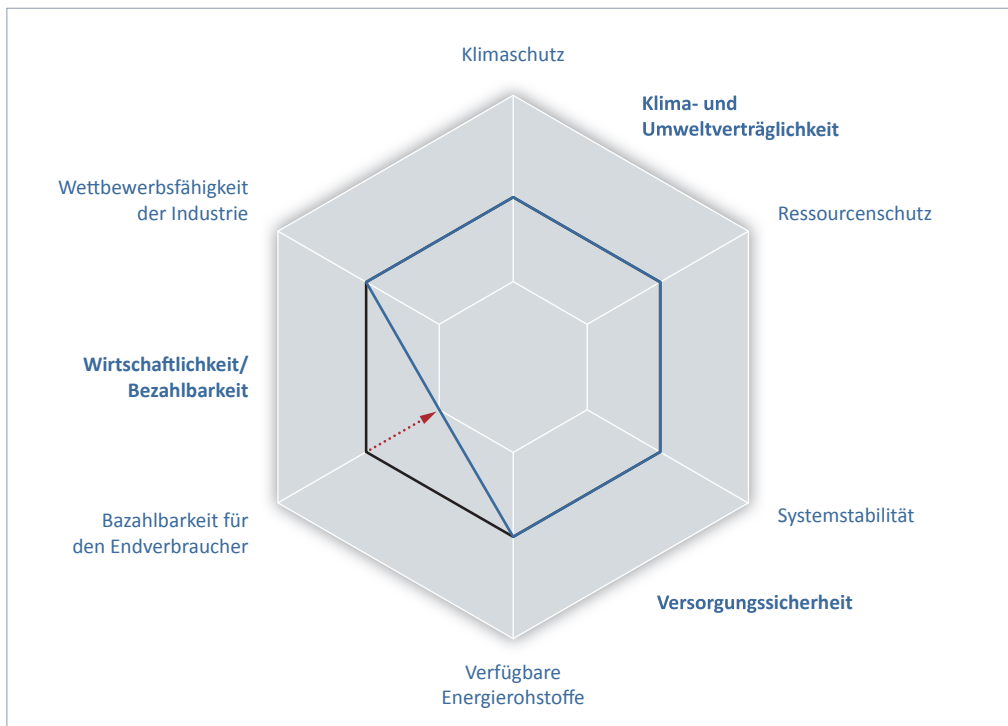


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Effektes der Finanzierung der EEG-Förderung über die EEG-Umlage in dem energiepolitischen Zieldreieck. Sie führt zu einer zusätzlichen Belastung bezüglich der Bezahlbarkeit (nach innen gerichteter, roter Pfeil) für den Endverbraucher durch die Umlage der Vergütungen auf die anderen Verbraucher und lässt die anderen Ziele unbeeinflusst.

5.5 Photovoltaik-Ausbau reduziert Wirtschaftlichkeit von Stromspeichern (Pumpspeicherkraftwerke)

Maßnahme und intendierte Wirkung

Das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) wurde eingeführt, um den Ausbau erneuerbarer Energien (insbesondere Solar- und Windenergie sowie Bioenergie) in einer Weise zu fördern, dass sich die Investition in entsprechende Anlagen auch unter wirtschaftlichen Aspekten lohnt. In allen drei Bereichen ist ein starker Ausbau über die letzten Jahre zu verzeichnen; im Falle der Photovoltaik allein in dem Jahr nach der Energiewende (von 2011 auf 2012) um ca. 30 Prozent auf über 30 GWp beziehungsweise um ca. 45 Prozent auf 28 TWh.

Tatsächlicher Effekt

Naturgemäß variiert die Stromproduktion aus Photovoltaik. Nachts kann keine Einspeisung erfolgen; im Tagesverlauf weist sie ein Maximum mittags auf. Hinzu kommt eine jahreszeitliche Variation mit einem Maximum in den Sommermonaten. Die Relation Sommer zu Winter entspricht der Relation 4 – 8 : 1.⁵⁶ Dem steht zwar ein ungefähr reziproker Verlauf der Einspeisung von Wind gegenüber, allerdings sind Photovoltaikanlagen und die bestehenden Pumpspeicher in Deutschland überwiegend im Süden lokalisiert, weshalb der nachfolgend beschriebene Effekt in sommerlichen Mittagsstunden vermutlich am stärksten ausgeprägt ist.

Die Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern allgemein und Stromspeichern (speziell Pumpspeichern) wird vor allem durch folgende Faktoren bestimmt:

- die Zahl der Zyklen,
- die in jedem Zyklus bewegte Energiemenge,
- und die Differenz zwischen dem Preis,

zu dem die Energie für den Speichervorgang „eingekauft“ wird und dem Preis, zu dem sie wieder in das Netz eingespeist („verkauft“) wird.

Außerdem müssen zur Maximierung der Wirtschaftlichkeit die Phasen niedrigen Preisniveaus lang genug sein, um eine möglichst vollständige Beladung des Speichers zu ermöglichen; Analoges gilt für die Entladephasen. Diese wirtschaftlichen Zusammenhänge sind gültig für alle Speichertechnologien, unabhängig davon, ob Minuten-, Stunden- und Tagesspeicher oder Langzeitspeicher betrachtet werden.

Nicht intendierter Nebeneffekt

Die stark gestiegene Einspeisung von Photovoltaikstrom ins Netz hat einen negativen Einfluss auf den wirtschaftlichen Betrieb von Stunden- und Tagesspeichern im heutigen Energiesystem, also insbesondere für die existierenden Pumpspeicherkraftwerke.

Erläuterung

Wasserpumpspeicherkraftwerke sind die kostengünstigste und praktisch einzige derzeit großtechnisch verfügbare Technologie, um Strom in großen Mengen zu speichern. Der Preisunterschied zwischen Spitzen- und Grundlaststrom war in der Vergangenheit, vor dem massiven Ausbau der Photovoltaik, in den Mittagsstunden am höchsten. In gut vorhersagbarer Weise konnte nachts der Pumpbetrieb erfolgen und mittags auf Turbinenbetrieb umgeschaltet werden.

Insbesondere an Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung ist gerade in den bislang für die Wasserpumpspeicherkraftwerksbetreiber interessantesten Stunden das Stromangebot durch das Dargebot aus Photovoltaikanlagen so weit gestiegen, dass sich in den letzten Jahren nicht nur die maximale Preisdifferenz, sondern auch die durchschnittliche Zeitspanne einer für den Pumpbetrieb und den sich

⁵⁶ Wirth 2014.

anschließenden Turbinenbetrieb wirtschaftlich lohnenden Phase signifikant verringert haben.⁵⁷ Zusammen mit dem aufgrund der verringerten Vorhersagbarkeit wesentlich schwierigeren Anlagenmanagement stellen diese Entwicklungen schon heute die Wirtschaftlichkeit von Pumpspeichern infrage.

Fazit

Neben den hier nicht diskutierten Akzeptanzproblemen aufgrund des starken Eingriffs in die Landschaft beim Bau von Pumpspeicherkraftwerken ist der in diesem Abschnitt beschriebene – ungewollte – Effekt des Ausbaus der Photovoltaik ein starkes Hindernis für den mittel- und langfristig alternativlosen Aufbau von Speicherkapazitäten jeglichen Typus.⁵⁸

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Keine speziellen Effekte identifiziert.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. EEG-Umlage hat zu einem starken Ausbau der Photovoltaikanlagen geführt, die ihre Erzeugungsspitze zur Mittagszeit haben.
 - b. EEG-Strom hat Einspeisevorrang.
3. Tarife/Kostenallokation
 - a. Die EEG-Vergütung erfolgt tageszeitunabhängig.
 - b. Photovoltaikstrom ist bedingt prognostizierbar, ebenfalls sinkt die Prognostizierbarkeit der Nutzung von Pumpspeicherkraftwerken.
 - c. Investitionen in neue Speicher werden unattraktiver.
4. Bilanzraum
Keine speziellen Effekte identifiziert.
5. Kopplung Energiepreise
Keine speziellen Effekte identifiziert.
6. Speicherbarkeit
Wirtschaftlichkeit von Speichern wird prinzipiell reduziert und damit der Aufbau von Speicherkapazitäten und die Entwicklung von Speichertechnologien erschwert.
7. Rebound
Keine speziellen Effekte identifiziert.

⁵⁷ DENA 2012.

⁵⁸ Öko-Institut 2012.

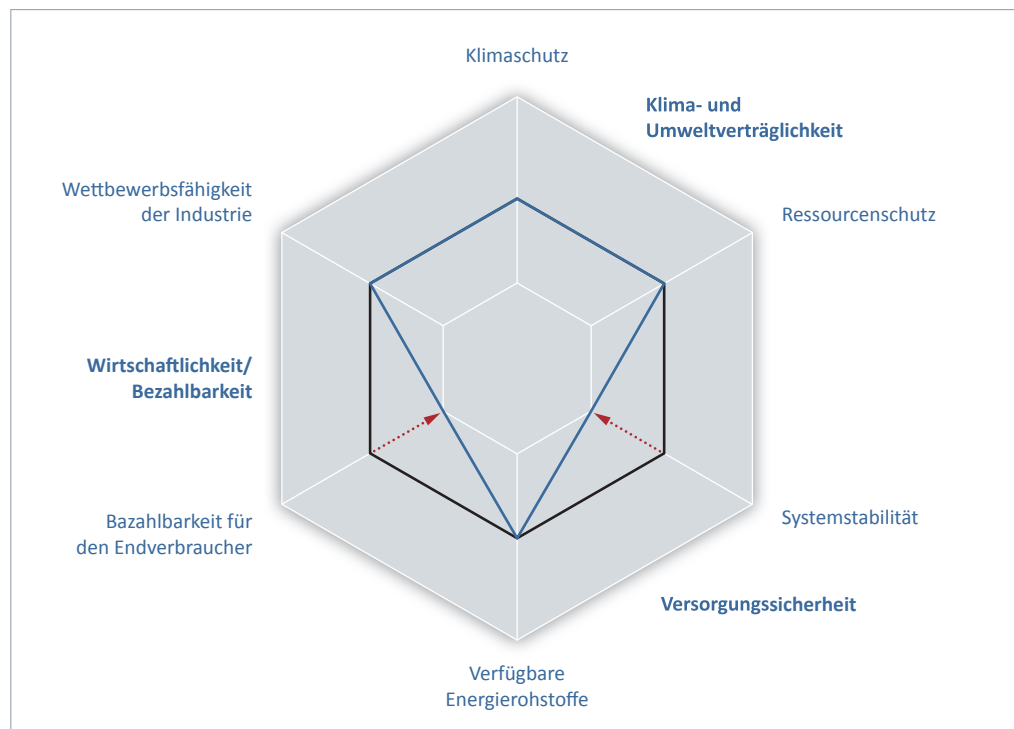


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Effektes der reduzierten Wirtschaftlichkeit von Pumpspeicherkraftwerken durch Ausbau der Photovoltaik in dem energiepolitischen Zieldreieck. Die Systemstabilität wird durch die reduzierte Wirtschaftlichkeit ebenso negativ beeinflusst (nach innen gerichtete, rote Pfeile) wie die Bezahlbarkeit für den Endverbraucher, da die gegenwärtig kostengünstigste Stromspeichertechnologie unwirtschaftlich wird. Die anderen Ziele werden nicht beeinflusst.

5.6 Ausbau kleiner dezentraler KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) erhöht die CO₂-Emissionen

Maßnahme und intendierte Wirkung

Gemäß den Eckpunkten für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm soll die Nutzung der gekoppelten Produktion von Strom und Wärme (KWK) bis 2020 von 12,5 Prozent im Jahr 2007 auf 25 Prozent der gesamten Stromerzeugung verdoppelt werden.⁵⁹ Dabei sollen neben traditionellen Anlagen für die Fernwärmeproduktion oder industrielle KWK auch dezentrale kleinere Anlagen auf Erdgasbasis bis hin zu Mikro-KWK-Anwendungen im Haushalt gefördert werden. Zielsetzung ist es, durch die effiziente Nutzung der Abwärme der Stromproduktion den Energieeinsatz und die CO₂-Emissionen zu senken (vergleiche

hierzu auch die ergänzende Darstellung bei Umbach⁶⁰).

Tatsächlicher Effekt

Der Ausbau und Betrieb von kleinen KWK-Anlagen erhöht nicht nur die Kosten des Energiesystems, sondern auch die CO₂-Emissionen in Europa.

Erläuterung

Die CO₂-Emissionen von Anlagen des Energiesektors sind ab einer Größe von 20 MW Feuerungsleistung im ETS integriert und gedeckelt. Große KWK-Anlagen erhalten Zertifikate für den Wärmeanteil KWK kostenlos allokiert, was ihre Position gegenüber reinen Stromerzeugungsanlagen verbessert.⁶¹ Kleinere Anlagen (< 20 MW) werden nicht von dem europäischen Handelssystem erfasst. Durch den

59 BMWi 2007.

60 Umbach 2015.

61 UBA 2014.

geförderten Betrieb der kleineren Anlagen entstehen zusätzliche CO₂-Emissionen, die in etwa in der Größenordnung der Emissionen einer reinen Erdgasheizung liegen.

Die Bewertung der KWK-Anlage im Sinne der CO₂-Emissionen ist davon abhängig, ob sie wärme- oder stromgeführt betrieben wird. Wärmegeführt betrieben ersetzt sie eine entsprechende Heizung. Der Strom fällt als zusätzliches Produkt an. Da die Emissionen in etwa denen einer Erdgasheizung entsprechen, verhält sich der Ersatz einer Erdgasheizung durch eine kleine wärmegeführte KWK-Anlage aus Sicht der CO₂-Emissionen neutral. Der Betrieb von kleinen, dezentralen wärmegeführten KWK-Anlagen führt zu einem erhöhten Stromdargebot und reduziert den Betrieb von regulären Kraftwerken. Dies wiederum wirkt preisdämpfend auf die CO₂-Zertifikate, wodurch der Betrieb von Kohlekraftwerken attraktiver wird. Die Gesamtemissionen von CO₂ im Rahmen des ETS bleiben ohne zusätzliche Maßnahmen konstant.

Wird die Anlage hingegen stromgeführt betrieben, ersetzt sie Kraftwerke, die im ETS-Bilanzraum integriert sind. Eine zusätzliche Heizung wird gegebenenfalls immer noch benötigt. Daher fallen die Emissionen der stromgeführten KWK zusätzlich durch die im ETS begrenzten Emissionen an.

Da die Kosten der gekoppelten Produktion von Strom und Wärme in kleinen Anlagen deutlich höher sind als die einer Kombination aus reiner Erdgasheizung und einem modernen Gaskraftwerk steigen auch die volkswirtschaftlichen Kosten des Gesamtsystems.

KWK-Anlagen können sowohl wärme- als auch stromgeführt betrieben werden, je nach Anwendungsziel. Dies führt zu einer Minderung der Flexibilität im System, weil in dem Moment, da Wärme

benötigt wird (zum Beispiel im Winter), automatisch auch Strom produziert wird. Die Nutzung von thermischen Speichern kann die Wärmenutzung von der Stromerzeugung entkoppeln, ist jedoch mit Zusatzkosten verbunden.

Fazit

Der geförderte Ausbau der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung sollte hinsichtlich seiner kosten- und emissionssteigernden Wirkung im aktuellen Systemkontext kritisch hinterfragt werden.

Hinweise (weitere Effekte etc.)

Selbst wenn es kein ETS gäbe beziehungsweise wenn kleine KWK-Anlagen vom ETS erfasst wären, sind deren CO₂-Emissionen kaum geringer als die einer Kombination eines modernen Gaskraftwerks und einer modernen Gasbrennwertheizung. Die Kombination aus Stromerzeugung in einem Gaskraftwerk und Heizung mithilfe einer strombetriebenen Wärmepumpe weist sogar geringere Emissionen auf.⁶² Dies liegt im Wesentlichen an dem geringen elektrischen Wirkungsgrad kleiner KWK-Anlagen.

Da der eigenerzeugte und -verbraachte Strom nicht, oder nur eingeschränkt mit Umlagen (EEG, Netzegebühren, KWK-Umlage, Stromsteuer etc.) belastet wird, steigen die spezifischen Stromkosten für andere Verbraucher, die den entsprechenden Anteil der Kosten übernehmen müssen. Das Netz wird aber als Back-up-System und Einspeisekanal dennoch in voller Anschlussleistung benötigt.

⁶² Erdmann/Dittmar 2010.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem (ETS)
 - a. ETS umfasst Anlagen >20 MW.
 - b. Kostenlose Zertifikate für den Wärmeanteil verbessern Wettbewerbsfähigkeit der großen KWK-Anlagen gegenüber Stromerzeugern.
 - c. Kleinere Anlagen werden nicht erfasst und ihre Emissionen verhalten sich kumulativ.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
 - a. Förderung der KWK-Anlagen mit Einspeisevorrang.
 - b. Vergütung nimmt mit zunehmender Größe der Anlagen ab.
3. Tarife/Kostenallokation
 - a. Stromgeführter Betrieb für maximales Ausnutzen der EEG-Förderung sinnvoll.
 - b. Wärmegeführter Betrieb (zum Beispiel im Winter) macht Stromerzeugung unflexibel.
4. Bilanzraum

Innerhalb/außerhalb ETS bestimmt die Bewertung der CO₂-Emissionen.
5. Kopplung Energiepreise

Dezentrale KWK-Anlagen laufen primär auf Erdgasbasis.
6. Speicherbarkeit

Strom und Wärme sind relativ schwer zu speichern. Der Einsatz von Wärmespeichern in dezentralen KWK-Anlagen kann einen Flexibilitätsfreiheitsgrad eröffnen.
7. Rebound

Durch Förderung wird maximale Laufzeit, ungeachtet des aktuellen Wärmebedarfs, unterstützt.

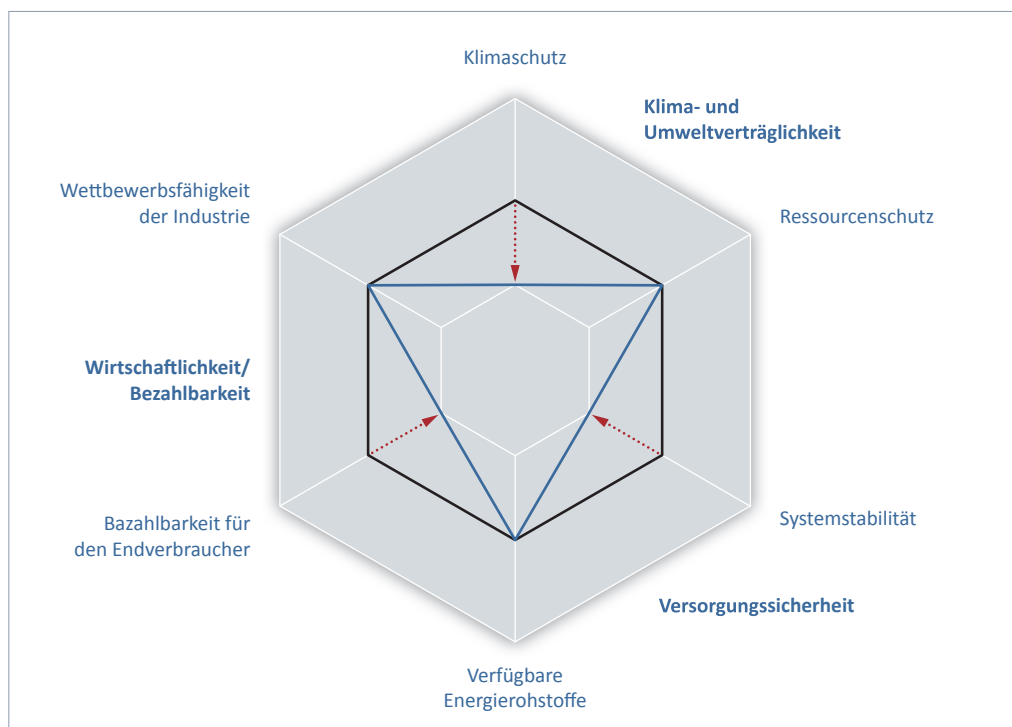


Abbildung 16: Darstellung des Effektes der Förderung dezentraler KWK in dem energiepolitischen Zieldreieck. Sie führt zu geringerer Systemstabilität im Stromnetz, wenn die KWK-Anlage wärmegeführt (zum Beispiel im Winter) betrieben wird, zusätzlichen Kostenbelastungen für den Endverbraucher durch die Entlastung des KWK-Betreibers und zu höheren CO₂-Emissionen (nach innen gerichtete, rote Pfeile), da ein durch das ETS geregelter und gedeckelter Bereich diesem Bilanzraum entzogen wird, wenn dadurch Großkraftwerke verdrängt werden.

5.7 Förderung erneuerbarer Energien erhöht die Laufzeit von Kohlekraftwerken

Maßnahme und intendierte Wirkung

Der Ausbau der erneuerbaren Energien hat unter anderem zum Ziel, die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und damit die CO₂-Emissionen zu senken. Es besteht daher vielfach die Erwartung, dass bei einer Erhöhung des erneuerbar produzierten Stroms die Auslastung von Kohlekraftwerken sinkt.

Tatsächlicher Effekt

Die kohlebasierte Bruttostromerzeugung aus Braun- und Steinkohle schwankt in Deutschland seit 2002 um rund 280 TWh.⁶³ Im Jahr 2013 betrug sie 286 TWh.⁶⁴

Erläuterung

Durch den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird die Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems (ETS) aus dem Energiesektor gesenkt. Hierdurch sinken die Preise für die Emissionszertifikate. Davon profitiert die relative Wettbewerbsfähigkeit der emissionsintensiven Technologien, etwa die kohlebasierte Stromerzeugung gegenüber emissionsarmen Technologien wie zum Beispiel Gaskraftwerken.

Dies führt zu höheren Laufzeiten von Kohlekraftwerken und geringeren Laufzeiten von Gaskraftwerken. Die Gesamtemission an CO₂ in Europa erhöht sich nicht, da diese innerhalb des ETS durch den Cap vorgegeben ist.

Die intendierte CO₂-Reduktion über die Zeit soll durch die zukünftige Absenkung des Cap erreicht werden. Die erneuerbaren Energien leisten einen Beitrag, indem sie durch das CO₂-freie zusätzliche Stromdargebot den Stromsektor entlas-

ten und damit die Einhaltung des Cap vereinfacht wird. Allerdings geschieht dies zu deutlich höheren Kosten (je nach Anlagengröße gemäß EEG-Vergütung entstehen CO₂-Vermeidungskosten für Wind bei (100-150 €/t), bei PV von 650-1050 €/t, als wenn dies allein dem ETS-Mechanismus überlassen würde, dessen Zertifikatepreise seit 2005 zwischen 3 und 30 €/t liegen.⁶⁵ Abbildung 17 stellt die CO₂-Vermeidungskosten, wie sie auf Basis der aktuellen EEG-Vergütungen für die verschiedenen Technologien anfallen, dar.

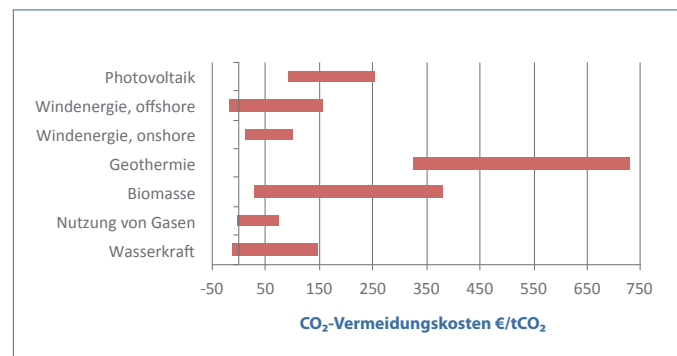


Abbildung 17: Abschätzung der CO₂-Vermeidungskosten⁶⁶ auf Basis der aktuellen EEG-Vergütung für neue Anlagen. Die Vermeidungskosten für Anlagen, die in der Geltungsdauer vorhergehender Vergütungssätze errichtet wurden, liegen höher. Grundlage ist der deutsche Strommix mit Emissionen von 570 gCO₂ pro kWh und die vereinfachte Annahme, dass die erneuerbaren Technologien den Strom emissionsfrei produzieren.⁶⁷ Rückkopplungen auf den Strommix sind nicht berücksichtigt. Generell haben kleinere Anlagen höhere Vergütungssätze und damit höhere CO₂-Vermeidungskosten. Es wurde ein Strompreis von 4 €/ct/kWh zugrunde gelegt.

⁶⁵ FFE/VBEW 2009.

⁶⁶ Eine interessante Perspektive bieten die CO₂-Vermeidungskosten, das heißt die Kosten in Euro, die für den Einsatz einer bestimmten Technologie im Vergleich zu einer definierten Referenztechnologie entstehen, um die Treibhausgasemissionen um eine Tonne CO₂ zu vermindern. Die Aussagekraft ist am besten, wenn vergleichbare Technologien und Einsatzszenarien betrachtet werden. Im Sinne des Diagramms werden die Ecken Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit zusammen betrachtet. Die Versorgungssicherheit ist dabei nicht berücksichtigt.

⁶⁷ UBA 2013.

⁶³ BDEW 2013-3.

⁶⁴ BDEW 2013-3; BDEW 2013-4.

Fazit

Der europäische Emissionshandel gewährleistet das Einhalten der europaweiten Emissionsziele, wenn auch durch die EEG-Förderung zu volkswirtschaftlich höheren Kosten, als diese in einem reinen Marktmodell anfallen würden. Unter den gegenwärtigen Marktbedingungen ist die Nutzung von Kohle attraktiver als die von Gas.

Hinweise

Die aktuell niedrigen Zertifikatepreise von unter 5 €/t resultieren zum größten Teil aus einem geringeren Bedarf aufgrund eines schwächeren Wirtschaftswachstums (ca. 15 bis 20 Prozent) sowie einer generellen Überallokation an Zertifikaten im ETS. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist im Vergleich hierzu ein kleinerer Effekt, da die Größenordnung des Effektes in der ursprünglichen Ausgestaltung des ETS ausreichend gut berücksichtigt wurde.⁶⁸

Um die Umstellung von Steinkohle auf Gas über das ETS zu bewirken, wären hierfür bei den aktuell günstigen Kohlepreisen CO₂-Zertifikatepreise von rund 30 bis 40 €/t erforderlich.^{69,70} Selbst in diesem Szenario wären Gaskraftwerke aufgrund des deutlich höheren Gaspreises nicht in der Lage, Braunkohlekraftwerke zu verdrängen.

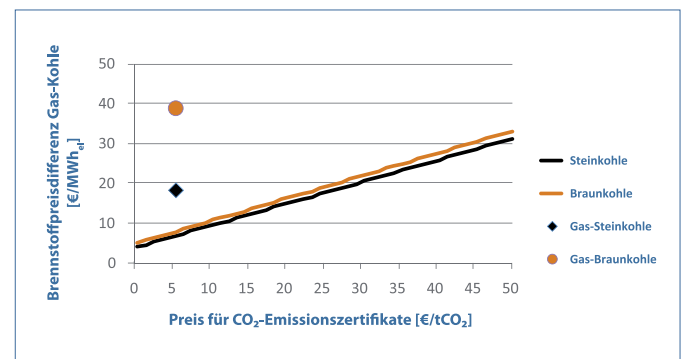


Abbildung 18: Darstellung der Kostenparität von Gaskraftwerken zu Kohlekraftwerken am Beispiel einer Einzelfallbetrachtung.

Darstellung in Funktion der Brennstoffpreisdifferenz und CO₂-Emissionszertifikatepreises. In diesem speziellen Beispiel wäre die Kostenparität zu dem betrachteten Steinkohlekraftwerk bereits bei einem Zertifikatepreis von 27 €/tCO₂ gegeben. Die beiden isolierten Punkte geben die aktuellen Brennstoffpreisdifferenzen wieder. Die Steigung der Geraden ist abhängig von der jeweiligen CO₂-Intensität der betrachteten Kraftwerke, der Schnitt mit der Ordinate hängt von der Differenz der sonstigen fixen und variablen Kosten der Kraftwerke ab. Die absoluten Werte der Grafik sind kraftwerksspezifisch. Die Kraftwerke (Gas/Stein-/Braunkohle) wurden mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 Prozent/38 Prozent/35 Prozent berechnet. Für Brennstoffpreisdifferenzen über der entsprechenden Geraden ist der Einsatz des Kohlekraftwerks günstiger als der Einsatz des Gaskraftwerks. Unterhalb der Geraden ist der Einsatz des Gaskraftwerks wirtschaftlicher. Entlang der jeweiligen Geraden sind die Kosten beider Kraftwerkstypen identisch. Die Kostenkalkulation basiert auf Werten für moderne Kraftwerke von Wissel et al. Unter der Annahmen von 7500 Volllaststunden.⁷¹ Für die Rohstoffpreise wurde zusätzlich auf die Daten des BMWi zurückgegriffen.⁷²

⁶⁸ Öko-Institut 2013.

⁶⁹ Götz/Lenck 2013.

⁷⁰ Wissel et al. 2010.

⁷¹ Ebd.

⁷² BMWi 2014.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
 - a. Deckelt die Gesamtmenge an CO₂-Emissionen in Europa.
 - b. Nachfrage und Angebot definieren den Zertifikatepreis.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)

Förderung der Stromerzeugung aus Erneuerbare-Energien-Anlagen durch Einspeisevorrang reduziert die Nachfrage des Stromsektors innerhalb des ETS und damit den Zertifikatepreis.
3. Tarife/Kostenallokation

Resultierender Zertifikatepreis ist zu niedrig, um einen Wechsel von Kohle zu Erdgas betriebswirtschaftlich zu rechtfertigen.
4. Rebound

Keine speziellen Effekte.
5. Bilanzraum

Nationale Förderung reduziert europaweit die Anreize, in CO₂-mindernde Technologien zu investieren.
6. Kopplung Energiepreise

Höhere CO₂-Zertifikatepreise könnten die Kostenstruktur in der Stromerzeugung zugunsten von Erdgas und zuungunsten von Steinkohle verändern.
7. Speicherbarkeit

Keine speziellen Effekte.

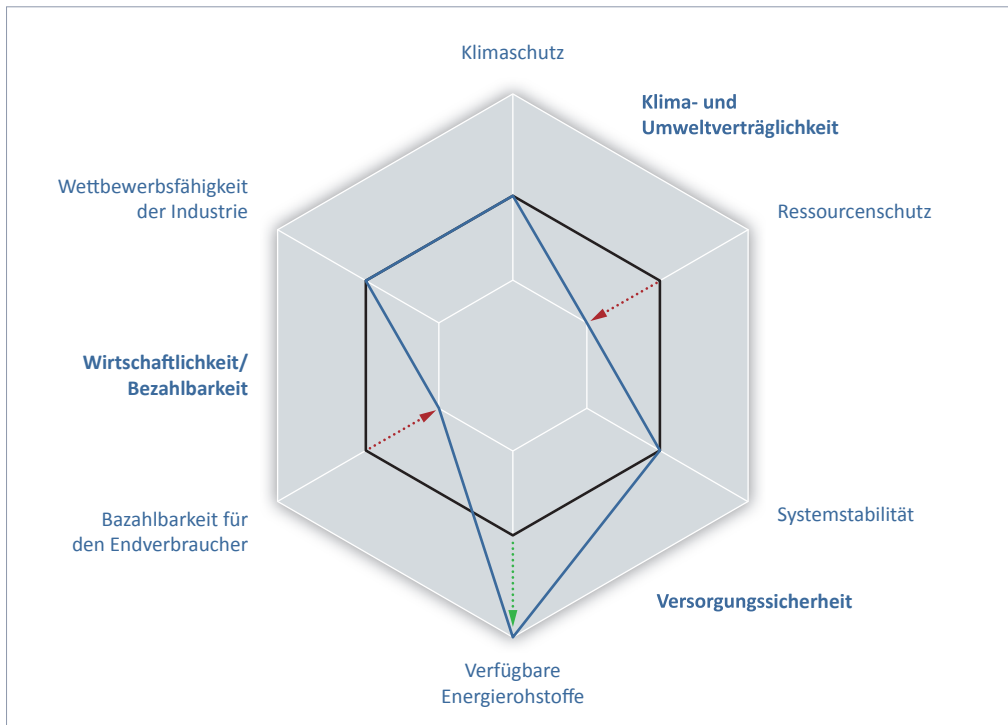


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Effektes einer durch Photovoltaikförderung induzierten Senkung von Zertifikatepreisen auf das energiepolitische Zieldreieck. Die Verfügbarkeit der Energierohstoffe verbessert sich aufgrund der Nutzung von ausreichend vorhandener Kohle gegenüber Erdgas (nach außen gerichteter, grüner Pfeil). Allerdings verschlechtern (nach innen gerichtete, rote Pfeile) sich der Ressourcenschutz durch die Nutzung der heimischen Braunkohle und die Bezahlbarkeit für den Endverbraucher durch die Umlage der hohen EEG-Vergütung.

5.8 Ausbau von Photovoltaik und Windkraft benötigt das Vorhalten von fossilen Backup-Kraftwerken und Speichern

Maßnahme und intendierte Wirkung

Der massive Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor führt zu einer Reduzierung der fossilen und nuklearen Kraftwerkskapazität.

Tatsächlicher Effekt

Trotz des massiven Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung hat sich die Gesamtkapazität des fossilen Kraftwerks-parks von im Mittel 80 GW seit dem Jahre 2000 praktisch nicht verändert. Der bisherige Rückbau der Kernkraftkapazitäten wurde allerdings vollständig von dem Ausbau der erneuerbaren Energien kompensiert, ebenso wie der Anstieg der Bruttostrommenge um zehn Prozent seit dem Jahr 2000.

Erläuterung

Der mit der Implementierung des EEG einhergehende Einspeisevorrang und die hohe Vergütung von Strom aus erneuerbaren Quellen haben zu einem massiven Ausbau der erneuerbaren Stromerzeu-

gungskapazitäten und zu einem starken Anstieg der erneuerbaren Strommengen geführt, wie in Abbildung 20 dargestellt.

Besonders stark ist dieser Ausbau bei der Photovoltaik und Windenergie erfolgt, was insofern kritisch ist, als beide Stromerzeugungstechnologien stark witterungsabhängig und tageszeitabhängig sind. Zwar wird der erzeugte Strom jederzeit abgenommen, er ist jedoch nur bedingt vorhersagbar und steht daher dem Netz nicht als gesicherte Leistung zur Verfügung.⁷⁴

Dies verdeutlicht ein Blick auf die Volllaststunden von Photovoltaik und Windenergie, also die Anzahl der Stunden im Jahr, in denen eine Photovoltaik- oder Windenergieanlage rechnerisch die ihrer spezifizierten Spitzenleistung entsprechende Strommenge liefert, berechnet aus der jährlichen erzeugten Strommenge dividiert durch die installierte Leistung. Im Falle der Photovoltaik beträgt diese im Durchschnitt rund 900-1000 Stunden, im Falle von Onshore-Windkraftanlagen rund 1550 Stunden (2012, 3-Jahresmittel) und im Falle von Offshore-Windkraftanlagen für den Windpark alpha ventus

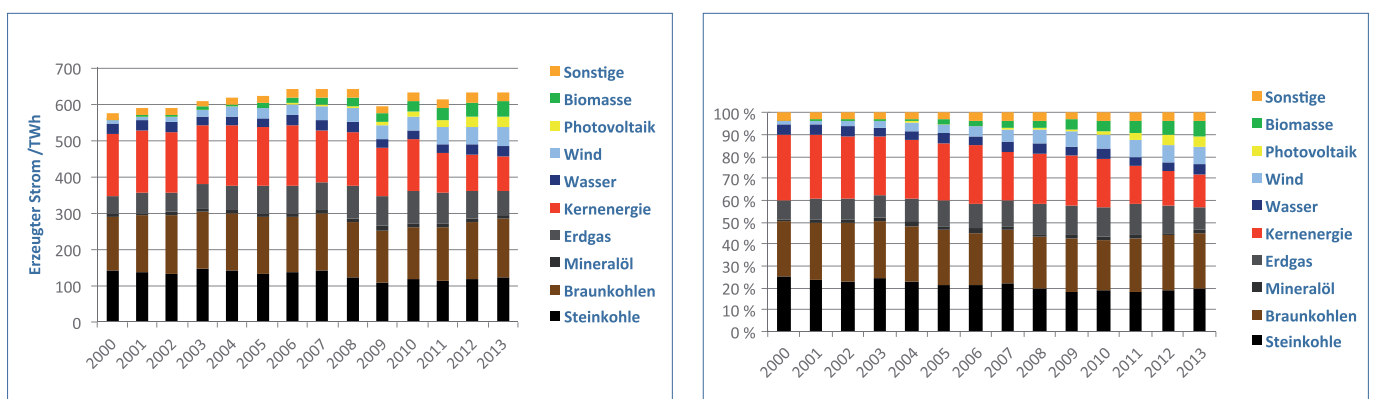


Abbildung 20: Beiträge zur Bruttostromerzeugung. Absolute Beiträge der einzelnen Technologien links, relative Anteile an der Bruttostromerzeugung rechts.⁷³

⁷³ BMWi 2014.

⁷⁴ Als gesicherte Leistung wird hier die Leistung verstanden, die durch eine Erzeugungstechnologie dem Stromnetz garantiert bereitgestellt werden kann.

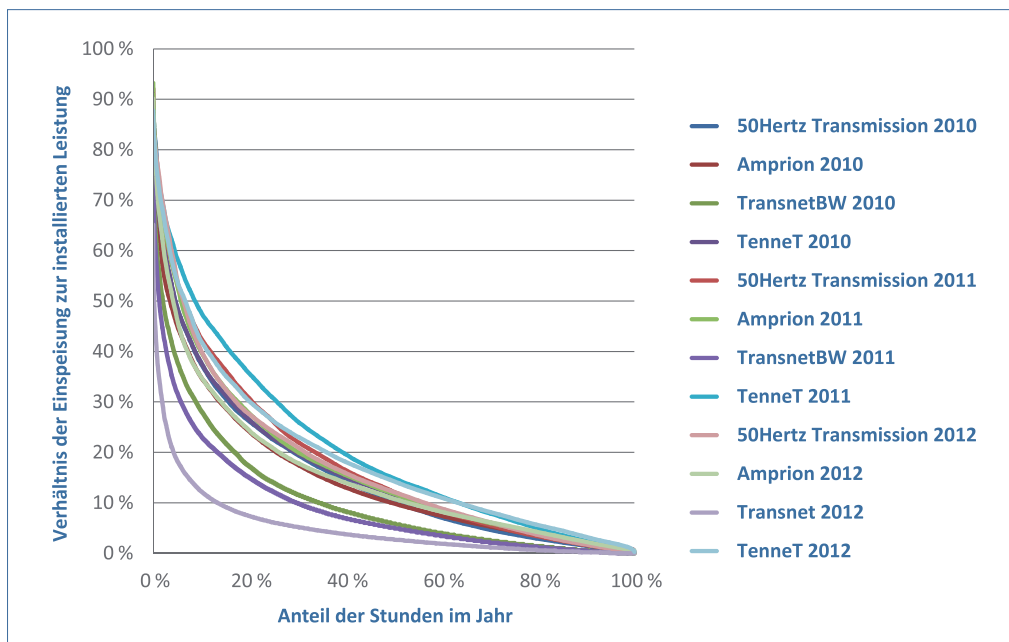


Abbildung 21: Geordnete Einspeisung aus Windkraftanlagen 2010-2012.⁷⁵

rund 4450 Stunden (2010).^{76,77} Diese Betrachtung vernachlässigt jedoch, dass die erzeugten Strommengen zeitlich extrem variabel sind und die Volllaststunden in Abhängigkeit vom Standort ebenfalls sehr stark variieren. Abbildung 21 zeigt auf, wie viele Stunden im Jahr die Windkraftanlagen welchen Anteil ihrer installierten Leistung liefern können. Es ist offensichtlich, dass die Kennzahl der installierten Leistung nur eine sehr bedingte Aussagekraft für die real zu einem bestimmten Zeitpunkt bereitgestellte Leistung hat.

Da die Stromnachfrage jedoch witterungsunabhängig ist und sich nicht danach richtet, ob die Sonne scheint oder der Wind bläst, muss die benötigte Leistung dem Stromnetz dennoch jederzeit zur Verfügung stehen. Hierfür können Stromimport und auch Pumpspeicherkraftwerke einen Beitrag leisten. Der Hauptbeitrag wird jedoch durch das Vorhalten von Leistung konventioneller Kraftwerkskapazität gesichert, die als entsprechende Reserve bereitsteht. Die

Jahreshöchstlast 2012 trat am 07.02.2012 um 19:15 Uhr mit einem Wert von 81,8 GW auf – mithin die Größenordnung des installierten fossilen Kraftwerksparks (vergleiche Abbildung 20), der jedoch auch nicht immer vollständig betriebsbereit ist. Im Sinne der Versorgungssicherheit sollte die Jahreshöchstlast, zuzüglich einer Sicherheitsreserve, durch betriebsbereite Kraftwerkskapazitäten gewährleistet sein. Durch die unsichere Verfügbarkeit von volatilen erneuerbaren Energien sowie die nur geringen Kapazitäten an gesicherter Leistung aus erneuerbaren Energien (Biomasse, Wasser, Geothermie) und geringen Stromspeicher- sowie Importkapazitäten muss diese Aufgabe auch weiterhin von einem fossilen Kraftwerkspark in der entsprechenden Größenordnung erfüllt werden.

Damit wird verständlich, warum die erneuerbaren Energiequellen zwar einen wachsenden Anteil an den Strommengen im Netz stellen, die bereitgestellte Leistung des konventionellen Kraftwerksparks jedoch unverändert auf einem Niveau liegt, mit dem weiterhin die gesamte Stromversorgung übernommen werden könnte. Auch wenn sich die Gesamtkapa-

⁷⁵ ÜNB/BMWi 2013.

⁷⁶ BDEW 2013-4.

⁷⁷ IWES 2012.

azität des konventionellen Kraftwerksparks damit kaum verändert hat, so haben sich sehr wohl die Bedingungen, unter denen diese Kraftwerke betrieben werden, an den zunehmenden Beitrag der erneuerbaren Energien angepasst. Durch den Einspeisevorrang der erneuerbar erzeugten Strommengen werden die konventionellen Kraftwerke häufiger flexibel betrieben und erzeugen ihrerseits weniger Volllaststunden Strom als in ihrer ursprünglichen Auslegung und Investitionsentscheidung zugrunde gelegt.

Fazit

Der massive Ausbau der volatilen erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten führt

zu höheren Strommengen aus erneuerbaren Energien im Stromnetz. Die Leistung dieser Anlagen steht aber nicht gesichert zur Verfügung, was das Vorhalten einer Reservekapazität annähernd im Umfang der anliegenden Höchstlast bedingt, die vornehmlich durch konventionelle (Braunkohle-, Steinkohle- und Gas-) Kraftwerke bereit gestellt wird.

Hinweise

Der Merit-Order-Effekt macht den Neubau von allen fossilen Backup-Kraftwerken derzeit unwirtschaftlich, da diese gegen die Grenzkosten des abgeschriebenen Kraftwerksparks nicht bestehen können.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Keine speziellen Effekte.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
Förderung der Wind- und Photovoltaikanlagen mit Einspeisevorrang.
3. Tarife/Kostenallokation
Keine speziellen Effekte.
4. Bilanzraum
Keine speziellen Effekte.
5. Kopplung Energiepreise
Keine speziellen Effekte.
6. Speicherbarkeit
Strom aus volatilen erneuerbaren Energien kann nicht gespeichert werden. Aus Gründen der Netzstabilität ist das Vorhalten einer fossilen Kraftwerksreserve unabdingbar.
7. Rebound
Keine speziellen Effekte.

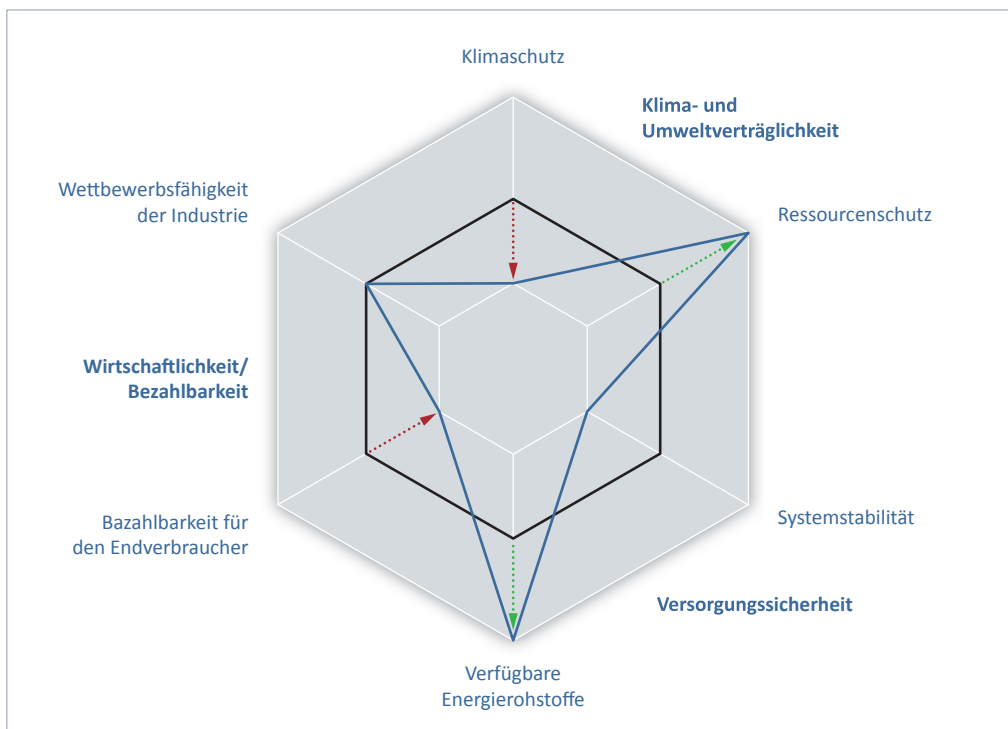


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Effektes der Notwendigkeit des Vorhaltens fossiler Kraftwerke oder Speicher durch die EEG-Förderung regenerativer volatiler Stromerzeugung. Ressourcenschutz und die Verfügbarkeit von Energierohstoffen verbessern (nach außen gerichtete, grüne Pfeile) sich durch geringere Nutzung der fossilen Kraftwerke, wobei dies mit Verschlechterungen (nach innen gerichtete, rote Pfeile) beim Klimaschutz, da die Modernisierung des konventionellen Kraftwerkparks durch effiziente Anlagen unterbleibt, der Systemstabilität durch die Volatilität der erneuerbaren Energien und einer erhöhten Kostenbelastung durch die Umlage der hohen EEG-Vergütungen für den Endverbraucher, einhergeht.

5.9 Die öffentliche Diskussion um den Netzausbau entspricht nicht dem auf verschiedenen Ebenen entstehenden Aufwand

Maßnahme und intendierte Wirkung

Durch die Förderung von kleineren Anlagen im Rahmen des EEG wird eine Diversifizierung der Stromerzeugung angestrebt mit dem Ziel, große zentrale fossile Kraftwerke zu substituieren. Zudem wird eine Steigerung der Energieeffizienz durch Einsatz von KWK angestrebt. Der Ausbau von Windenergie an den Küsten (höheres Windangebot, On- und Offshore) wird bei gleichzeitiger Abschaltung großer Kernkraftwerksleistung in Süddeutschland umgesetzt. Um die Regionen starker Energiebereitstellung mit den Verbrauchszentren zu verbinden, sind

Leitungsneubauten im Übertragungsnetz geplant, die öffentlich kontrovers diskutiert werden.

Tatsächlicher Effekt

Der Ausbau dezentraler Kapazitäten führt tatsächlich zu einer hohen Netzbelastung der Hochspannungsleitungen von Nord- nach Süddeutschland. Unter Kostengesichtspunkten sind jedoch die Maßnahmen zur Ertüchtigung der Verteilnetze viel gravierender. Kleinere dezentrale Erzeugungseinheiten (KWK/Photovoltaik) speisen ins Niederspannungsnetz ein, dessen Kapazitäten durch zunehmend erhöhte Einspeisung bereits ausgereizt sind. Die vermehrte Einspeisung ins Niederspannungsnetz kann, wegen der Einspeisung auf einer Phase (keine Drehstrom-einspeisung), zu Phasenungleichgewichten

führen. Damit wird die Netzsicherheit gefährdet, was einen hohen Ausbaubedarf auf der Ebene der Verteilnetze erfordert.

Erläuterung

Um die Integration der erneuerbaren Energien in die bestehenden Netze zu bewerkstelligen, bei gleichzeitiger Beibehaltung der Stromnetzqualität, erscheint tatsächlich ein massiver Ausbau der Übertragungsnetze erforderlich. Aktuell sind bereits 1877 Kilometer neue Hochspannungsleitungen in Planung, von denen 352 Kilometer bereits gebaut wurden.⁷⁸ Diese sind häufig aufgrund der Tatsache, dass hierfür neue Trassen ausgewiesen werden müssen, und aufgrund der hohen Sichtbarkeit von Freileitungen stark umstritten. Möglicherweise könnte die Akzeptanz durch die Verlegung von Erdkabeln erleichtert werden, hiergegen werden die erhöhten Kosten ins Feld geführt. Allerdings sind die Kosten für den Ausbau und den Betrieb des Niederspannungsnetzes und gegebenenfalls den Austausch oder die Nachrüstung von Ortsnetztransformatoren sowie für die Ausrüstung der Transformatoren mit Mess- und Überwachungssystemen mit erheblich höheren – etwa fünfmal so hohen – Kosten verbunden, wie in Abbildung 23 auf Basis von Daten der Bundesnetzagentur dargestellt. Der Ausbau in diesem Bereich vollzieht sich weitgehend unbemerkt, was überrascht, da diese Kosten über die Netzentgelte auf alle Verbraucher umgelegt werden. Die Dominanz der Übertragungsnetze in der öffentlichen Diskussion lässt somit eine kostenintensive Maßnahme (etwa ein Drittel der Einspeisevergütung nach EEG im Jahre 2013) in den Hintergrund treten, obwohl an anderer Stelle – EEG – die Kosten intensiv diskutiert werden.

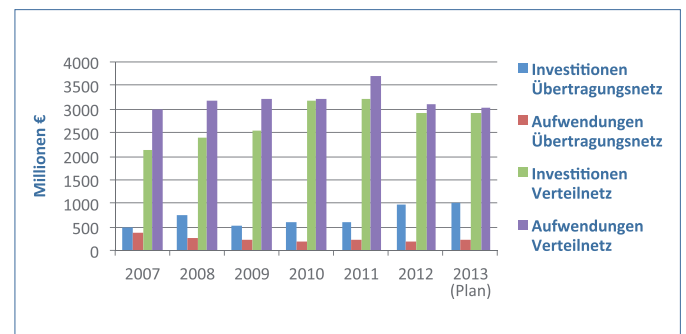


Abbildung 23: Investitionen und Aufwendungen im Übertragungsnetz und Verteilnetz.⁷⁹ Diese Beträge werden über die Netzentgelte vom Stromverbraucher bezahlt.

Gegenwärtig beträgt der Anteil der Netzentgelte am Strompreis rund 5,38 €ct/kWh, ca. 20 Prozent des Haushaltsstrompreises (2012) von 26,053 €ct/kWh, vergleiche hierzu auch Abbildung 8.⁸⁰

Fazit

Durch die hohe öffentliche Aufmerksamkeit und Sichtbarkeit von Übertragungsleitungen stehen diese beim Netzausbau im Zentrum der öffentlichen Diskussion. Dass der Ausbau des Verteilnetzes deutlich höhere Kosten verursacht, wird, trotz intensiver Diskussion um die Kosten der Energiewende, dagegen kaum thematisiert. Die Ausgestaltung der Übertragungsleitungen als Erdkabel könnte die Akzeptanz erleichtern, die Kosten, bezogen allein auf das Übertragungsnetz, würden dadurch stark ansteigen.

⁷⁸ BNetzA 2014.

⁷⁹ BNetzA/BKartA 2013.

⁸⁰ BDEW 2013-1.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Keine speziellen Effekte.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
Förderung der Wind- und Photovoltaikanlagen mit Einspeisevorrang.
3. Tarife/Kostenallokation
 - a. Netzkosten werden per Umlage von allen Verbrauchern in Abhängigkeit des Verbrauchs bezahlt.
Dezentrale Struktur bedingt stärkeren Ausbau.
 - b. Hohe Kosten des Verteilnetzausbaus werden aufgrund Fokussierung der Diskussion auf Übertragungsleitungen nicht thematisiert.
4. Bilanzraum
Keine speziellen Effekte.
5. Kopplung Energiepreise
Keine speziellen Effekte.
6. Speicherbarkeit
Keine speziellen Effekte.
7. Rebound
Keine speziellen Effekte.

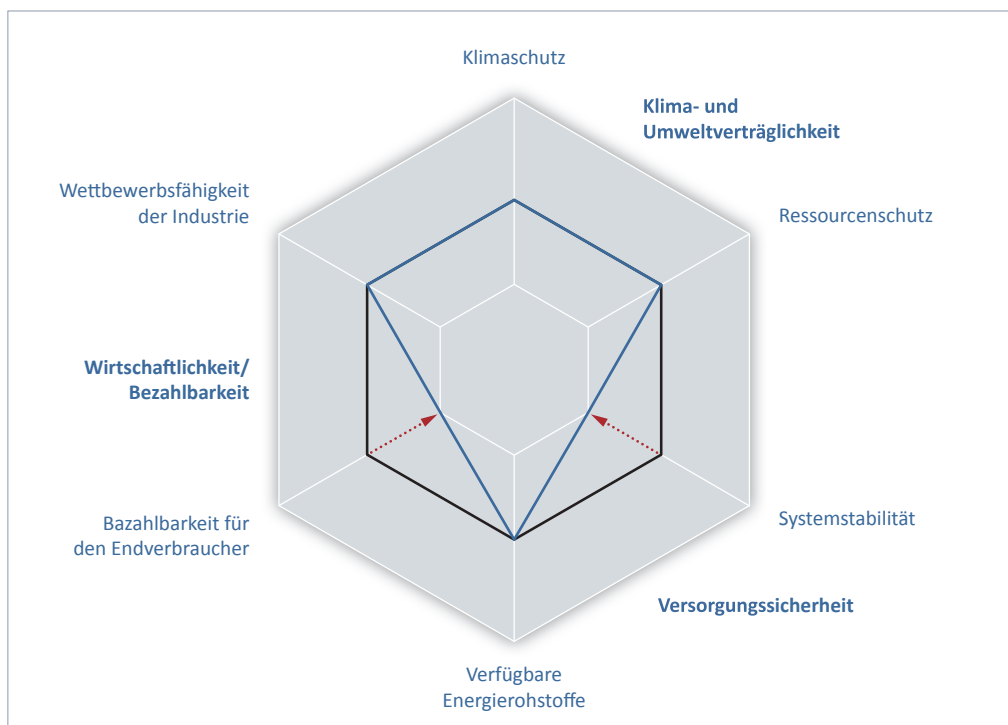


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Auswirkungen des Bedarfs an zusätzlichem Netzausbau durch zunehmende Dezentralität in der Stromerzeugung auf das energiepolitische Zieldreieck. Es führt in der Übergangsphase zu einer schlechteren Systemstabilität und generell zu höheren Kosten für den Endverbraucher (nach innen gerichtete, rote Pfeile). Die anderen Ziele werden nicht beeinflusst.

5.10 Elektromobilität führt nicht zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen im Stromsektor

Maßnahmen und intendierte Wirkung

Durch verschiedene Maßnahmen soll der Umstieg des motorisierten Individualverkehrs von konventionellen Antrieben (Otto- und Dieselmotoren) auf alternative, insbesondere elektrische Antriebstechnologien gefördert werden. Dies führt – entgegen häufig geäußerter anderslautender Aussagen – tatsächlich zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors.

Tatsächlicher Effekt

Der intendierte Effekt tritt tatsächlich ein. Jedoch nicht, weil der verwendete Strom an sich CO₂-emissionsfrei wäre, sondern weil der Stromsektor durch seine Teilnahme am europäischen Emissionshandelssystem (ETS) zusammen mit den anderen Sektoren eine gedeckelte Gesamtmenge emittiert. Im Gegensatz dazu nimmt der motorisierte Individualverkehr nicht an dem ETS teil und seine Emissionen fallen zusätzlich zu den gedeckelten Emissionen des ETS an.

Erläuterung

Elektromobilität wird häufig als die Zukunft des individuellen motorisierten Personenverkehrs gesehen. Es gibt es immer noch Vorbehalte bezüglich der Reichweite von batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen und viele technische Hürden für eine flächendeckende Implementierung. In der folgenden Betrachtung spielen diese technischen Hürden keine Rolle.

In Deutschland waren 2013 rund 43,4 Millionen benzin- und dieselbetriebene PKW registriert.⁸¹ Von diesen Fahrzeugen wurde eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung von 14.000 Kilometern

erbracht.⁸² Dabei lag der Durchschnittsverbrauch bei Fahrzeugen mit Ottomotoren bei 7,9 l pro 100 Kilometer, während dieselbetriebene Fahrzeuge 6,7 l pro 100 Kilometer verbrauchten.⁸³ Im Laufe des Jahres 2011 stieß der durchschnittliche PKW damit 2,617 t CO₂ aus, was 181,7 g CO₂ pro Kilometer entspricht.

Im Gegensatz zu dem Gesamtbestand sind Neuwagen schon erheblich effizienter. Sie haben einen geringeren Normverbrauch von durchschnittlich nur 6,3 l (Benziner) beziehungsweise 5,5 l (Diesel) und 2011 einen durchschnittlichen CO₂-Ausstoß von 146,1 g CO₂ pro Kilometer.⁸⁴

Welche Potenziale ergeben sich durch einen Wechsel zu anderen Antriebstechnologien?

Die Anzahl der nicht-konventionell betriebenen PKW in Deutschland ist gering. 2013 waren 494.777 (1,1 Prozent des Gesamtbestandes) flüssiggasbetriebene Fahrzeuge, 76.284 (0,2 Prozent) erdgasbetriebene Fahrzeuge, 64.995 (0,01 Prozent) Hybridfahrzeuge und nur 7.114 (0,016 Prozent) rein elektrisch betriebene Fahrzeuge registriert.⁸⁵ Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge sind nur in geringer Zahl im Betrieb und wurden nicht gesondert erfasst.

Die Abschätzung wird auf Basis eines aktuellen Fahrzeugs, das in verschiedenen Antriebsvarianten auf dem Markt erhältlich ist, vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die nicht-konventionell betriebenen Fahrzeuge in der gleichen Form verwendet werden, wie dies gegenwärtig für benzin- und dieselbetriebene Fahrzeuge der Fall ist. Als Referenzfahrzeug dient der VW-up, ein Kleinwagen, der als Benziner⁸⁶, als erdgasbetriebenes Fahrzeug⁸⁷ oder elektrisch

81 KBA 2014.

82 ADAC 2014.

83 BMWi 2014.

84 Ebd.

85 KBA 2014.

86 Volkswagen 2013-1.

angetrieben⁸⁸ erhältlich ist. Die relativen Verbrauchswerte und Emissionen werden auf den Verbrauchswert eines konventionellen Neuwagens linear skaliert und so ein hypothetischer elektrisch betriebener Neuwagen als Referenz erstellt. Für brenn-

stoffzellenbetriebene Fahrzeuge wird der Hyundai ix35 als Referenzfahrzeug verwendet.⁸⁹ Er wird gegenwärtig in Kleinserie produziert und steht bisher nicht zum Verkauf, sondern wird an spezielle Kunden unter Sonderbedingungen geleast.

Fahrzeugvariante	VW-up (Benzin)	VW eco-up (Gas)	VW E-up (elektrisch) ^{90, 91}	Hyundai ix35 Benzin	Hyundai ix35 FCEV
Normverbrauch [1/100 km]	4,1 l	4,4 m ³ (2,9 kg)	11,7 kWh (13,0 kWh)	6,8 l	0,95 kg
CO ₂ -Emissionen [gCO ₂ /km]	95	79	0 (74)	158	0 (271)
Skalierter Neuwagen Normverbrauch [1/100 km]	6,3 l	6,8 m ³ (4,5 kg)	18,0 kWh (20,0 kWh)	6,3 l	0,88 kg
Skalierter Neuwagen CO ₂ -Emissionen [gCO ₂ /km]	146	121	0 (114)	146	0 (251)
Preis [€] ⁹²	11.175	13.750	26.900	20.000	n/a

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Verbrauchs- und Emissionswerte.

Zulassung 1 Mio. Neuwagen	Konventionelle Antriebstechnik	Erdgas betriebene Fahrzeuge	Elektrofahrzeuge ⁹³	Brennstoffzellenfahrzeuge	Hyundai ix35 FCEV
Energie für die jährliche Fahrzeugleistung	882 Mio. l Kraftstoff	947 Mio. m ³ Erdgas (676 Mio. kg)	2,5 TWh (2,8 TWh) Strom	6,2 TWh	0,95 kg
CO ₂ -Emissionen	2,04 Mio. t CO ₂	1,85 Mio. t CO ₂	0 (1,59) Mio. t CO ₂	0 (3,51) Mio. t CO ₂	0 (271)

Tabelle 4: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen für eine Million zugelassener Fahrzeuge unterschiedlicher Antriebstechnologie.

Auf Basis dieser Werte lässt sich abschätzen, welchen Effekt die Zulassung von einer Million Fahrzeugen der verschiedenen Fahrzeugvarianten hätte.

Alleine durch einen Umstieg auf alternative Antriebstechnologien könnte eine beachtliche Menge an CO₂-Emissionen im Verkehr vermieden werden. Der Umstieg von Ottokraftstoff auf Erdgas reduziert die kraftstoffgebundenen CO₂-Emissionen um 9 Prozent.

Unter der Annahme, dass die Umwandlungsverluste durch die Wandlungskette bis zum Elektromotor rund 10 Prozent betragen, so würde die Versorgung von einer Million batteriebetriebener Elektrofahrzeuge aus dem Stromnetz eine Bereitstellung von 2,8 TWh (0,5 Prozent

87 Volkswagen 2013-2.

88 Volkswagen 2013-3.

89 Hyundai 2014-1; Hyundai 2014-2.

90 Der erste Wert gilt fahrzeugseitig, der zweite netzseitig unter der Berücksichtigung von 10 Prozent Wandlungsverlusten.

91 UBA 2013. Für die Berechnung der kraftwerksseitigen CO₂-Emissionen werden 570 gCO₂/kWh zugrundegelegt.

92 Gemäß Preisliste (2014): VW-up Model move-up 5-Gang, Bluemotion technology, Hyundai ix35 Fifa World cup edition 1.6.

93 Der erste Wert gilt fahrzeugseitig, der zweite netzseitig unter der Berücksichtigung von 10 Prozent Wandlungsverlusten.

des Nettostromverbrauchs⁹⁴ in Deutschland 2011) erfordern.⁹⁵ Zur Bereitstellung dieser Strommenge fallen bei dem gegenwärtigen Strommix (2011) 1,6 Millionen Tonnen CO₂ an CO₂-Emissionen an. Das wäre bereits eine beträchtliche Einsparung gegenüber den konventionellen Antriebstechnologien von 22 Prozent.

Für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge liegen die Verluste in der Wandlungskette deutlich höher. Die Elektrolyse von Wasser zur Bereitstellung von Wasserstoff hat einen Wirkungsgrad von rund 70 Prozent.⁹⁶ Weiterhin erfolgt die Umwandlung des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von gegenwärtig maximal rund 60 Prozent.⁹⁷ Die Versorgung von einer Million brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge aus dem Stromnetz würde eine Bereitstellung von 6,2 TWh (1,2 Prozent des Nettostromverbrauchs in Deutschland 2011) erfordern. Zur Bereitstellung dieser Strommenge fallen bei dem gegenwärtigen Strommix (2011) 3,5 Millionen Tonnen CO₂ als Emissionen an. Dies wären höhere Emissionen als bei konventionellen Antriebstechnologien.

Unter der Berücksichtigung des ETS-Mechanismus (Kapitel 3.1), an dem die Stromerzeuger teilnehmen, nicht jedoch der motorisierte Individualverkehr, werden durch die Elektromobilität keine zusätzlichen Emissionen über die mit Zertifikaten abgesicherte und mit einem Cap versehene Menge freigesetzt. Die Elektromobilität hat damit das Potenzial, eine wesentliche Reduzierung von CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor zu bewirken. Dies erfolgt durch Einbeziehung des elektromobilen (batterie- oder brennstoffzellenbetriebenen) Teils des Verkehrssektors in das ETS-System.

⁹⁴ Nettostromverbrauch in Deutschland (2011): 524 TWh; CO₂-Emissionen in Deutschland (2011): 1083 Millionen tCO₂.

⁹⁵ BMWi/BMU 2012.

⁹⁶ DVGW 2013.

⁹⁷ Honda 2014.

Als Folge einer fortschreitenden Elektromobilität sollten die Preise für Emissionszertifikate eher ansteigen. Wenn erhebliche Strommengen abgenommen werden würden, käme es unter Umständen zu einer signifikanten Verknappung der Zertifikate und damit zu einem signifikanten Preisanstieg. Eine vollständige Umstellung des gegenwärtigen PKW-Bestandes auf elektrobetriebene Fahrzeuge auf Basis der obigen Annahmen würde zu einem zusätzlichen Nettostrombedarf von rund 23 Prozent (batteriebetriebene Fahrzeuge) beziehungsweise 50 Prozent (brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge) und zu einer unmittelbaren Reduzierung von CO₂-Emissionen im Umfang von 90 Millionen Tonnen führen (rund 8 Prozent der deutschen CO₂-Emissionen 2011).⁹⁸

Fazit

Die Umstellung der PKW-Flotte auf batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge führt zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen, da Emissionen, die im Zusammenhang mit der Elektromobilität anfallen, unter dem ETS in Europa gedeckelt sind. Weiterhin haben batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge keine zusätzlichen schädlichen Emissionen, wie zum Beispiel Feinstaub.

Gegenwärtig werden strategische Mengen an Kraftstoffen per Gesetz vorgehalten. Dies ist für Strom beim gegenwärtigen Stand der Technik nicht möglich. Ein großflächiger Netzausfall würde bei der geringen Reichweite der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge schnell zu einem Zusammenbruch der individuellen motorisierten Mobilität führen. Andererseits könnten die batteriebetriebenen Fahrzeuge prinzipiell als delokalisierte Speicher eingesetzt werden und so das Stromnetz stabilisieren. Inwieweit dies technisch umzusetzen ist und von den Nutzern akzeptiert wird, ist unklar.

⁹⁸ Nettostromverbrauch in Deutschland (2011): 524 TWh; CO₂-Emissionen in Deutschland (2011): 1083 Millionen tCO₂.

Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge sind in der Anschaffung deutlich teurer als konventionell betriebene Fahrzeuge. Dieser Nachteil wird auch nicht in der angenommenen Lebensdauer von acht Jahren durch die geringeren Energiekosten kompensiert. In dem obigen Zahlenbeispiel der VW-up-Modellreihe belaufen sich die Anschaffungskosten zuzüglich der Kraftstoffkosten (nominal, Preise von 2012) auf 19.000 Euro für das benzinbetriebene Fahrzeug, auf 16.000 Euro für erdgasbetriebene Fahrzeuge und auf 31.000 Euro für das batteriebetriebene Elektrofahrzeug.⁹⁹

Hinweise

Die Abhängigkeit von den Lieferanten der Energierohstoffe variiert je nach Antriebstechnologie. Die Energierohstoffe

werden auf dem Weltmarkt gehandelt und sind preislich aneinander gekoppelt. Die Abschätzung des Effekts beim Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen ist nur dann gültig, wenn der Wasserstoff durch Elektrolyse bereitgestellt wird und nicht – wie heute fast ausschließlich – durch Reformierung fossiler Energieressourcen.¹⁰⁰

Die Materialzusammensetzung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen unterscheidet sich wesentlich von konventionellen. Konsequenter Leichtbau führt zu einer Reduzierung des Eisen-/Stahlanteils zugunsten von Buntmetallen und sonstigen Werkstoffen. Die große Batterie führt zur Verwendung von deutlich mehr Sondermetallen als im konventionellen Fahrzeugbau.

Übersicht über die wirkenden Mechanismen

1. Europäisches Emissionshandelssystem
Gedeckelte Gesamtemissionen von Kraftwerken im ETS.
2. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG)
Keine speziellen Effekte.
3. Tarife/Kostenallokation
Keine speziellen Effekte.
4. Bilanzraum
Individueller Personenverkehr auf Basis von Kraftstoffen ist außerhalb des ETS. Seine Emissionen fallen daher zusätzlich zu den gedeckelten Emissionen des ETS an.
5. Kopplung Energiepreise
Die Verknüpfung der Energiepreise macht die verschiedenen Antriebsoptionen prinzipiell miteinander vergleichbar. Eine erhöhte Nachfrage durch batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge senkt den Preisdruck auf konventionelle Kraftstoffe.
6. Speicherbarkeit
Batterien haben eine geringere Speicherdichte als Kraftstoffe, was sich in der reduzierten Reichweite der batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeuge niederschlägt.
7. Rebound
Keine speziellen Effekte.

⁹⁹ Gemäß Preisliste (2014): VW-up Model move-up 5-Gang, Bluemotion technology, Hyundai ix35 Fifa World cup edition 1.6.

¹⁰⁰ Interessanterweise fallen auch die Emissionen, die durch Reformierungen anfallen, unter das ETS. Streng genommen würde die obige Argumentationslinie also auch für Kraftstoffe, die über Umwandlungen mit Wasserstoff aus fossilen Quellen hergestellt werden, gelten. Auch dies wäre ein Weg, den kraftstoffbetriebenen Verkehrssektor in das ETS zu integrieren.

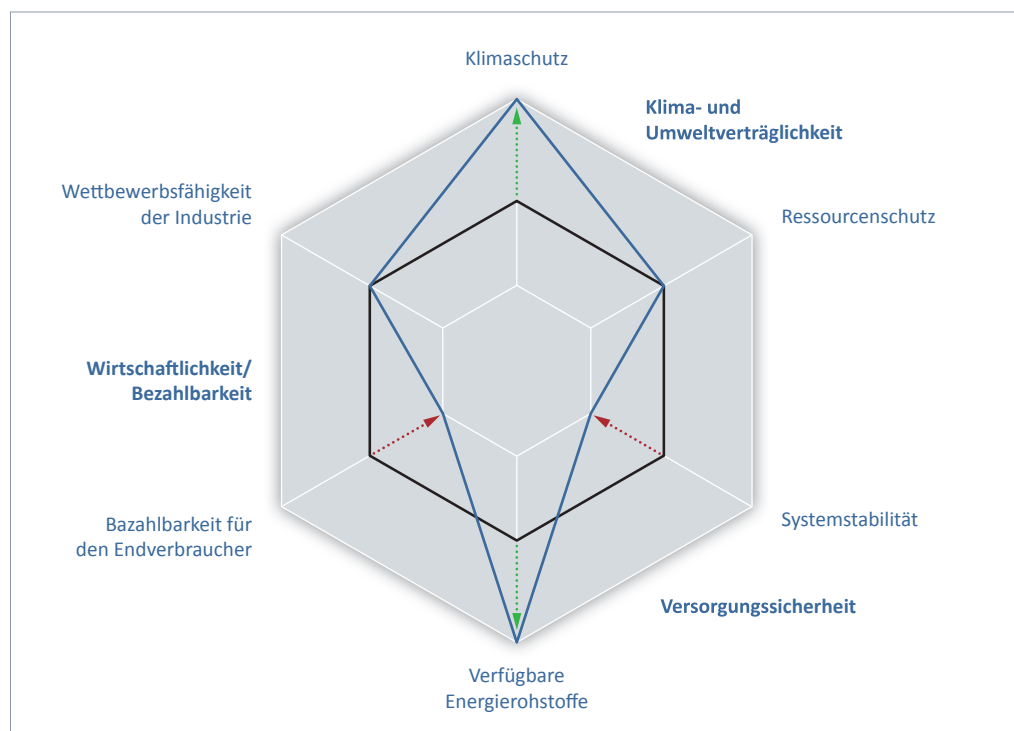


Abbildung 25: Bewertung des Umstiegs auf Elektromobilität bezüglich des energiepolitischen Zieldreiecks. Die Bezahlbarkeit für den Endverbraucher verschlechtert (nach innen gerichtete, rote Pfeile) sich, da batterie- oder brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge mit deutlich höheren Investitionskosten verbunden sind als konventionelle. Die Systemstabilität im Energiesystem nimmt ab, da die Abhängigkeiten auf eine Energieform (Strom) fokussiert werden. Die Verfügbarkeit der Energierohstoffe hingegen verbessert (nach außen gerichtete, grüne Pfeile) sich, da Kohle Öl ersetzt. Der positive Beitrag zum Klimaschutz entsteht durch die Einbindung des elektromobilen Sektors in das ETS. Für den Ressourcenschutz und die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie entstehen keine nennenswerten Auswirkungen.

6. Fazit

Das Energiesystem stellt in seiner Komplexität hohe Ansprüche an eine gezielte Steuerung. Dabei sind die Wechselwirkungen der verschiedenen Mechanismen häufig subtil und nicht immer einfach vorhersehbar oder im Voraus quantitativ abschätzbar. Umso wichtiger ist eine möglichst genaue Analyse der verschiedenen Wirkmechanismen, auch in Kombination miteinander, um die durch einen Eingriff hervorgerufenen Effekte besser vorhersagen zu können. Eine Prognose der Wirkung von Eingriffen muss diese Effekte und die Interaktion zwischen den verschiedenen Akteuren berücksichtigen.

Die Förderung der erneuerbaren Energien im Stromsektor über das EEG mit dem Ziel, eine langfristig nachhaltige Stromversorgung zu etablieren und die Treibhausgasemissionen des Stromsektors zu reduzieren, hat zu einem starken Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten und einem starken Anstieg der eingespeisten Strommenge aus erneuerbaren Quellen geführt.

Während sich das EEG im Wesentlichen auf die Stromerzeugung richtet, hat es aber auch Auswirkungen auf den Wärmesektor. Die Erhöhung der Stromkosten durch die Förderung des EEG führt zu einer Veränderung der Kostenstruktur von strombasierten Wärmetechnologien gegenüber den Alternativen, wie Gas, Öl oder Fernwärme.

Für die deutsche Industrie ist diese Entwicklung ambivalent. Zum einen führen höhere Energiepreise zu einer schwierigeren Wettbewerbsposition, zum anderen hat sich ein neuer Markt mit neuen

Perspektiven und Entwicklungsmöglichkeiten eröffnet, dessen Bedeutung jedoch kontrovers diskutiert wird.

Die angestrebte Reduzierung von Emissionen aus fossilen Kraftwerken wäre auf Basis des EEG prinzipiell möglich. Dieser Effekt wird jedoch durch die Wechselwirkung mit dem breiter wirkenden (sektoriell und räumlich) und damit übergeordneten Europäischen Emissionshandel (ETS) verhindert. Im Rahmen des ETS werden die Treibhausgasemissionen der Mitgliedsländer (EU und EFTA) über das Prinzip „cap and trade“ kontrolliert. Durch die Deckelung der Gesamtemissionen führen verstärkte Anstrengungen zur Emissionsminderung von einzelnen Marktteilnehmern nur zu einer Reduzierung des CO₂-Zertifikatepreises, nicht aber der Emissionen innerhalb des Handelssystems.

Das EEG trägt daher trotz hoher Kosten für die Verbraucher nicht zum globalen Klimaschutz bei, sondern führt nur zu einer Verlagerung der Emissionen in andere Sektoren und/oder Länder innerhalb des ETS.

Der sich im ETS bildende CO₂-Zertifikatepreis setzt Anreize für Investitionen in emissionsärmere Technologien, wenn deren Differenzkosten kleiner sind als der CO₂-Zertifikatepreis. Dies setzt jedoch eine rationale Preisbildung unter der Prämisse eines „knappen Gutes CO₂-Emissionszertifikate“ voraus. Aus verschiedenen Gründen ist diese Prämisse gegenwärtig nicht gegeben und das ETS übt aktuell keine Anreizfunktion für Investitionen in emissionsärmere Technologien aus.

Neben einem generellen Überangebot an Zertifikaten im ETS leistet auch der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung durch das EEG einen Beitrag zu einem geringeren Zertifikatspreis, was die Entwicklung und Investition in emissionsärmere Technologien erschwert. Die Deckelung der Gesamtemissionen im ETS verhindert im Prinzip nicht nur zusätzliche, sondern auch geringere Emissionen. Der gegenwärtige Überschuss an Zertifikaten und der niedrige Preis können jedoch als Signal gewertet werden, dass der Deckel gegenwärtig nicht ausgeschöpft wird.

Das ETS hat prinzipiell das Potenzial, einen Teil der realen volkswirtschaftlichen Kosten für die Energienutzung über die Emissionszertifikate in die Energiepreisbildung einfließen zu lassen und weitere Sektoren zu integrieren. Im Effekt kann damit ein gegenwärtig nicht regulierter Bilanzraum in einen regulierten Bilanzraum überführt und so eine bessere Vergleichbarkeit hergestellt werden. Mit einer Umstellung des motorisierten Individualverkehrs auf elektromobile Antriebssysteme würde zum Beispiel der Verkehrssektor insgesamt den gleichen Regeln innerhalb des ETS unterworfen.

Grundlegend für die mangelnde Konvergenz beider Wirkmechanismen ist, dass sie jeweils andere Bilanzräume adressieren. Die Förderung der erneuerbaren Energien im Kontext eines ETS kann nur dann die Widersprüche minimieren, wenn sich beide Strukturen im selben (europäischen) Bilanzraum entfalten und innerhalb des ETS ein funktionierender Markt – im Sinne von CO₂-Zertifikaten als „knappes Gut“ – etabliert wird.

Die nicht-konvergenten Bilanzräume von EEG und ETS führen, zusammen mit den anderen dargestellten Mechanismen, zu beträchtlichen Verschiebungen finanzieller Lasten zwischen den Akteuren: Sie werden zum großen Teil auf den Endverbraucher umgewälzt, der dieser Umlage nicht ausweichen kann. Eine große politische Herausforderung liegt daher in der Frage, welche volkswirtschaftliche Kostenverteilung mit welcher betriebswirtschaftlichen Gewinnverteilung sozial kompatibel ist und inwieweit die Maßnahmen in dieser Richtung den gewünschten Effekt erzielen.

Tabellenanhang

Handelsperiode	Gesamtmenge an Zertifikaten / MtCO ₂	Jährliche Allokation / MtCO ₂	Verifizierte Emissionen / MtCO ₂	Jährliche verifizierte Emissionen / MtCO ₂	Kostenlos allokierte Zertifikate	Teilnehmende Sektoren	Anmerkungen
Phase I (2005-2007) ¹⁰¹	6.456 ¹⁰²	2.152	6.096	2.012 (2005)	Alle Anlagen auf Basis historischer Emissionen (Grandfathering)	Energiesektor, energieintensive Industrie	Überallokation an Zertifikaten, Preis am Ende der Handelsperiode auf null
Phase II (2008-2012) ¹⁰³	10.160	2.032	9.685	1.937	Energieanlagen auf Basis von Benchmarking und pauschaler Kürzung. Industrieanlagen auf Basis historischer Emissionen mit festem Kürzungsfaktor	Energiesektor, energieintensive Industrie, Flugverkehr (ab 2012)	EFTA-Staaten hinzugefügt, zusätzliche Zertifikate durch Ji, CDM und NERC3000
Phase III (2013-2020) ^{104, 105}	14.774	1.847			6.502 ¹⁰⁶	Energiesektor, energieintensive Industrie, Flugverkehr	Degression der frei allokierten Zertifikate für industrielle Nutzer von 80 auf 30 Prozent über die Handelsperiode. Backloading zur Reduzierung des Überschusses im System

Tabelle 5: Übersicht CO₂-Emissionszertifikate im ETS.

101 EU 20068.

102 Ohne Rumänien, Bulgarien und Malta.

103 EU 2013-3.

104 EU 2014-3.

105 Voraussichtliche Werte, jährliche Degression vorgesehen.

106 EU 2013-4.

Jahr	Wasserkraft		Windkraft		Biomasse		Abfall (biogener Anteil)		Photovoltaik		Geothermie		Gesamt							
	P / MW	E / GWh	%	P / MW	E / GWh	%	P / MW	E / GWh	%	P / MW	E / GWh	%	P / MW	E / GWh	%					
2000	3.538	24.867	4,29	6.097	7.550	1,30	451	2.893	0,50	585	1.844	0,32	76	64	0,01	0	0,000	10.747	37.218	6,42
2001	3.538	23.241	3,97	8.750	10.509	1,80	562	3.348	0,57	585	1.859	0,32	186	76	0,01	0	0,000	13.621	39.033	6,67
2002	3.785	23.662	4,03	11.989	15.786	2,69	702	4.089	0,70	585	1.949	0,33	296	162	0,03	0	0,000	17.357	45.648	7,77
2003	3.934	17.722	2,95	14.604	18.713	3,12	942	6.086	1,01	847	2.161	0,36	435	313	0,05	0	0,000	20.762	44.995	7,49
2004	3.819	19.910	3,26	16.623	25.509	4,18	1.287	7.960	1,30	1.016	2.117	0,35	1.105	556	0,09	0,2	0,000	23.850	56.052	9,19
2005	4.115	19.576	3,19	18.390	27.229	4,43	1.803	10.978	1,79	1.210	3.047	0,50	2.056	1.282	0,21	0,2	0,000	27.574	62.112	10,11
2006	4.083	20.042	3,23	20.579	30.710	4,95	2.450	14.841	2,39	1.250	3.844	0,62	2.899	2.220	0,36	0,2	0,000	31.261	71.657	11,56
2007	4.169	21.169	3,41	22.194	39.713	6,39	3.257	19.760	3,18	1.330	4.521	0,73	4.170	3.075	0,49	3,2	0,000	35.123	88.238	14,20
2008	4.138	20.446	3,31	23.826	40.574	6,56	3.783	22.872	3,70	1.440	4.659	0,75	6.120	4.420	0,71	3,2	0,003	39.310	92.989	15,04
2009	4.151	19.036	3,27	25.703	38.639	6,65	4.327	25.989	4,47	1.550	4.352	0,75	10.566	6.583	1,13	7,5	0,003	46.305	94.618	16,28
2010	4.395	20.956	3,41	27.191	37.793	6,14	4.744	29.085	4,73	1.650	4.781	0,78	17.554	11.729	1,91	7,5	0,005	55.542	104.372	16,96
2011	4.401	17.674	2,91	29.071	48.883	8,06	5.391	32.848	5,41	1.700	4.755	0,78	25.039	19.340	3,19	7,5	0,003	65.610	123.519	20,36
2012	4.400	21.200	3,50	31.315	46.000	7,60	5.711	35.950	5,94	1.700	4.900	0,81	32.643	28.000	4,62	12,1	0,004	75.781	136.075	22,47

Tabelle 6: Übersicht über die Entwicklung der erneuerbaren Energien im Stromsektor seit Inkrafttreten des EEG. Die Spalte P gibt die installierten Leistung in MW an, die Spalte E die erzeugte Strommenge in GWh und die Spalte % den Anteil an der Nettostromversorgung in Deutschland in Prozent. Schattierungen in der Tabelle stellen den Gültigkeitszeitraum der jeweiligen EEG-Fassung dar.¹⁰⁷

Jahr	KWK-Anlagen, Strom			Wärme aus Biomasse		Wärme aus Abfall (biogener Anteil)		Solarthermie		Geothermie		Gesamtwärme aus erneuerbaren Energien (ohne KWK)	
	E / GWh	Ausgleichszahlungen / Millionen €	KWK Aufschlag / €ct / kWh ¹⁰⁸	E / GWh	%	E / GWh	%	E / GWh	%	E / GWh	%	E / GWh	%
2000	32.219	563		51.419	3,50	3.548	0,24	1.261	0,09	1694	0,12	57.922	3,94
2001	65.656	843		58.220	3,80	3.421	0,22	1.587	0,10	1765	0,12	64.993	4,24
2002	20.128	205	0,256	57.242	3,83	3.295	0,22	1.884	0,13	1855	0,12	64.276	4,30
2003	52.596	808	0,325	69.182	4,57	3.169	0,21	2.144	0,14	1956	0,13	76.451	5,05
2004	55.928	795	0,315	75.376	4,97	3.690	0,24	2.443	0,16	2086	0,14	83.595	5,51
2005	59.753	862	0,348	79.746	5,25	4.692	0,31	2.778	0,18	2294	0,15	89.510	5,89
2006	60.267	787	0,310	83.023	5,48	4.911	0,32	3.218	0,21	2762	0,18	93.914	6,20
2007	46.077	641	0,248	86.670	6,35	4.783	0,35	3.638	0,27	3415	0,25	98.506	7,22
2008	46.460	523	0,189	93.133	6,38	5.020	0,34	4.134	0,28	4168	0,29	106.455	7,30
2009	53.309	490	0,180	102.403	7,43	6.832	0,50	4.733	0,34	4931	0,36	118.899	8,63
2010	21.006	397	0,128	132.843	8,77	7.566	0,50	5.200	0,34	5585	0,37	151.194	9,98
2011	7.397	220	0,056	115.022	9,55	8.041	0,67	5.600	0,47	6297	0,52	134.960	11,21
2012	9.183	345	0,062	122.790	10,20	8.400	0,70	6.050	0,50	7070	0,59	144.310	11,98

Tabelle 7: Übersicht über KWK und erneuerbare Energien zur Bereitstellung von Wärme. Schattierungen in der Tabelle stellen den Gültigkeitszeitraum der jeweiligen EEG-Fassung dar.^{109,110}

108 Für Letztverbraucher A beziehungsweise kleine Verbraucher.

109 BMWi 2014.

110 ÜNB 2013.

Jahr	Preis, nominal				Lebenshaltung %	Preis, real (Basis 2000)				Vergütung und Marktprämie abzüglich eingesparter Netzentgelte EEG-Strom Millionen €	Reziproker EEG-Quotient €ct/kWh	EEG-Umlage €ct/kWh
	Strom Industrie €ct/kWh	Preisanstieg Industrie	Strom Haushalt €ct/kWh	Preisanstieg Haushalt		Strom Industrie €ct/kWh	Preisanstieg Industrie	Strom Haushalt €ct/kWh	Preisanstieg Haushalt			
2000	4,40	100 %	14,92	100 %	92,7	4,40	100 %	14,92	100 %	883	8,50	
2001	4,89	111 %	15,44	103 %	94,5	4,80	109 %	15,14	101 %	1.577	8,69	
2002	5,15	117 %	16,08	108 %	95,9	4,98	113 %	15,54	104 %	2.226	8,91	
2003	5,79	132 %	16,86	113 %	96,9	5,54	126 %	16,13	108 %	2.608	9,161	
2004	6,19	141 %	17,51	117 %	98,5	5,83	132 %	16,48	110 %	3.611	9,29	
2005	6,76	154 %	18,23	122 %	100	6,27	143 %	16,90	113 %	4.398	9,995	
2006	7,51	171 %	18,91	127 %	101,6	6,86	156 %	17,25	116 %	5.606	10,875	
2007	7,95	181 %	20,15	135 %	103,9	7,09	161 %	17,98	120 %	7.593	11,360	
2008	8,82	200 %	21,43	144 %	106,6	7,67	174 %	18,63	125 %	8.717	12,253	
2009	10,04	228 %	22,72	152 %	107	8,70	198 %	19,69	132 %	10.451	13,945	
2010	9,71	221 %	23,42	157 %	108,2	8,32	189 %	20,06	134 %	12.790	10,318	2,047
2011	10,50	239 %	25,08	168 %	110,7	8,79	200 %	21,00	141 %	16.369	14,637	3,530
2012	10,70	243 %	25,76	173 %	112,9	8,79	200 %	21,15	142 %	18.526	12,229	3,592
2013										19.378		5,277
2014												6,240

Tabelle 8: Übersicht über Preisentwicklung und EEG-Kosten. Schattierungen in der Tabelle stellen den Gültigkeitszeitraum der jeweiligen EEG-Fassung dar.^{111, 112}

111 BMWi 2014.

112 ÜNB 2011.

Literatur

Alle Internetadressen wurden am 14.09.2014 erfolgreich abgerufen.

ADAC 2014

Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.: Zahlen, Fakten, Wissen. Aktuelles aus dem Verkehr, Ausgabe 2014, München, 2014. URL: http://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_zahlen_fakten_wissen_0514_208844.pdf

AusglMechV 2014

Ausgleichsmechanismusverordnung vom 17. Juli 2009 (BGBl. I S. 2101), die durch Artikel 16 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist, 2014. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ausglmechv/gesamt.pdf>

BDEW 2013-1

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Strompreisanalyse November 2013 Haushalte und Industrie, Berlin, 2013. URL: [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/131120_BDEW_Strompreisanalyse_November%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/131120_BDEW_Strompreisanalyse_November%202013.pdf)

BDEW 2013-2

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Strompreisanalyse Mai 2013 Haushalte und Industrie, Berlin, 2013. URL: [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf)

BDEW 2013-3

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Entwicklung der Brutto-Stromerzeugung in Deutschland, 2014. URL: http://bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten#

BDEW 2013-4

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Energie-Info: Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013), Berlin, 2013. URL: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257BoA003EE8B8/\\$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257BoA003EE8B8/$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf)

BDEW/ZVEI 2012

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V./ Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Smart Grids in Deutschland Handlungsfelder für Verteilnetzbetreiber auf dem Weg zu intelligenten Netzen, 2012. URL: [http://www.bdew.de/internet.nsf/res/86B8189509AE3126C12579CE0035F374/\\$file/120327%20BDEW%20ZVEI%20Smart-Grid-Broschuere%20final.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/res/86B8189509AE3126C12579CE0035F374/$file/120327%20BDEW%20ZVEI%20Smart-Grid-Broschuere%20final.pdf)

BMWi 2007

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung, 2007. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/eckpunkt-fuer-ein-integriertes-energie-und-klimaprogramm,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

BMWi 2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie zur Lage der deutschen Photovoltaikindustrie, 2012. URL: <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bericht-des-bmwi-zur-lage-der-deutschen-photovoltaikindustrie,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

BMWi 2014

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Gesamtausgabe der Energiedaten, Datensammlung des BMWi, Stand 03.03.2014. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe,doi=476134.html>

BMWi/BMU 2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Erster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“, Berlin, 2012. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

BNetzA 2014

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: EnLAG-Monitoring: Stand zum Ausbau von Energieleitungen nach dem Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) zum ersten Quartal 2014, 2014. URL: http://www.netzausbau.de/chn_1431/DE/Vorhaben/EnLAG-Vorhaben/EnLAG-Vorhaben-node.html

BNetzA/BKartA 2013

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen/Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2013, Bonn, 2013. URL: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217_Monitoringbericht2013.pdf?__blob=publicationFile&v=12

DEHSt 2013

Deutsche Emissionshandelsstelle beim Umweltbundesamt:
 Pressehintergrundpapier VET 2012 Berlin, 15.05.2013.
 URL: http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Pressehintergrund_VET-2012.pdf?__blob=publicationFile

DENA 2012

Deutsche Energieagentur: Thesenpapier: „Neue Pumpspeicher für die Stromversorgung in Deutschland“, 2012.
 URL: http://www.effiziente-energiesysteme.de/fileadmin/user_upload/PDF-Dokumente/Veranstaltungen/Pumpspeicherwerke_17.04.2012/Pumpspeicherwerke_PSW_Thesenpapier.pdf

Destatis 2013-1

Statistisches Bundesamt: Wirtschaftsrechnungen: Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Wohnverhältnisse privater Haushalte 2013, Fachserie 15, Sonderheft 1, Wiesbaden, 2013.
 URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/EinkommenVerbrauch/EVS_HausGrundbesitz-WohnverhaeltnisHaushalte2152591139004.pdf?__blob=publicationFile

Destatis 2013-2

Statistisches Bundesamt: Wohnen: Eigentümer- und Mieterhaushalte nach Haushaltsnettoeinkommen, 2013. URL: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/Tabellen/HuG_Nettoeinkommen_EVS.html

DLR/ISI 2006

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt/Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung:
 Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Gutachten vorgelegt von Krewitt, W./Schloman, B., 2006. URL: http://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2013/07/Studie_Externe-Kosten-der-Stromerzeugung-aus-erneuerbaren-Energien-im-Vergleich-zur-Stromerzeugung-aus-fossilen-Energietraegern.pdf

DVGW 2013

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. DVGW-Förderzeichen G1-07-10, Abschlussbericht vorgelegt von Müller-Syring, G. et al., Bonn, 2013. URL: http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_07_10.pdf

EEG 2014

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz/EEG): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 4 des Gesetzes vom 22. Juli 2014 (BGBl. I S. 1218) geändert worden ist, 2014. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf

EFI 2014

Expertenkommission für Forschung und Innovation:
 Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands, Berlin, 2014.
 URL: http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten_2014/EFI_Gutachten_2014.pdf

Erdmann/Dittmar 2010

Erdmann, G./Dittmar, L.: Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland, Berlin, 2010. URL: https://www.ensys.tu-berlin.de/fileadmin/fg8/Downloads/Sonstiges/2010_KWK_Studie_Langversion_FGENsys_TUBerlin.pdf

EU 2008

Europäische Union: Pressemitteilung: EU-Emissionshandelsystem: die geprüften Emissionen der EU-EHS-Betriebe im Jahr 2007, IP/08/787, 23.05.2008.
 URL: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-787_de.htm

EU 2011

Europäische Union: Beschluss der Kommission vom 27.4.2011 zur Festlegung EU-weiter Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten gemäß Artikel 10a der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. ABl. EU L130/1, Brüssel, 27.05.2011.
 URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:130:FULL:DE:PDF>

EU 2012-1

Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 600/2012 DER KOMMISSION vom 21. Juni 2012 über die Prüfung von Treibhausgasemissionsberichten und Tonnenkilometerberichten sowie die Akkreditierung von Prüfstellen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. ABl. EU L181/1, Brüssel, 12.07.2012. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:181:0001:0029:DE:PDF>

EU 2012-2

Europäische Union: Commission Staff Working Document: Information provided on the functioning of the EU Emissions Trading System, the volumes of greenhouse gas emission allowances auctioned and freely allocated and the impact on the surplus of allowances in the period up to 2020. European Commission, SWD(2012) 234 final. Brüssel, 25.07.2012. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/auctioning/docs/swd_2012_234_en.pdf

EU 2013-1

Europäische Union: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport and amending Regulation (EU) No 525/2013, COM(2013) 480 final 2013/0224 (COD), Brussels, 28.06.2013.
 URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/shipping/docs/com_2013_480_en.pdf

EU 2013-2

Europäische Union: BESCHLUSS Nr. 1359/2013/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Dezember 2013 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zur Klarstellung der Bestimmungen über den zeitlichen Ablauf von Versteigerungen von Treibhausgasemissionszertifikaten. ABL EU L343/1, Brüssel, 19.12.2013. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:343:0001:0001:DE:PDF>

EU 2013-3

Europäische Union: Report on Verified Emissions for 2012, 2012. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/registry/docs/verified_emissions_2012_en.xls

EU 2013-4

Europäische Union: Questions and Answers on the Commission's decision on national implementation measures (NIMs), on the cross-sectoral correction factor (CSCF), on the impact of the NIMs decision on auction volumes, and on the Commission's decision on standard capacity utilisation factors (SCUFs), Europäische Kommission, Brüssel, 22.10.2013. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/cap/allocation/docs/faq_nim_cscf_en.pdf

EU 2014-1

Europäische Union: Climate Action: Structural Reform of the European Carbon Market, 2014. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform/index_en.htm

EU 2014-2

Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 176/2014 DER KOMMISSION vom 25. Februar 2014 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1031/2010 insbesondere zur Festlegung der im Zeitraum 2013-2020 zu versteigernden Mengen Treibhausgasemissionszertifikate. ABL EU L56/11, Brüssel, 26.02.2014. URL: http://new.eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2014_056_R_0011_01&from=DE

EU 2014-3

Europäische Union: Climate Action: The EU Emissions Trading System (EU ETS), 2014. URL: http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/faq_en.htm

FFE/VBEW 2009

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V./Verband der Bayrischen Elektrizitätswirtschaft VBEW: CO₂-Vermeidungskosten erneuerbarer Energietechnologien. Kurzbericht vorgelegt von Beer, M., München, 2009. URL: https://www.ffe.de/download/kurzberichte/KF_vermk.pdf

Galvin 2013

Galvin, R. J.: Targeting "Behavers" Rather Than Behaviours: A "Subject-Oriented" Approach for Reducing Space Heating Rebound Effects in Low Energy Dwellings; In: *Energy and Buildings*, Volume 67, December 2013, S.: 596-607. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.065.

Götz/Lenck 2013

Götz, P./Lenck, T.: Auswirkungen der Kohleverstromung; Greenpeace, Energy Brainpool, Berlin, 2013. URL: <https://www.yumpu.com/de/document/view/22649823/auswirkungen-der-kohleverstromung-greenpeace>

GWS/IFEU 2012

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH/ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Volkswirtschaftliche Effekte der Energiewende: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Auswertung vorgelegt von Lehr, U. et al., Osnabrück, Heidelberg, 2012. URL: http://www.ifeu.de/energie/pdf/volkswirtschaftl_%20effekte_%20energie-wende_broschuere_pehnt_RZ.pdf

Honda 2014

Honda: FCX Clarity: About Fuel Cells FCEV, 2014. URL: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/fuel-cell-comparison.aspx>

Hyundai 2014-1

Hyundai: Technische Daten für Hyundai ix35 Fifa World cup edition 1.6, 2014. URL: <http://www.hyundai.de/ix35>

Hyundai 2014-2

Hyundai: Technische Daten für Hyundai ix35 FCEV, 2014. URL: <http://www.hyundai.de/Modelle/ix35-FCEV.html>

IASS 2013

Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam: Transdisciplinary Panel on Energy Change (TPEC): Beiträge zur sozialen Bilanzierung der Energiewende. Potsdam, 2013. URL: http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/report_beitrage_zur_sozialen_bilanzierung_der_energiewende.pdf

ISI 2014

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung: Expertenstatement, Wirkung des EEG – was ist die empirische Evidenz?, 2014. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/service/presseinfos/2014/pri-04-2014-EFI-Expertenstatement.php>

IWES 2012

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES: Windenergie Report Deutschland 2012, Kassel, 2013. URL: http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/bilder/upload/Windenergie_Report_Deutschland_2012.pdf

KBA 2014

Kraftfahrt-Bundesamt: Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 nach ausgewählten Merkmalen (Teil 2), 2014. URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2014_b_bestandsbarometer_teil2_absolut.html?nn=644526

Leopoldina/acatech/Akademienunion 2015

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): *Die Energiewende europäisch integrieren. Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2015, i. E.

Madlener 2013

Madlener, R.: Rebound-Effekte – unterschätzte Gefahr der Effizienzpolitiken? In: Wagner, U. (Hrsg.): *Energieeffizienz und Erneuerbare Energien im Wettbewerb – der Schlüssel für eine Energiewende nach Maß*, FfE-Schriftenreihe, 31, Tagungsband/Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., FfE-Fachtagung, 29./30.04.2013, 2013.

Neuhoff et al. 2012

Neuhoff, K./Bosch, S./Diekmann, J./Beznoska, M./Laboudy, T.: Soziale Härten bei der EEG-Umlage vermeiden, DIW Wochenbericht 41/2012, 2012. URL: http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.409391.de/12-41-1.pdf

Öko-Institut 2012

Öko-Institut: Wirtschaftlichkeit von Pumpspeicherkraftwerken. Stellungnahme vorgelegt von Bauknecht, D., 2012. URL: http://www.psw-blautal.de/fileadmin/microsite-psw/content/Wirtschaftlichkeit_von_Pumpspeicherwerken_-_ueberarbeitet.pdf

Öko-Institut 2013

Öko-Institut: Europäisches Emissionshandelssystem – Bilanz und zukunftsfähige Ausgestaltung. Stellungnahme vorgelegt von Matthes, F. C. zur Anhörung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit des 17. Deutschen Bundestages am 26. Juni 2013, Berlin, 24.06.2013. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/1792/2013-474-de.pdf>

Öko-Institut/WWF 2011

Öko-Institut/Umweltstiftung WWF Deutschland: Zusatzerträge von ausgewählten deutschen Unternehmen und Branchen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems, Analyse für den Zeitraum 2005-2012 vorgelegt von Matthes, F. C. et al., Berlin, 2011. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/1136/2011-019-de.pdf>

Phelix 2014

Physical Electricity Index: Aktuelle und historische Daten des Phelix, 2014. URL: <http://www.finanzen.net/rohstoffe/eex-strom-phelix-baseload-year-future>

Roon/Huck 2010

Roon, S. von/Huck, M.: Merit Order des Kraftwerksparks, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2010. URL: http://www.ffe.de/download/wissen/20100607_Merit_Order.pdf

UBA 2013

Umweltbundesamt (Hrsg.): Climate Change 7/2013: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, vorgelegt von Icha, P., Dessau-Roßlau, 2013. URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_07_2013_icha_co2emissionen_des_dt_strommixes_webfassung_barrierefrei.pdf

UBA 2014

Umweltbundesamt (Hrsg.): KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten, Studie vorgelegt von Gores, S./Jörß, W./Harthan, R./Ziesing, H. J./Horst, J., Dessau-Roßlau, 2014. URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_02_2014_kwk-ausbau_entwicklung_prognose_wirksamkeit_der_anreize_im_kwk-gesetz_o.pdf

Umbach 2015

Umbach, E. (Hrsg.): *Priorisierung der Ziele* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015, i. E.

ÜNB 2011

Übertragungsnetzanbieter (50 Hertz, Amprion, TenneT, Transnet BW): EEG-Jahresabrechnungen 2011, 2011. URL: http://www.netztransparenz.de/de/EEG_Jahresabrechnungen.htm

ÜNB 2013

Übertragungsnetzanbieter (50 Hertz, Amprion, TenneT, Transnet BW): Jahresabrechnungen zum Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, 2013. URL: http://www.netztransparenz.de/de/KWK_Jahresabrechnungen.htm

ÜNB 2014

Übertragungsnetzanbieter (50 Hertz, Amprion, TenneT, Transnet BW): Aktuelle Daten zu den Einnahmen- und Ausgabenpositionen nach AusglMechV für 2013, 2014. URL: http://www.netztransparenz.de/de/file/2014-01-07_EEG-Konto_finanzieller-HoBA_2013_Dezember_gesamt.pdf

ÜNB/BMWi 2013

Übertragungsnetzanbieter/Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Bericht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zur Leistungsbilanz 2013 nach EnWG § 12 Abs. 4 und 5, 2013. URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/J-L/leistungsbilanzbericht-2013,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

UNO 1997

United Nations Organization: Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, dt. Fassung gemäß Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil II Nr. 16, Bonn, 2. Mai 2002. URL: [http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&bk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*\[@attr_id=%27bgbl202s0966.pdf%27\]#_Bundesanzeiger_BGBI__%2F%2F\[%40attr_id%3D%27bgbl202s0966.pdf%27\]__1393496027021](http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&bk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*[@attr_id=%27bgbl202s0966.pdf%27]#_Bundesanzeiger_BGBI__%2F%2F[%40attr_id%3D%27bgbl202s0966.pdf%27]__1393496027021)

Volkswagen 2013-1

Technische Daten: Modell move up!: Konventioneller Antrieb, 2014. URL: http://www.volkswagen.de/de/models/up/varianten.s9_trimlevel_detail.suffix.html/der-neue-up~2Fmove-up-.html#/tab=7042020e15720e412eb492e50a227204|trimlevel=df037ca3ef93a644fac32afacd8cdc4

Volkswagen 2013-2

Technische Daten: Modell eco up! take up!: Erdgas-Antrieb, 2014. URL: http://www.volkswagen.de/de/models/up/varianten.s9_trimlevel_detail.suffix.html/der-eco-up~2Ftake-up-.html#/tab=144a51a127f7ea03ee7e9a71a6d0bcdf

Volkswagen 2013-3

Technische Daten: Modell E-up!: Elektrischer Antrieb, 2014. URL: http://www.volkswagen.de/de/models/up/varianten.s9_trimlevel_detail.suffix.html/e-up~2Fe-up.html#/tab=1bae3a9b847aaf26d6dd239d0475be8f

Wirth 2014

Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, Version vom 17.02.2014, Freiburg, 2014. URL: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

Wissel et al. 2010

Wissel, S./Fahl, U./Blesl, M./Voß, A.: Erzeugungskosten zur Bereitstellung elektrischer Energie von Kraftwerksoptionen in 2015, Universität Stuttgart, 2010. URL: http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/arbeitsberichte/downloads/Arbeitsbericht_08.pdf

Wolfrum 2014

Wolfrum, R. (Hrsg.): *Rechtliche Rahmenbedingungen für die Reform der Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2014.

Über das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Acht Arbeitsgruppen (AGs) bündeln fachliche Kompetenzen und identifizieren relevante Problemstellungen. Interdisziplinär zusammengesetzte Ad-hoc-Gruppen erarbeiten Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energiewende.

Auf Basis folgender Grundsätze stellt das Akademienprojekt System- und Orientierungswissen für Entscheidungen im Rahmen des Gemeinschaftswerks Energiewende bereit:

Die Energieversorgung unseres Landes ist ein komplexes System

Rohstoffe und Ressourcen, Technologien, Ökonomie, Gesellschaft und Recht: Im Energiesystem gibt es vielfältige, sektorübergreifende Wechselwirkungen. Werden sie nicht ausreichend berücksichtigt, können punktuelle Eingriffe paradoxe und unbeabsichtigte Folgen haben. Ein umsichtiger Umbau der Energieversorgung braucht daher Systemverständnis. Dieses muss gemeinschaftlich und mit höchstem wissenschaftlichem Anspruch erarbeitet werden. Den Masterplan für die Energiewende kann es jedoch nicht geben. Die Energiewende bedeutet nämlich die stetige Transformation des Energiesystems in all seiner Dynamik.

Der Sinn der Energiewende ist Nachhaltigkeit

Daher müssen wir uns darauf verständigen, welche Kriterien für eine nachhaltige Energieversorgung gelten sollen und wie Fortschritte in Richtung Nachhaltigkeit gemessen werden können. Im Energiekonzept der Bundesregierung bilden Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit das Zieldreieck einer nachhaltigen Energieversorgung. Sozialverträglichkeit und Gerechtigkeit müssen angemessen berücksichtigt werden. Um festzustellen, ob diese Ziele gleichwertig oder unterschiedlich zu gewichten sind, braucht das Land eine Wertediskussion und gute Verfahren für den Umgang mit Wertekonflikten.

Wissenschaft erarbeitet Gestaltungsoptionen

Auf Basis wissenschaftlich fundierter Gestaltungsoptionen können Akteure aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft sachlich begründete, ethisch verantwortbare und politisch umsetzbare Entscheidungen treffen. Im Unterschied zu Handlungsempfehlungen, die einen bestimmten Vorschlag in den Mittelpunkt rücken, beschreiben Optionen, mit welchen Konsequenzen zu rechnen ist, wenn man sich für das eine oder andere Vorgehen entscheidet. So kann Wissenschaft aufzeigen, welche Vor- und Nachteile nach dem besten Stand des Wissens mit jeder Lösung verbunden sind. Der Umgang mit Zielkonflikten und der immer verbleibenden Unsicherheit im Entscheidungsprozess aber ist eine politische Aufgabe, die im Dialog mit den gesellschaftlichen Gruppen zu bewältigen ist.

Mitwirkende des Projekts

Arbeitsgruppen des Projekts

AG Ausgangssituation	AG Recht	AG Technologien
AG Gesellschaft	AG Ressourcen	AG Umsetzungsoptionen
AG Ökonomie	AG Szenarien	

Ad-hoc-Gruppe „Regelungsgeflecht im Energiesystem“

Die vorliegende Analyse wurde von der Ad-hoc-Gruppe „Regelungsgeflecht im Energiesystem“ erarbeitet.

Prof. Dr. Ferdi Schüth (AG-Leiter)	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
Dr. Florian Ausfelder (Wissenschaftlicher Referent)	DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.
Dr. Frank-Detlef Drake	RWE AG
Prof. Dr. Marian Paschke	Universität Hamburg
Michael Themann	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Kurt Wagemann	DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.
Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner	Ruhr-Universität Bochum

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Steuerkreis

Der Steuerkreis koordiniert die Arbeit in acht interdisziplinären, thematischen Arbeitsgruppen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Prof. Dr. Armin Grunwald	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruher Institut für Technologie
Prof. Dr. Peter Herzig	Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Ortwin Renn	Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
Prof. Dr. Ferdi Schüth	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
em. Prof. Dr. Rüdiger Wolfrum	Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
Prof. Dr. Eberhard Umbach	Karlsruher Institut für Technologie

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Günter Stock	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Vizepräsidentin Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Andreas Löschel	Leiter Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung und Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Klaus Töpfer	Exekutivdirektor Institute for Advanced Sustainability Studies
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Bildung und Forschung
Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr. Ingrid Wüning Tschol (Gast)	Bereichsdirektorin „Gesundheit und Wissenschaft“ Robert-Bosch-Stiftung

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach Leiter der Koordinierungsstelle, acatech

Rahmendaten

Projektlaufzeit

04/2013 bis 02/2016

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2013) und der Robert-Bosch-Stiftung gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Robert Bosch **Stiftung**

Koordinierungsstelle:

Dr. Ulrich Glotzbach
Leiter der Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft
Unter den Linden 14, 10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 206 3096 14
E-Mail: glotzbach@acatech.de

Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft

ISBN: 978-3-9817048-2-2