



## Grüner Wandel: Erneuerbare Energien, Policy Mix und Innovation

*Ergebnisse des GRETCHEN-Projektes zum Einfluss des Policy Mixes  
auf technologischen und strukturellen Wandel bei erneuerbaren  
Stromerzeugungstechnologien in Deutschland*



## Autor/inn/en:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI:  
**Karoline S. Rogge, Barbara Breitschopf, Katharina Mattes**



Friedrich-Schiller-Universität Jena:  
**Uwe Cantner, Holger Graf, Johannes Herrmann, Martin Kalthaus**



seit 1558

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS) Osnabrück:  
**Christian Lutz, Kirsten Wiebe**



## Projektleiterin:

Karoline S. Rogge (Fraunhofer ISI und University of Sussex)

## Stand:

September 2015

### Bitte zitieren Sie diesen Bericht als:

Rogge, K. S., Breitschopf, B., Mattes, K., Cantner, U., Graf, H., Herrmann, J., Kalthaus, M., Lutz, C. und Wiebe, K. (2015): Grüner Wandel: Erneuerbare Energien, Policy Mix und Innovation – Ergebnisse des GRETCHEN-Projektes zum Einfluss des Policy Mixes auf technologischen und strukturellen Wandel bei erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Executive Summary</b>	4
.....	
<b>1 Einleitung</b>	7
.....	
<b>2 Markt- und Technologieentwicklung erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien</b>	9
2.1 Marktentwicklung	9
2.2 Innovation und technologischer Wandel	14
2.3 Struktureller Wandel und gesamtwirtschaftliche Effekte	19
.....	
<b>3 Der Policy Mix für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien</b>	23
3.1 Ziele des Policy Mixes	23
3.2 Instrumente und ihr Zusammenspiel	24
3.3 Glaubwürdigkeit und Kohärenz des Policy Mixes	28
.....	
<b>4 Innovationswirkung des Policy Mixes</b>	31
4.1 Innovationswirkung von Zielen und deren Konsistenz	31
4.2 Innovationswirkung einzelner Instrumente und deren Zusammenspiel	31
4.3 Innovationswirkung von Konsistenz, Glaubwürdigkeit und Kohärenz des Policy Mixes	34
4.4 Innovationswirkung des gesamten Policy Mixes	36
.....	
<b>5 Übergeordnete Schlussfolgerungen für Politik und Forschung</b>	38
5.1 Politikempfehlungen	38
5.2 Forschungsempfehlungen	40
.....	
<b>Projektveröffentlichungen</b>	42
.....	
<b>Partner</b>	43

# Executive Summary

## GRETCHEN – The impact of the German policy mix on technological and structural change in Renewable power generation Technologies / Die Wirkung des deutschen Policy Mixes auf technologischen und strukturellen Wandel im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien

Um das ambitionierte klimapolitische Ziel eines globalen Temperaturanstiegs von nicht mehr als 2 °C zu erreichen, bedarf es eines umfassenden grünen Wandels hin zu CO<sub>2</sub>-freien Lösungen. Mit Blick darauf hat das GRETCHEN-Projekt die Innovationswirkungen des Policy Mixes für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien in Deutschland untersucht. Die Analysen erfolgten auf drei Ebenen:

- ▶ der Mikroebene, auf der die Unternehmensperspektive im Fokus steht,
- ▶ der Mesoebene, auf der die Industriestruktur und das Innovationssystem betrachtet werden und
- ▶ der Makroebene, auf der gesamtwirtschaftliche Effekte und Emissionen modelliert werden.

Für diese drei Ebenen wurde die Wirkung des Policy Mixes für folgende Aspekte analysiert:

- ▶ politische Ziele für den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien,
- ▶ technologiefördernde, nachfragefördernde und systemische Instrumente und ihr Zusammenspiel im Instrumentenmix und
- ▶ Konsistenz und Glaubwürdigkeit des Policy Mixes und Kohärenz der politischen Prozesse.

Basierend auf dem im GRETCHEN-Projekt entwickelten Policy-Mix-Konzept lässt sich der für den grünen Wandel notwendige Policy Mix ganzheitlich fassen und hinsichtlich seiner Innovationswirkung bewerten.

### Markt- und Technologieentwicklung erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien

Die Transformation des Energiesystems hin zu einer nachhaltigen Stromerzeugung erfordert die Entwicklung

neuer und Verbesserung bestehender Technologien. Die GRETCHEN-Analysen belegen, dass in den letzten Jahrzehnten ein rapider technologischer Wandel bei erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien stattgefunden hat:

- ▶ die wissenschaftlichen Photovoltaik-Publikationen aus Deutschland sind im Zeitverlauf stark angestiegen,
- ▶ die Entwicklung der Patentanmeldungen für Photovoltaik und Windkraft lag über dem allgemeinen Patentrend in Deutschland,
- ▶ die Kooperationen zwischen verschiedenen Akteuren im Innovationssystem für Photovoltaik und Windkraft haben stark zugenommen und unterstützen die Innovationsaktivitäten durch intensiven Wissensaustausch,
- ▶ die Technologiekosten sind so stark gesunken, dass einige der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien mittlerweile mit fossilen Konkurrenztechnologien wettbewerbsfähig sind,
- ▶ die technologische Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands auf dem Gebiet der Photovoltaik hat sichtbar zugenommen,
- ▶ deutsche Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien konnten neue Exportmärkte erschließen, was sich insgesamt positiv auf die wirtschaftliche Gesamtentwicklung, u. a. in Form zusätzlicher Beschäftigung, niederschlägt, und
- ▶ die Dekarbonisierung des Energiesystems ist voran gekommen, nicht nur in Deutschland, sondern durch Technologietransfer auch in anderen Teilen der Welt.

Trotz dieses positiven Entwicklungsstandes verlangsamt sich aktuell die weitere Entwicklung in Deutschland und weist teilweise sogar rückläufige Tendenzen auf. Global betrachtet bleibt der Trend zu erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien jedoch stark positiv.

## Der Policy Mix für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien

Seit der Einführung des EEG im Jahr 2000 mündete der dynamische Ausbau erneuerbarer Energien in zunehmend ambitionierteren Zielen, die mittlerweile einen Anteil von 80 Prozent erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 vorsehen. Zur Umsetzung dieser politischen Ausbauziele wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl nachfragefördernder (z. B. EEG), technologiefördernder (z. B. Energieforschungsprogramm) und systemischer Instrumente (z. B. Verbundforschung) eingeführt. Trotz dieses relativ umfassenden Instrumentenmixes ist jedoch die Glaubwürdigkeit der Politik hinsichtlich der Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den letzten Jahren laut GRETCHEN-Befragung deutlich gesunken. Grund hierfür dürften u. a. die kontroversen politischen Diskussionen um die Zukunft der Förderung der erneuerbaren Energien sein. Die Kohärenz dieser politischen Entscheidungsfindungs- und Implementierungsprozesse wird von den Herstellern erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien als gering angesehen.

## Innovationswirkung von Zielen und deren Konsistenz

Die politischen Ausbauziele stellen laut GRETCHEN-Befragung einen der wichtigsten politischen Einflussfaktoren für die Innovationstätigkeiten der in Deutschland ansässigen Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien dar. Im Fall der Offshore-Windkraft zeigt sich, dass die konsistente und über einen Zeitraum von zehn Jahren stabile und technologiespezifische Offshore-Windstrategie mit ihren lang- und mittelfristigen Zielen einen maßgeblichen Einfluss auf die Innovationsaktivitäten der Unternehmen hatte. Insgesamt bestätigen die durchgeführten Analysen, dass die Dekarbonisierung der Stromerzeugung einen wichtigen Beitrag leistet, um die ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen, wozu aber auch entsprechende Beiträge aller anderen Sektoren benötigt werden.

## Innovationswirkungen einzelner Instrumente...

Technologiefördernde, systemische und nachfragefördernde Instrumente haben jeweils einen deutlichen Einfluss auf den technologischen Wandel in den untersuchten Technologien.

**Technologiefördernde Instrumente** haben eine positive Innovationswirkung. So zeigt sich, dass die Technologieförderung:

- ▶ die Patentanmeldungen bei Photovoltaik und Windkraft steigert,
- ▶ die F&E-Ausgaben der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien verstärkt,
- ▶ die Größe und Vernetzung im nationalen Innovationssystem für Photovoltaik und Windkraft erhöht, und
- ▶ den Zugang zu internationalem Wissen bei Photovoltaik verbessert.

**Systemische Instrumente** begünstigen die Entwicklung des Innovationssystems. Insbesondere:

- ▶ fördern sie den Wissensaustausch zwischen Innovatoren bei Photovoltaik und Windkraft und
- ▶ steigern die internationale Vernetzung in der Photovoltaikforschung.

**Nachfragefördernden Instrumente** legen nicht nur den Grundstein für die Entstehung eines attraktiven Marktes, sondern wirken sich auch positiv auf Innovation aus. So führen sie zu:

- ▶ steigenden Patentanmeldungen bei Photovoltaik und Windkraft,
- ▶ höheren Innovationsaktivitäten und F&E-Ausgaben der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien,
- ▶ einer Erhöhung der Größe und Vernetzung im nationalen Innovationssystem bei Photovoltaik und Windkraft,
- ▶ einem verbesserten Zugang zu internationalem Wissen bei Photovoltaik und
- ▶ einem Anstieg der technologischen Wettbewerbsfähigkeit bei Photovoltaik.

Diese von nachfragefördernden Instrumenten ausgehenden positiven Innovationswirkungen setzen einen sich selbst verstärkenden Prozess aus Kostensenkung und Ausbau der erneuerbaren Energien in Gang, der die momentanen Pfadabhängigkeiten im Energiesystem zu überwinden hilft. Dabei findet diese Entwicklung nicht isoliert in Deutschland statt, sondern wird ebenfalls vom internationalen Ausbau verstärkt, der bei der Wirkung des deutschen Policy Mixes berücksichtigt werden muss.

## ... und deren Zusammenspiel im Instrumentenmix

Die Betrachtung des Instrumentenmixes zeigt, dass sich die verschiedenen Instrumente gegenseitig in ihrer positiven Innovationswirkung verstärken. Die GRETCHEN-Analysen weisen auf eine Schlüsselrolle nachfragefördernder Maßnahmen im Instrumentenmix hin. Insgesamt fungiert eine gut abgestimmte Kombination von nachfragefördernden, technologiefördernden und systemischen Instrumenten als klarer Innovationstreiber. Die GRETCHEN-Befragung zeigt zudem, dass ein konsistenter Instrumentenmix zur Erhöhung der privaten F&E-Ausgaben beiträgt. Außerdem zeigen sich Synergien beim Zusammenspiel der politischen Instrumente und Ziele. So verstärken die Ausbauziele für erneuerbare Energien die positive Wirkung der Technologieförderung auf die technologische Wettbewerbsfähigkeit bei Photovoltaik.

## Innovationswirkung von Konsistenz, Glaubwürdigkeit und Kohärenz des Policy Mixes

Für den Innovationsanreiz sind nicht nur ambitionierte Ausbauziele und ein in sich stimmiger Instrumentenmix wichtig, sondern insbesondere auch die Ausrichtung der verschiedenen Instrumente auf die Ziele der Energiewende. So hat die GRETCHEN-Befragung gezeigt, dass unternehmerische Innovationsausgaben dann höher ausfallen, wenn der Instrumentenmix ambitioniert genug erscheint, um diese Ziele tatsächlich zu erreichen. Des Weiteren unterstreichen die Ergebnisse, dass ein glaubwürdiges politisches Bekenntnis zur Energiewende einen essentiellen Faktor für unternehmerische Innovationsausgaben darstellt. Hingegen scheint die hohe Unzufriedenheit der Unternehmen mit den politischen Entscheidungsfindungsprozessen deren Innovationsaktivitäten nicht maßgeblich zu beeinflussen.

## Innovationswirkung des gesamten Policy Mixes

Die Dynamik und Vielfalt des Policy Mixes und seine Wirkung auf technologischen und strukturellen Wandel wurde überwiegend in Einzelanalysen untersucht, deren Zusammenführung zu einem verbesserten Verständnis der Innovationswirkung des Policy Mixes beiträgt. Zusätzlich wurde im Rahmen von GRETCHEN ein technologiespezifischer aggregierter Indikator zur Attraktivität des Policy Mixes entwickelt, der erste Aufschlüsse über die Gesamtheit der Entwicklung der politischen Rahmenbedingungen und deren Einfluss auf den technologischen Wandel ermöglicht. Hierbei zeigt sich, dass die jährlichen Patentanmeldungen für Windkraft nahezu parallel mit der gemessenen Attraktivität des Policy Mixes verlaufen. Für die Photovoltaik ist der

GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator seit 2010 rapide gefallen, was mit einer deutlichen Abschwächung der Patentanmeldungen deutscher Erfinder einhergeht.

## Politikempfehlungen

Das sich aktuell verschlechternde Innovationsklima für erneuerbare Energien ist ein Warnsignal für die Politik. Der eingeschlagene technologische Wandel weist in die richtige Richtung und muss angesichts ambitionierter Energie- und Klimaschutzziele und vieler Vorteile verstärkt anstatt abgebremst werden. Aus den GRETCHEN-Analysen lassen sich dafür drei übergeordnete Politikempfehlungen ableiten:

- ▶ Für eine erfolgreiche Gestaltung des technologischen Wandels im Energiesystem ist eine aufeinander abgestimmte Kombination von verschiedenen politischen Instrumenten unerlässlich. Es gilt, den Policy Mix als Ganzes zu erfassen und zu gestalten – ein Abstellen auf nur ein Instrument ist nicht zielführend.
- ▶ Um eine lebhafte Innovationstätigkeit anzuregen, muss dieser Policy Mix glaubwürdig und in sich möglichst konsistent sein. Ohne einen starken politischen Willen für den grünen Wandel besteht hingegen Unsicherheit über die zukünftigen Marktentwicklungen, was langfristige Investitionen in Innovationen behindert und Deutschlands technologische Wettbewerbsfähigkeit bei den betrachteten Technologien gefährdet.
- ▶ Der Wandel hin zu erneuerbaren Erzeugungstechnologien ist ein zunehmend globaler Prozess, der in Zukunft eine deutlich stärkere supranationale Abstimmung des Policy Mixes erfordert. Dabei ist die Diskussion um die Energiewende in Deutschland vorrangig auf deren Vorteile – u. a. in Form von Exportchancen, Arbeitsplätzen und ihren Beitrag zu internationalem Klimaschutz und nachhaltiger Entwicklung – auszurichten.

## Zukünftiger Forschungsbedarf

Die im Rahmen von GRETCHEN durchgeführten empirischen Arbeiten haben zu umfassenden neuen Erkenntnissen über die Wirkung des Policy Mixes geführt und aufgezeigt, wo weitergehende Forschung in den Bereichen Ökonomie des Klimawandels, der ökonomischen Evaluation der Energiewende und der Umweltinnovationen nötig ist. Hierzu zählt zum einen, dass eine verbesserte Datenbasis für weiterführende Forschungsarbeiten unabdingbar ist. So gilt es zunächst, die nationalen und internationalen Datenlücken zu schließen (insb. längere Zeitreihen, Unternehmensdaten). Zum anderen sollte die Wirkungsanalyse auf den Policy Mix anderer Länder und Sektoren ausgeweitet werden, wofür quantitative und qualitative Forschungsmethoden zu kombinieren und weiterzuentwickeln sind.

# 1 Einleitung

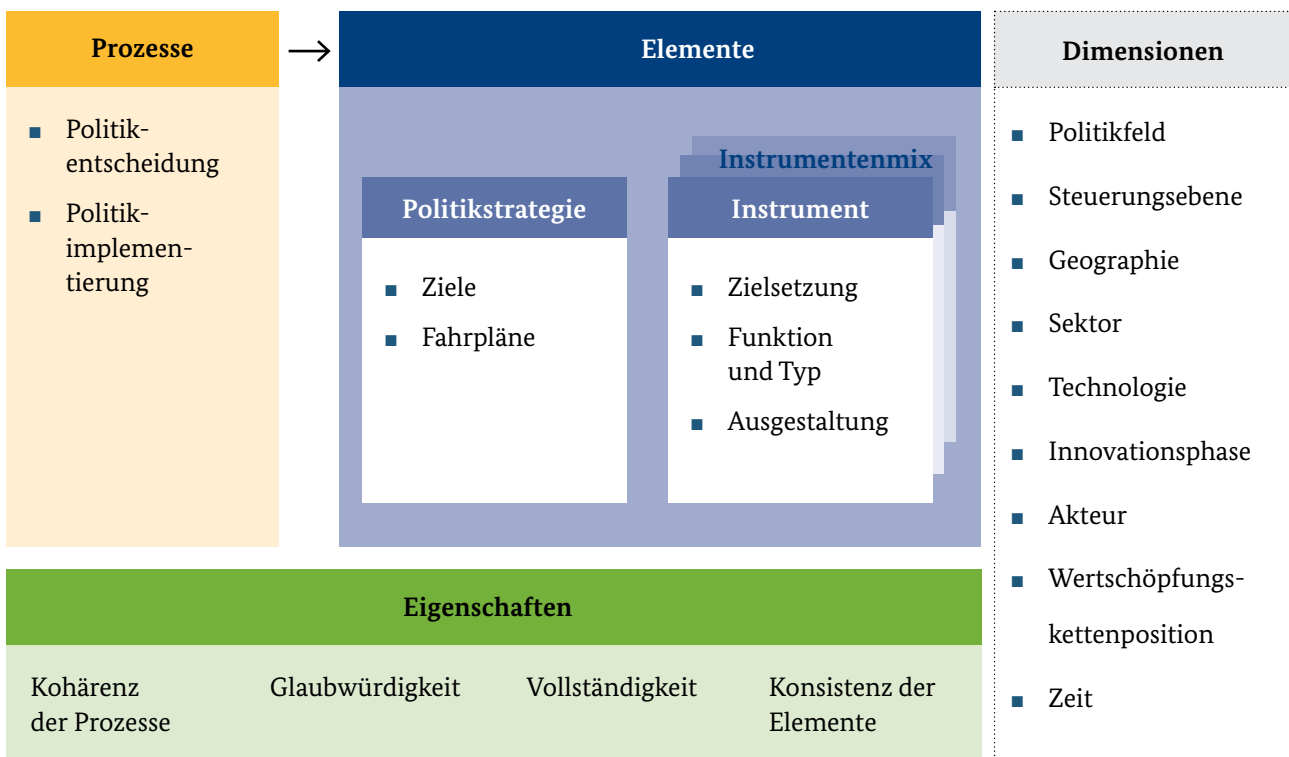
Um das ambitionierte klimapolitische Ziel der Beschränkung des globalen Temperaturanstiegs auf 2 °C zu erreichen, bedarf es insbesondere für den Energiesektor einer Neuausrichtung und Beschleunigung des technologischen Wandels hin zu CO<sub>2</sub>-freien Lösungen. Aufgrund vielfältiger Markt- und Systemversagen und der Trägheit des bestehenden Energiesystems wird hierfür ein Mix aus politischen Instrumenten benötigt, der die Dekarbonisierung des Systems beschleunigt. Erforderlich sind hierfür sowohl Instrumente, die die Forschung und Entwicklung sowie Demonstration von neuen Technologien fördern, als auch solche, die Nachfrage generieren und somit die Verbreitung von Innovationen am Markt unterstützen. Darüber hinaus kann die Transformation des Energiesystems durch systemische Instrumente unterstützt werden, die die Funktionsfähigkeit des Innovationssystems fördern.

Im Rahmen der deutschen Energiewende hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 auf mindestens 80 Prozent zu erhöhen. Zur Umsetzung dieses Ziels kommt ein umfangreicher Instrumentenmix

zum Einsatz, der kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Als Kerninstrument für das Erreichen des deutschen Ausbauziels zählt hierbei das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Dessen Innovationswirkung war im vergangenen Jahr Gegenstand wissenschaftlicher Debatten, in denen auch das Zusammenspiel mit der öffentlichen Forschungsförderung thematisiert wurde. Darüber hinausgehende Wirkungen des gesamten Policy Mixes auf Innovationen wurden dabei allerdings nur unzureichend berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund wurden im Forschungsvorhaben GRETCHEN die Auswirkungen des deutschen Policy Mixes auf die Entwicklung und Verbreitung von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien sowie der daraus resultierende technologische und strukturelle Wandel untersucht.

Im ersten Schritt dieses Forschungsvorhabens wurde als Basis für die empirischen Arbeiten ein **Policy-Mix-Konzept** entwickelt, das Ansätze der umwelt- und innovationsökonomischen sowie der politikwissenschaftlichen Literatur zusammenführt. Abbildung 1 zeigt die drei resultierenden Bausteine des GRETCHEN-Policy-Mix-Konzeptes: Elemente, Prozesse und Eigenschaften, die jeweils anhand

Abbildung 1: GRETCHEN-Policy-Mix-Konzept [15]





verschiedener Dimensionen konkretisiert werden können. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei die Elemente des Policy Mixes, wozu zum einen die politischen Strategien mit ihren langfristigen Zielen und Umsetzungsplänen zählen (wie zum Beispiel bei der Energiewende der Fall), und zum anderen der Mix an interagierenden Instrumenten (wie bspw. dem EEG, der öffentlichen F&E-Förderung sowie dem EU-Emissionshandel). Diese verschiedenen Elemente des Policy Mixes werden im politischen Prozess bestimmt – sowohl in Deutschland auf Bundes- und Länderebene, als auch auf europäischer und internationaler Ebene. Darüber hinaus werden in GRETCHEN explizit die Eigenschaften des Policy Mixes berücksichtigt. Hierzu zählen nicht nur die Konsistenz von Politikstrategie und Instrumentenmix und die Kohärenz der politischen Prozesse, sondern auch die Glaubwürdigkeit und Vollständigkeit des Policy Mixes.

Aufbauend auf diesem umfassenden Policy-Mix-Konzept erfolgte die empirische Analyse auf drei Untersuchungsebenen:

- ▶ Auf der **Mikro-Ebene** wurden die firmenspezifischen Auswirkungen des Policy Mixes auf Inventionen, Innovationen und die Diffusion von Erzeugungstechnologien für erneuerbare Energieerzeugungstechnologien mit Hilfe von Unternehmens- und Betriebsbefragungen sowie Patentdatenanalysen untersucht.
- ▶ Auf der **Meso-Ebene** standen die Auswirkungen des Policy Mixes auf die Innovationssysteme und die technologische Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien (insbesondere Windkraft und

Photovoltaik) im Fokus. Außerdem wurde für die Photovoltaik in Deutschland der Einfluss des Policy Mixes auf die Industriestruktur untersucht und dabei auch die Wechselwirkungen mit China berücksichtigt.

- ▶ Auf der **Makro-Ebene** wurde der technologische Wandel der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien endogen modelliert. Mit Hilfe von Szenario-Analysen konnten makroökonomische Effekte und Emissionswirkungen des Policy Mixes identifiziert werden.

Dieses Vorgehen zeigt die Wirkungszusammenhänge zwischen dem Policy Mix für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien und dem entsprechenden technologischen und strukturellen Wandel auf. Die folgenden Kapitel fassen die Projektergebnisse des dreieinhalbjährigen GRETCHEN-Projektes für Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Forschung zusammen. Nach einer Übersicht über die Markt- und Technologieentwicklung der erneuerbaren Energien im Bereich der Stromerzeugung (Kapitel 2) wird in Kapitel 3 der Policy Mix für Deutschland näher vorgestellt. Die Wirkung des Policy Mixes auf Innovation und technologischen Wandel wird in Kapitel 4 beschrieben. Dabei wird stets auf die im Rahmen von GRETCHEN verfassten wissenschaftlichen Artikel verwiesen, in denen sich jeweils weiterführende Informationen finden und die im Literaturverzeichnis aufgelistet sind. Außerdem wird im gesamten Bericht das methodische Vorgehen anhand von prägnanten Methodikboxen erläutert. Basierend auf den Projektergebnissen werden im abschließenden Kapitel 5 übergeordnete Schlussfolgerungen für die Politik zur Ausgestaltung des Policy Mixes sowie hinsichtlich des zukünftigen Forschungsbedarfs identifiziert.





## 2 Markt- und Technologieentwicklung erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien

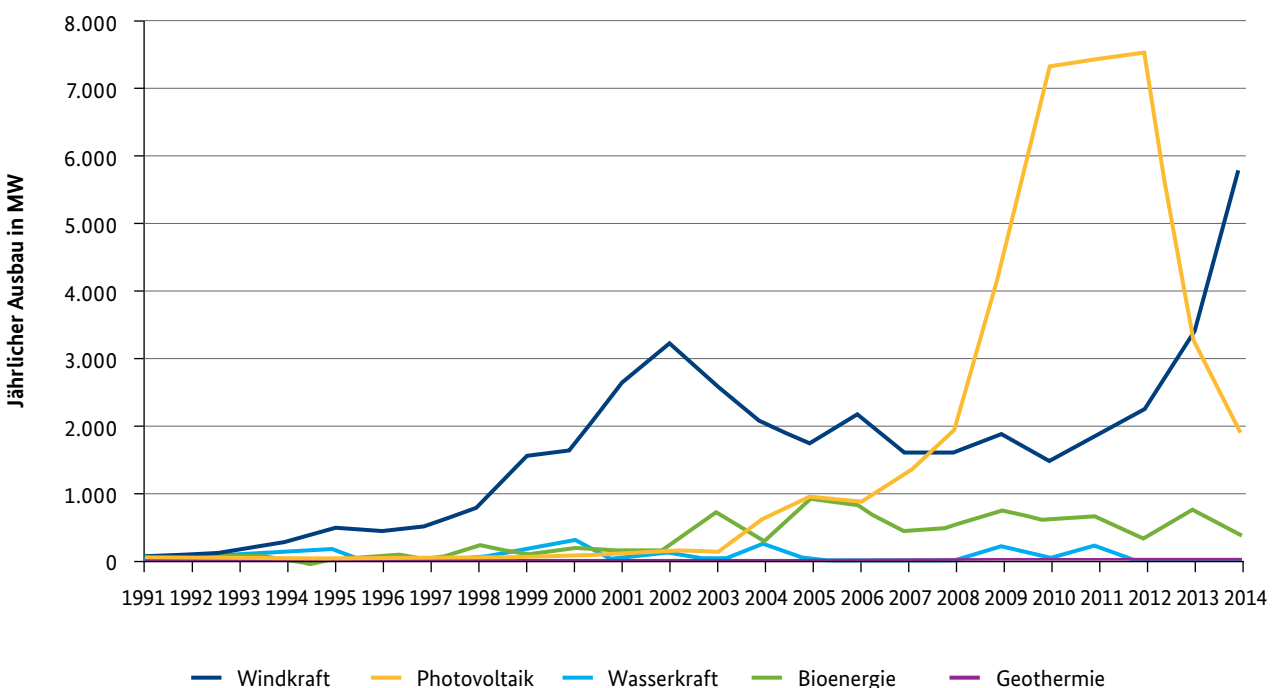
### 2.1 Marktentwicklung

In Deutschland, aber auch weltweit, haben die erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien erheblich an Bedeutung gewonnen und einerseits den Strommarkt, andererseits aber auch die Industriestruktur beeinflusst.

Der **Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien in Deutschland** ist technologiespezifisch (vgl. Abbildung 2). Windkraft wurde am stärksten ausgebaut, mit einem Hochpunkt im Jahr 2002. Danach nahm der Ausbau ab, um insbesondere ab 2012 wieder stark anzusteigen, wobei hier auch der Offshore-Ausbau mit einem Anteil von 25 Prozent im Jahr 2014 stark ins Gewicht fällt. Der Ausbau

der Photovoltaik stieg ab 2003 stark an und hatte in den Jahren 2008 bis 2013 einen immensen Ausbauboom, der aber 2013 abrupt endete. Die Nutzung grundlastfähiger Bioenergie zur Stromerzeugung nimmt ebenfalls erst ab dem Jahr 2000 Fahrt auf, aber die Ausbautzahlen bleiben im Vergleich zu Windkraft und Photovoltaik gering. Geothermie und Wasserkraft zeigen einen geringen Ausbau, was bei Geothermie vor allem an der geringen staatlichen Förderung und bei Wasserkraft am Mangel geeigneter Standorte liegen dürfte. Andere Technologien, etwa solarthermische Kraftwerke oder Wellen- oder Gezeitenkraftwerke, spielen in Deutschland keine Rolle.

**Abbildung 2:** Jährlicher Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien in Deutschland [BMWi 2015: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland]



**Box 1 Betriebsbefragung Modernisierung der Produktion 2012**

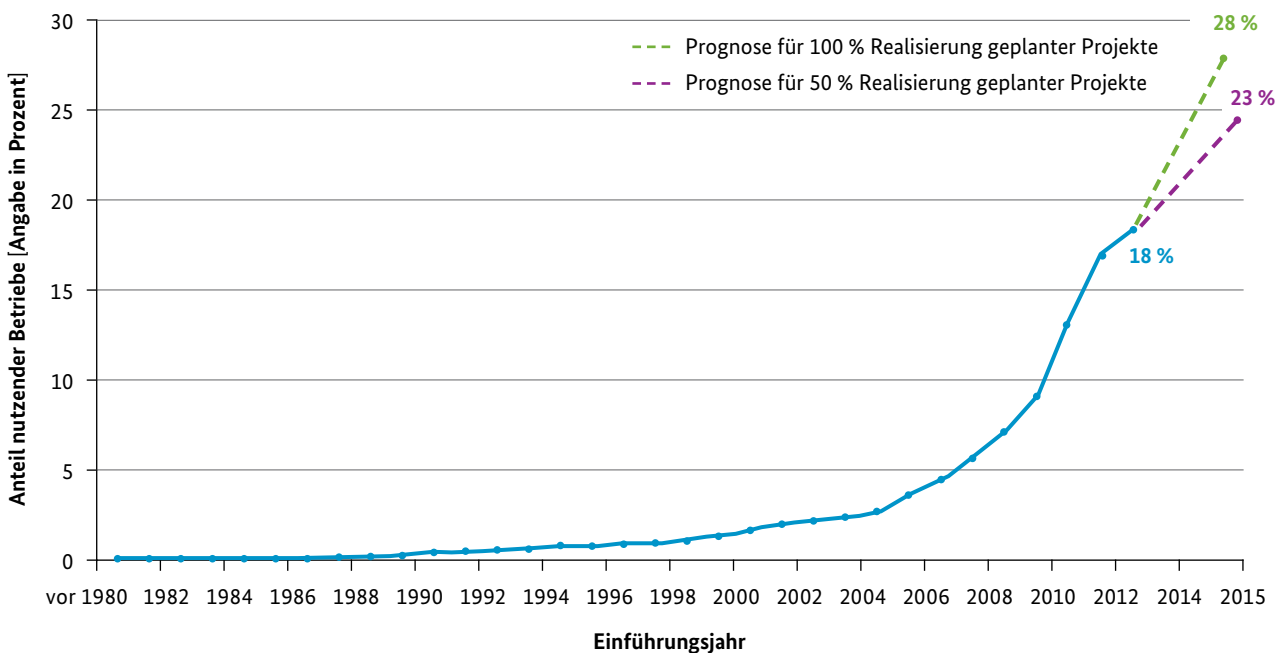
Das Fraunhofer ISI führt seit 1993 regelmäßig Erhebungen zur Modernisierung der Produktion durch. Die Erhebung 2012 deckt alle Branchen des Verarbeitenden Gewerbes ab. Untersuchungsgegenstand sind u. a. Produktionsstrategien, der Einsatz innovativer Organisations- und Technikkonzepte in der Produktion sowie die Erfassung von Leistungsindikatoren wie Produktivität, Flexibilität und Qualität. Mit diesen Informationen erlaubt die Umfrage detaillierte Analysen zur Modernität und Leistungskraft der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes. Für die Erhebungsrunde 2012 schickten 1.594 Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland einen verwertbar ausgefüllten Fragebogen zurück. Die antwortenden Betriebe decken das Verarbeitende Gewerbe Deutschlands repräsentativ ab [8].

Ein großer Vorteil der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien liegt in der Möglichkeit, Kleinanlagen dezentral direkt beim Nutzer zu installieren. Um den Umfang der bisherigen Anwendung und zukünftige Entwicklungen bei der Industrie abschätzen zu können, wurde im Rahmen des GRETCHEN-Projekts eine **Befragung im Verarbeitenden Gewerbe** in Deutschland durchgeführt [8, 17]. Dafür wurde die Betriebsbefragung *Modernisierung der Produktion 2012* des Fraunhofer ISI genutzt (siehe Methodikbox 1 Betriebsbefragung *Modernisierung der Produktion 2012*). Abbildung 3 bildet den Diffusionsverlauf von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien im Verarbeitenden Gewerbe ab. 2012 nutzten demnach 18 Prozent der befragten

Betriebe erneuerbare Stromerzeugungstechnologien. Bis 2015 könnte der Anteil auf 28 Prozent steigen – sofern die Betriebe ihre geplanten Vorhaben zur Nutzung von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien vollständig umsetzen. Wenn lediglich 50 Prozent der geplanten Vorhaben realisiert werden, liegt der Anteil bei 23 Prozent.

Als Einflussfaktor für die Adoption von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien konnte die Ressourcenverfügbarkeit in Form solarer Strahlung identifiziert werden. So zeigt sich, dass Betriebe in den sonnenreicheren Bundesländern (Bayern, Baden-Württemberg, Berlin, Saarland und Rheinland-Pfalz) mit höherer Wahrscheinlichkeit in

**Abbildung 3:** Diffusion von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien im Verarbeitenden Gewerbe [8]



erneuerbare Stromerzeugungstechnologien investierten als Betriebe aus weniger sonnenreichen Bundesländern. Hingegen gibt es keine Unterschiede zwischen Betrieben aus energieintensiven und nicht-energieintensiven Branchen. Ferner nutzen endkundennahe Betriebe häufiger erneuerbare Stromerzeugungstechnologien, um durch den Einsatz solcher Technologien ein „grünes Image“ des Betriebs zu unterstreichen.

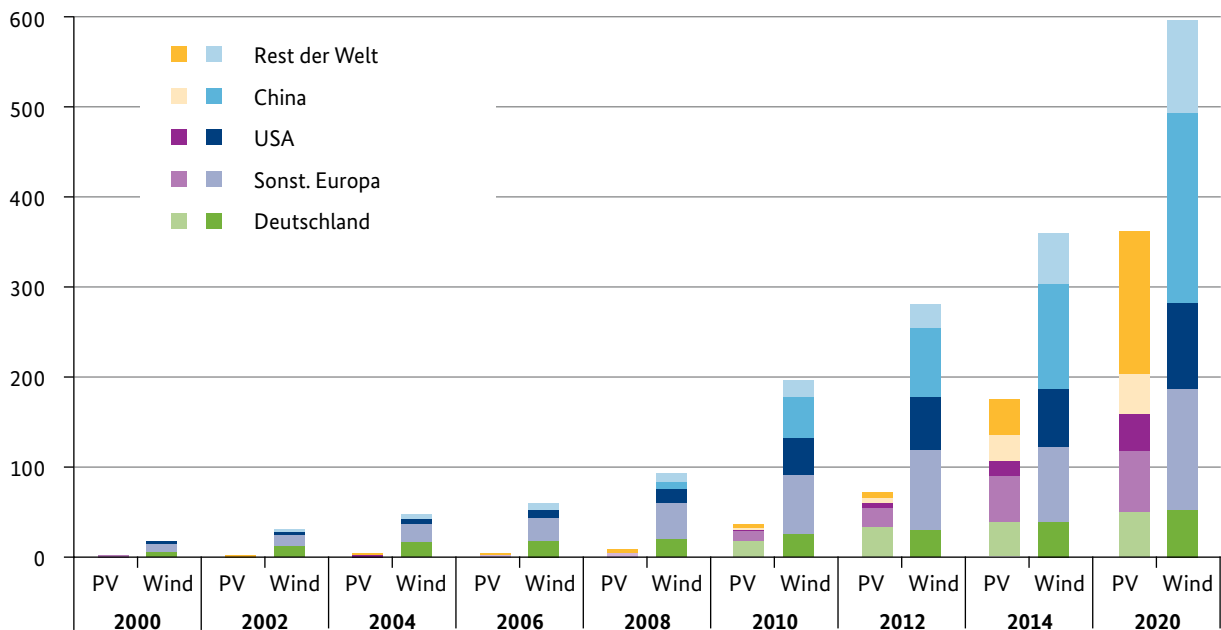
Die **weltweite Gesamtkapazität** im Jahr 2014 betrug 361 GW für Onshore-Windkraft und 175 GW für Photovoltaik. Somit hat sich die globale installierte Kapazität von Windkraft in den letzten 10 Jahren versechsfacht und die von Photovoltaik hat sich um den Faktor 40 erhöht.

In Bezug auf die globale Marktentwicklung zeigt sich, dass Deutschland in den Jahren 2005 und 2010 bei der installierten Photovoltaik-Leistung einen Weltanteil von 46,5 bzw. 49,4 Prozent aufwies, bei der Windkraft ging der Anteil im gleichen Zeitraum von 31 Prozent auf etwa 14 Prozent zurück. Bereits vor 2015 wurde Deutschland in seiner führenden Stellung beim Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung vermehrt von anderen Ländern, insbesondere den USA und China, abgelöst (vgl. Abbildung 4).

Im Rahmen von GRETCHEN wurde der weltweite **Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien bis 2020** geschätzt. Dazu wurden Lernkurven für die Kostenentwicklung herangezogen (vgl. Kapitel 2.2) und länderspezifische Investitionskosten für die Bestimmung des Zubaus von Photovoltaik und Windkraft genutzt [20]. Der globale Kapazitätsausbau wird sich bis 2020 nicht abschwächen, allerdings unterscheiden sich die erwarteten Ausbaupfade einzelner Länder und Regionen. Insbesondere China verfolgt einen massiven Ausbau an Windkraft [22], wohingegen das deutliche globale Wachstum der Photovoltaik, die gegenüber der Windkraft enorm aufholt, breit über viele Länder streut [19].

Der weltweite Ausbau von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien bietet für deutsche Hersteller gute **Exportmöglichkeiten**. Laut GRETCHEN-Befragung (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014) exportierten im Jahr 2013 annähernd 90 Prozent der in Deutschland ansässigen Hersteller ihre Produkte ins Ausland. Allerdings variiert der Exportanteil, der im Durchschnitt bei knapp 40 Prozent lag, zwischen den einzelnen Technologien, wobei Photovoltaik und Onshore-Windkraft mit 41 bzw. 47 Prozent nahe beieinander liegen [12]. Die große Mehrheit der Unternehmen gab dabei die EU und den EFTA-Raum als ihren zentralen Exportmarkt an. Zusätzlich ist

**Abbildung 4:** Globale installierte Windkraft- und Photovoltaik-Leistung nach Ländern – historische Entwicklung und Projektion bis 2020 (in GW) [19, 20, 21]

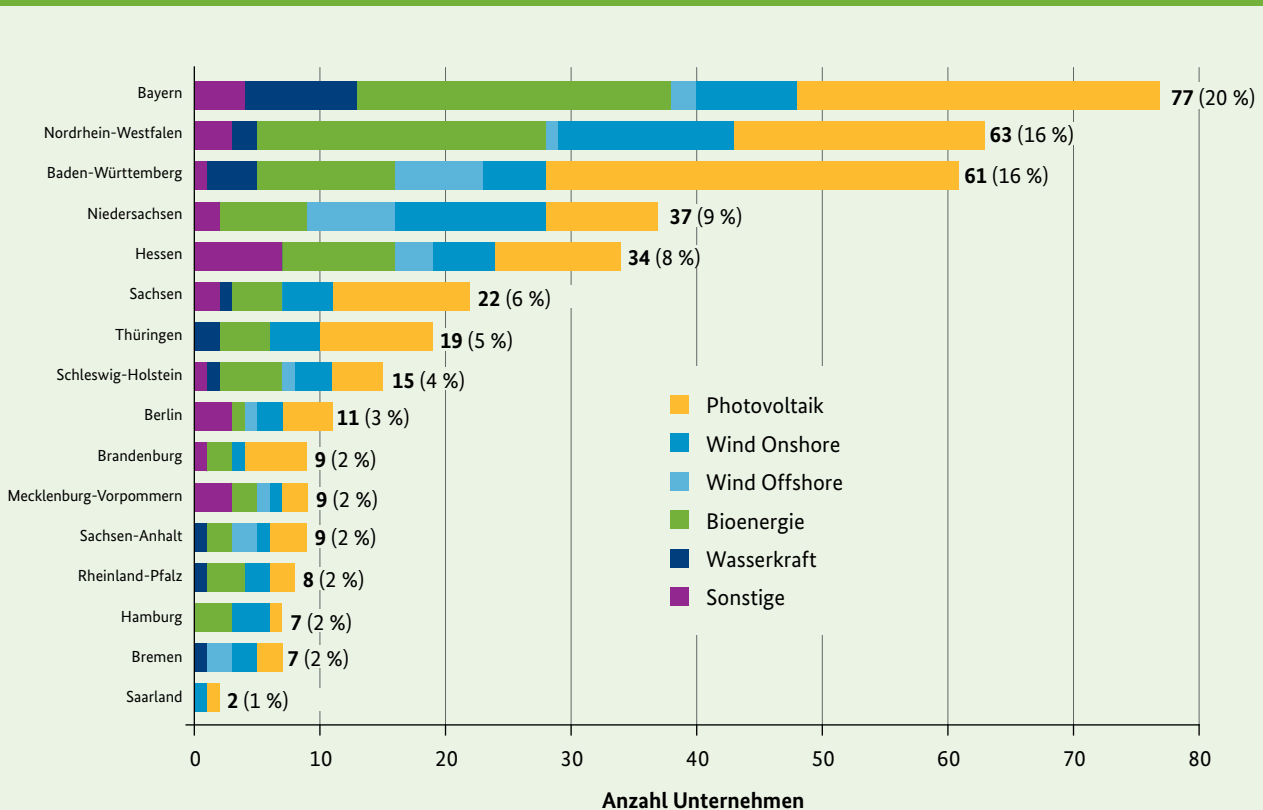


**Box 2** **GRETCHEN-Befragung 2014**

Im Rahmen des GRETCHEN-Projektes wurde eine telefonische Unternehmensbefragung zu den Innovationsaktivitäten von Herstellern und Zulieferern von Anlagen und Komponenten für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien in Deutschland durchgeführt. Ziel der im Sommer 2014 durchgeführten Befragung war es, die Wirkungen der politischen Rahmenbedingungen für Innovationsaktivitäten der in Deutschland tätigen Hersteller zu verstehen. Hierfür wurde ein Fragebogen entwickelt, der auf der Europaweiten Innovationserhebung – dem Community Innovation Survey – aufbaut und diesen um einen Fragenblock zum Policy Mix erweitert. Mit der Durchführung der Telefonbefragung wurde das SOKO Institut für Sozialforschung und Kommunikation in Bielefeld beauftragt.

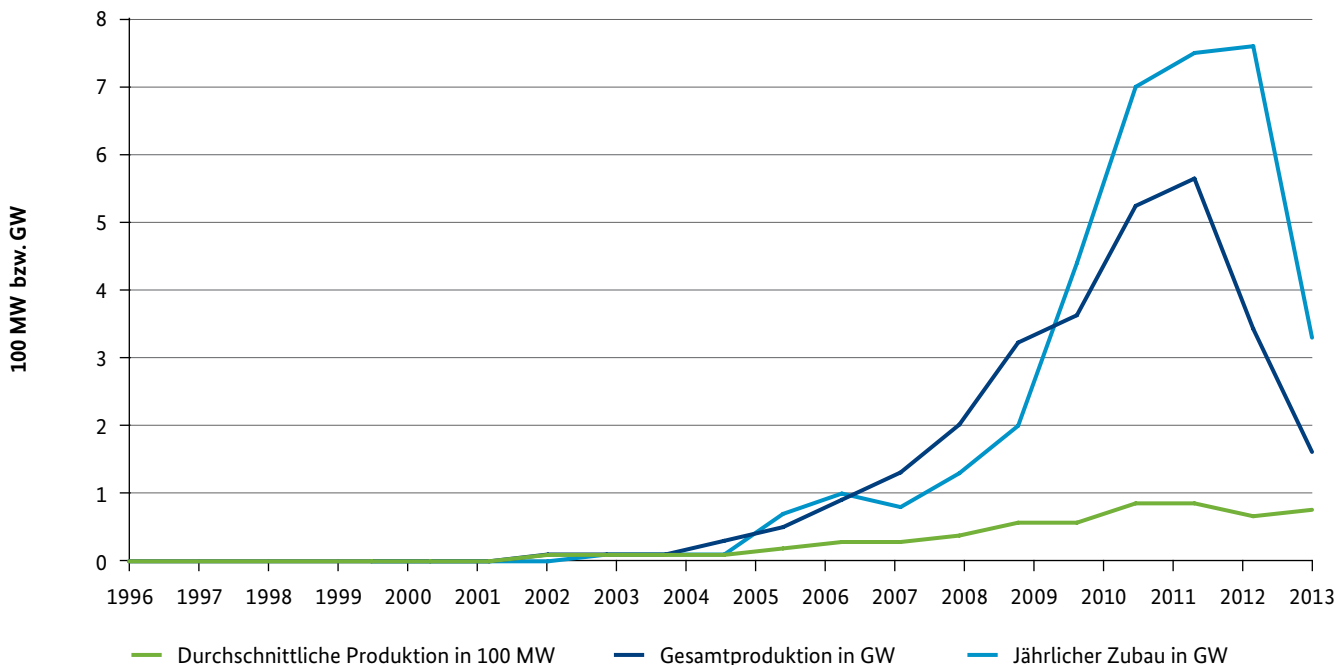
Insgesamt haben 390 Hersteller an der im Durchschnitt 30-minütigen Innovationsbefragung teilgenommen, was einem guten Drittel der in Deutschland ansässigen Hersteller entspricht. Dabei handelte es sich vor allem um kleine und mittelständische Unternehmen (bis zu 50 Mio. € Umsatz und bis zu 249 Mitarbeitern). Zwei Drittel der Unternehmen konzentrieren sich auf eine erneuerbare Stromerzeugungstechnologie, wohingegen das restliche Drittel mindestens für zwei (17 Prozent) oder mehr als zwei Technologien (16 Prozent) Produkte herstellte. Dabei ist etwa die Hälfte der Hersteller im Bereich Photovoltaik (46 Prozent) aktiv, gefolgt von Biogas (30 Prozent), Onshore-Windkraft (26 Prozent), Offshore-Windkraft (20 Prozent) und Wasserkraft (16 Prozent). Andere Technologien (solarthermische Kraftwerke, Biomasseanlagen, Meeresenergietechnologien, Geothermie und andere) spielen mit einem Anteil von insgesamt ca. 25 Prozent eine eher untergeordnete Rolle. Wie die Abbildung zeigt, sind im Jahr 2014 laut GRETCHEN-Befragung mehr als die Hälfte der Unternehmen in den drei Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen ansässig, die vier Bundesländer Niedersachsen, Hessen, Sachsen und Thüringen beheimaten weitere 30 Prozent der Unternehmen.

Teilnehmer der GRETCHEN-Befragung nach Bundesland und Haupttechnologie [12]



Es zeigt sich, dass über 80 Prozent der Hersteller in den Jahren 2011–2013 Innovationsaktivitäten durchgeführt haben, wobei hierbei der Schwerpunkt eindeutig auf unternehmensinternen F&E-Aktivitäten lag [12].

**Abbildung 5:** Entwicklung der durchschnittlichen und gesamten Produktion der PV-Modul- und Zellhersteller sowie jährlich installierte Kapazität in Deutschland (1996–2013) [3]



jeweils ein Drittel der Unternehmen in China sowie Indien und in den USA aktiv. Die Hälfte der Unternehmen erschließen darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Länder als Absatzmarkt für ihre Produkte, was sich im Lichte der 2020-Projektion (vgl. Abbildung 4) als strategischer Vorteil herausstellen könnte.

Die Entwicklung der **Industriestruktur der in Deutschland ansässigen Hersteller** erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien soll exemplarisch für die Photovoltaik aufgezeigt werden [3]. Mit zunehmendem Ausbau der Photovoltaik in den 1990er Jahren stiegen zunächst wenige Unternehmen in den Markt ein. Ab 2001 nahm die Anzahl der Hersteller stark zu, wobei seit 2012 eine deutliche Konsolidierung zu beobachten ist. Die jährliche Produktion von Modulen und Zellen erweiterte sich im Zeitverlauf deutlich und erreichte 2010 ihren Höhepunkt. Damit einher ging auch ein Anstieg der Durchschnittsproduktion, wobei die Unternehmen sich hinsichtlich ihrer Größe sehr heterogen entwickelt haben. Abbildung 5 veranschaulicht die Entwicklung von Produktion und Ausbau in Deutschland. Während bis 2008 die Produktion den Ausbau überstieg, konnte die heimische Produktion die Nachfrage in den Folgejahren nicht mehr komplett bedienen. Zwar stieg die deutsche Produktion in den folgenden drei Jahren weiter an, aber ab 2005 traten verstärkt chinesische Hersteller auf den globalen Markt und weiteten ihre Produktion

bis 2011 auf 20 GW aus. Die Senkung der Einspeisevergütungen in Deutschland und die entsprechend rückläufige Nachfrage in Kombination mit der Konkurrenz aus China führte nach 2011 zu einem radikalen Einbruch der Produktion sowohl in Deutschland als auch in China [22]. Die Entwicklung der Durchschnittsproduktion in den letzten Jahren zeigt, dass sowohl kleine als auch große Hersteller von dieser negativen Marktentwicklung betroffen sind.





## 2.2 Innovation und technologischer Wandel

Die Transformation des Energiesystems hin zu einer nachhaltigen, CO<sub>2</sub>-neutralen Stromproduktion erfordert die Entwicklung neuer und die Weiterentwicklung bestehender Technologien. Der daraus entstehende technologische Wandel lässt sich über verschiedene **Indikatoren entlang des Innovationsprozesses** abbilden. Dieser Prozess beginnt bei der Grundlagen- und angewandten Forschung, kodifiziert in wissenschaftlichen Publikationen und führt zu Inventionen, welche oftmals über Patente geschützt werden. Am Ende des Innovationsprozesses stehen konkrete Produkt- und Prozessinnovationen bei den Herstellern. Diese können insbesondere auch indirekt über Effizienzsteigerungen in der Herstellung über Lernkurveneffekte gemessen werden. In allen Phasen des Innovationsprozesses spielen Kooperationen eine entscheidende Rolle, was sich in Koautorenschaften bzw. Ko-Patenten sowie gemeinsamen Forschungsvorhaben niederschlägt (siehe Methodikbox 3 Forschungs- und Innovationsnetzwerke). Ein Ansteigen all dieser Indikatoren über die Zeit hinweg dokumentiert eine Zunahme solcher Aktivitäten, die zur Transformation des Energiesystems entscheidend beitragen.

**Wissenschaftliche Publikationen** bilden das Ergebnis insbesondere der akademischen Grundlagen- sowie auch der Angewandten Forschung ab. Diesbezüglich zeigt sich

in der Photovoltaikforschung Deutschlands eine deutliche Zunahme der Publikationen (vgl. Abbildung 6). Im internationalen Vergleich ist Deutschland bei der Photovoltaikforschung seit jeher unter den fünf publikationsstärksten Nationen, wobei einige asiatische Länder in den letzten Jahren deutlich aufgeholt haben und mittlerweile in der Weltspitze angekommen sind. Auf europäischer Ebene ist Deutschland bisher führend.

Die **Kooperationstätigkeit der forschenden Akteure** in Deutschland nimmt im Zeitverlauf ebenfalls stark zu. Exemplarisch zeigt Abbildung 7 die publizierenden Akteure in Deutschland für die Jahre 1999–2001 und 2004–2006. Die Größe eines Kreises (Akteur aus Deutschland) oder Quadrates (Akteur aus dem Ausland) gibt die Anzahl der Kooperationen dieses Akteurs an. Es ist erkennbar, dass in diesem kurzen Zeitraum die Anzahl der Akteure und Kooperationen stark angestiegen ist. Insbesondere Universitäten und Forschungseinrichtungen sind sehr gut national wie international eingebettet, dabei sind vor allem Universitäten im Ausland häufig neue Kooperationspartner. Diese internationalen Kooperationen führen zu einer Einbettung in die internationale Forschungslandschaft und ermöglichen den Zugang zu Wissen. Im Vergleich zu anderen Ländern ist die deutsche Photovoltaikforschung international sehr gut eingebettet [5].

### Box 3 Forschungs- und Innovationsnetzwerke

Wissenstransfer und gemeinsame Forschung spielen bei der Innovationstätigkeit eine wichtige Rolle. Es ist vielfach nachgewiesen, dass Kooperationstätigkeit zu einem höheren und qualitativ besseren Innovationsergebnis führt. Funktionierende Innovationssysteme basieren geradezu auf diesem Effekt. Es gibt verschiedene Arten von Kooperationsbeziehungen, die systemisch als Netzwerk dargestellt werden können. Im Rahmen von GRETCHEN wurden drei verschiedene Kooperationsnetzwerke untersucht:

- ▶ **Publikationsnetzwerke**, in denen die Beziehung der Autoren von wissenschaftlichen Publikationen zueinander abgebildet werden. Dabei kann man verschiedene Aggregationsebenen betrachten. Im Rahmen von GRETCHEN werden Beziehungen zwischen den Einrichtungen, in denen die Autoren arbeiten, abgebildet sowie der Länder, in denen die Autoren ansässig sind. Diese Dimensionen liefern Aufschluss über den Wissensaustausch zwischen Forschungseinrichtungen und über Landesgrenzen hinweg [5].
- ▶ **Patentnetzwerke**, in denen die Erfinder über gemeinsam entwickelte Patente miteinander verbunden sind. Hierdurch kann Wissensaustausch zwischen den Erfindern dargestellt werden [4].
- ▶ **Forschungsnetzwerke**, in denen Akteure über gemeinsam geförderte Projekte (sog. Verbundforschung) miteinander verbunden sind. Diese Forschungsnetzwerke liefern einen Einblick in die kooperative Forschungslandschaft in Deutschland und geben Hinweise zur Funktionalität des Innovationssystems [6].

Abbildung 6: Anzahl wissenschaftlicher Publikationen ausgewählter Länder zur Photovoltaik [5]

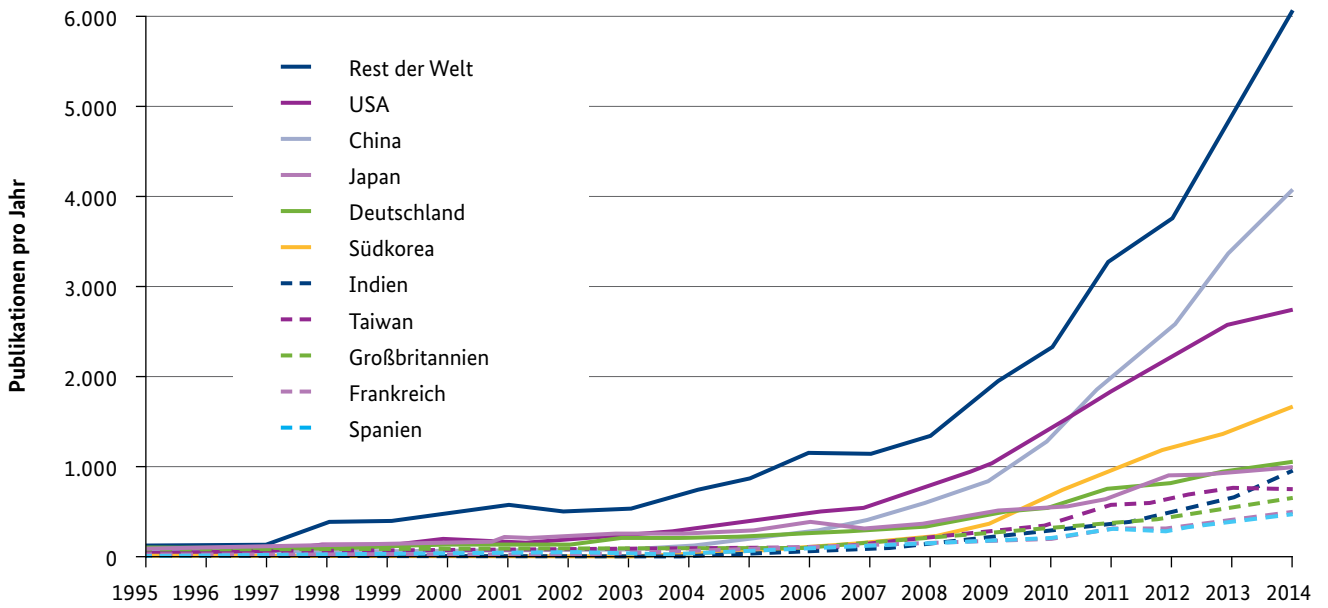
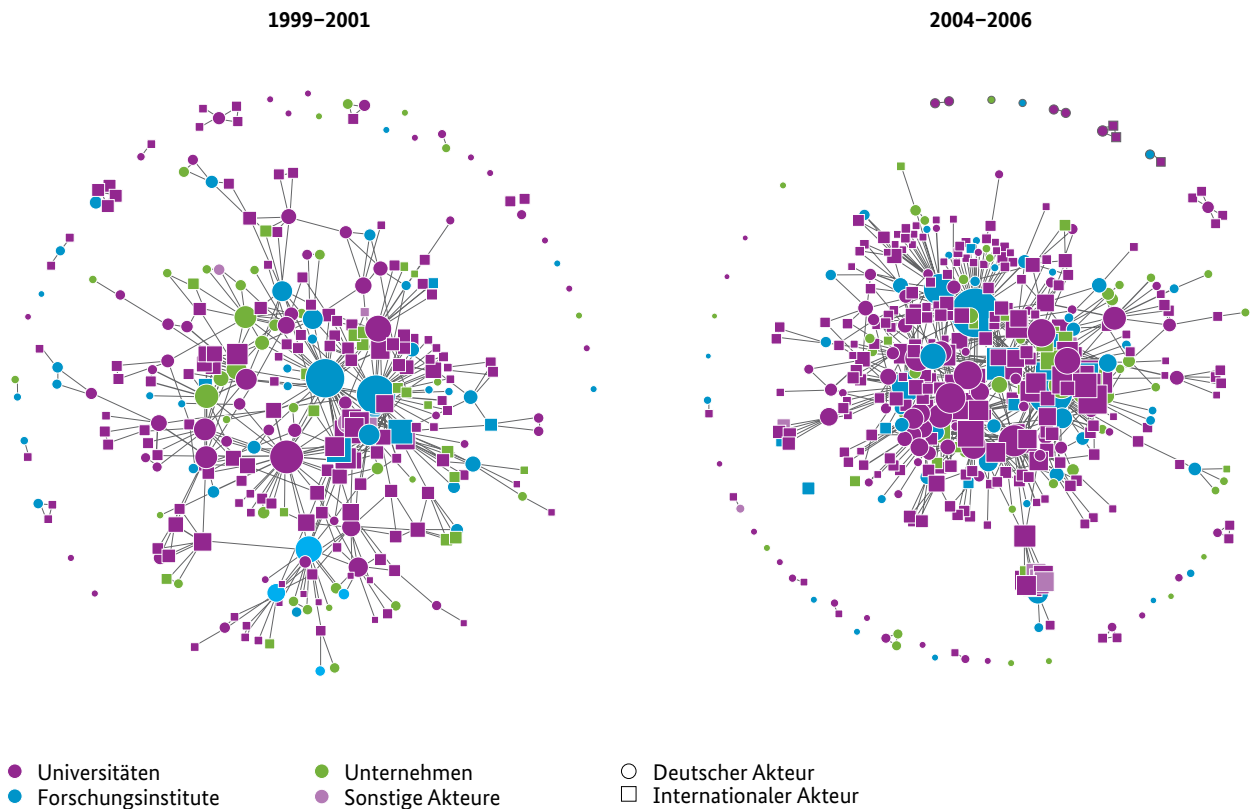


Abbildung 7: Photovoltaik Publikationsnetzwerke [5, 7]



- Universitäten
- Forschungsinstitute
- Unternehmen
- Sonstige Akteure
- Deutscher Akteur
- Internationaler Akteur

## Box 4 Patente

Patentanmeldungen sind ein nicht perfekter, aber – aufgrund der einheitlichen Dokumentation über lange Zeiträume – häufig genutzter Indikator. Den technologischen Wandel vermögen Patente nur teilweise abzubilden; da Patentanmeldungen mit Kosten verbunden sind patentieren Anmelder daher nur, wenn die betreffende Erfindung einen gewissen ökonomischen Wert zu haben scheint.

Bei den in Abbildung 8 dargestellten Patentdaten handelt es sich um sog. Patent Cooperation Treaty (PCT) Patente, also Patente, die bei der Weltorganisation für geistiges Eigentum (WIPO) zur Prüfung eingereicht wurden. Die PCT-Anmeldungen eignen sich besonders gut für internationale Vergleiche, da es kaum Verzerrungen hin zu nationalen Patentämtern gibt. Allerdings erfassen sie nicht alle Patente eines Landes, da nur ein Teil der Patentanmeldungen bei der WIPO eingereicht wird. Die Patentdaten für Windkraft und Photovoltaik sind auf Grundlage des WIPO Green Inventory abgefragt worden.

Im Rahmen des GRETCHEN-Projektes wurden für verschiedene Zwecke unterschiedliche Abfragemethoden entwickelt und die Daten für die jeweiligen Forschungsfragen entsprechend aufbereitet. Insgesamt führen die unterschiedlichen Abfragen zu sehr ähnlichen Patentverläufen; sie unterscheiden sich aber bezüglich des jeweiligen Umfangs an Patenten [1, 3, 4, 6].

Gegenüber wissenschaftlichen Publikationen dokumentieren **Patente** Forschungsergebnisse mit stärkerer Anwendungsnähe (siehe Methodikbox 4 Patente). Die Anzahl der von deutschen Erfindern weltweit angemeldeten Patente für Windkraft sowie Photovoltaik war bis Mitte der 1990er Jahre relativ gering, nahm aber danach – sogar stärker als der generelle Patenttrend in Deutschland – stetig zu [4]. Allerdings ist zu beachten, dass Patente nicht das gesamte Spektrum der Wissensgenerierung fassen. So schützten im Zeitraum 2011–2013 laut GRETCHEN-Befragung die in Deutschland ansässigen Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien in etwa die Hälfte ihrer Erfindungen bei Photovoltaik und Windkraft durch Patente [12].

Im internationalen Vergleich (vgl. Abbildung 8) lag Deutschland bei der Anzahl von Windkraftpatenten lange hinter den USA auf Platz zwei, konnte diese aber in den letzten Jahren überholen. Interessant ist hier auch die starke Zunahme von Patentanmeldungen aus dem asiatischen Raum, insbesondere aus Japan, China und Südkorea. Bei der Anzahl der Photovoltaikpatente lag Deutschland lange Zeit auf Platz drei, deutlich hinter den USA und Japan, und wird in den letzten Jahren zudem von Südkorea übertroffen.

Eine genauere Betrachtung aller deutschen patentierenden Akteure in der Photovoltaik zeigt, dass ein Großteil von Unternehmen und Einzelpersonen angemeldet wird. Der Anteil von Forschungseinrichtungen und

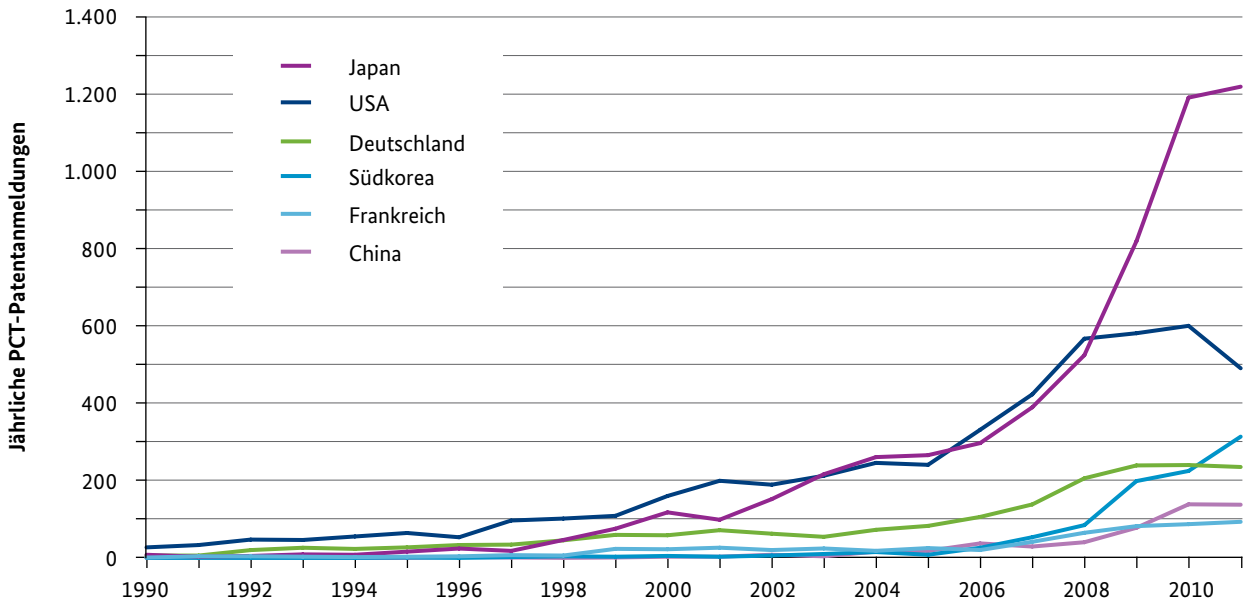
Universitäten fällt im Zeitverlauf von 15 Prozent auf etwa 10 Prozent. Eine differenzierte Betrachtung der deutschen Patentanmeldungen in der Photovoltaik für Modul- und Zellhersteller zeigt für diese ab 2007 einen deutlich stärkeren Zuwachs gegenüber den restlichen Anmeldern [3].

Wie bei den Publikationen zeigt auch die Analyse der **Patentkooperationen** für Windkraft und Photovoltaik eine im Zeitablauf steigende Kooperationsaktivität. Dabei ist die Zusammenarbeit zwischen deutschen Erfindern in der Photovoltaik deutlich stärker ausgeprägt als in der Windkraft. Des Weiteren bildet sich über die Zeit für beide Technologien ein Netzwerkkern heraus, in dem viele Akteure miteinander interagieren, was ein Indiz für ausgeprägten Wissensaustausch ist [4].

Technologischer Wandel lässt sich direkt durch **Produkt- und Prozessinnovationen** erfassen. Laut GRETCHEN-Befragung haben drei Viertel der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien in den Jahren 2011–2013 Produktinnovationen eingeführt und zwei Drittel Prozessinnovationen. Wie Abbildung 9 zeigt, wurden dabei überdurchschnittlich viele Produktinnovationen in Onshore-Windkraft, Bioenergie und Photovoltaik eingeführt, wohingegen sich beim Anteil der Prozessinnovationen keine größeren Unterschiede zwischen den Technologien zeigen. Um diese Innovationen zu ermöglichen, wurden private Innovationsausgaben getätigt, für die sich allerdings im Zeitraum 2013–2015 ein negativer Trend abzeichnet [12].

**Abbildung 8: Internationale Patentanmeldungen für Photovoltaik und Windkraft**  
 [Zusammenstellung aus der OECD Regpat 2015 Datenbank]

### Photovoltaik



### Windkraft

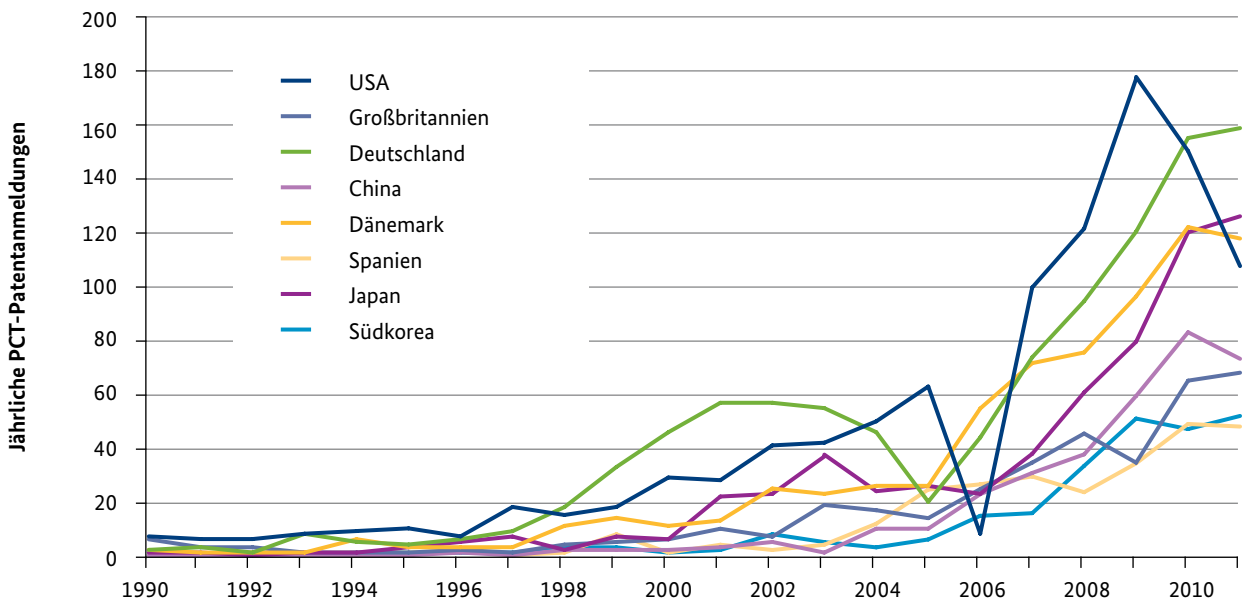
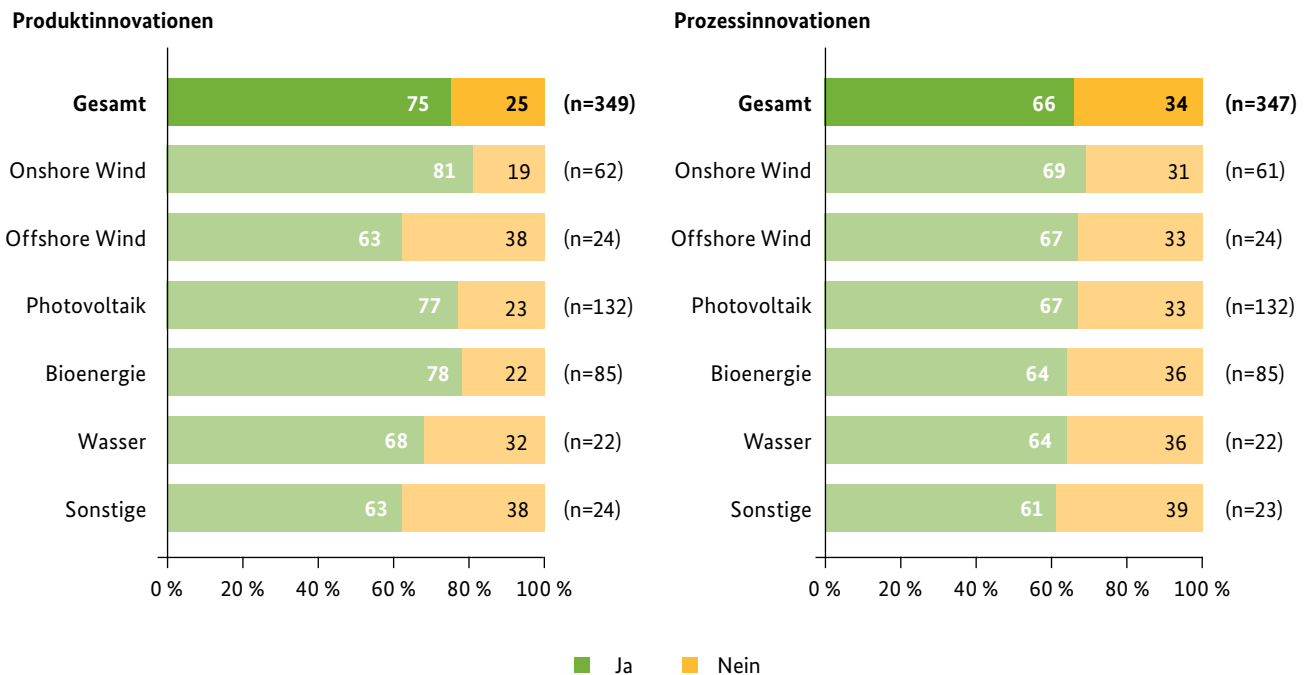


Abbildung 9: Technologiespezifische Produkt- und Prozessinnovationen [12]

Hat ihr Unternehmen in den letzten drei Jahren (2011 bis 2013) neue oder merklich verbesserte Produkte/ Prozesse in der EE-Sparte eingeführt?



Die Unternehmen sind bei ihren Innovationsaktivitäten nicht losgelöst von ihrem Umfeld, sondern gehen **Forschungsk Kooperationen** mit andern Unternehmen oder Forschungseinrichtungen ein. So gab etwa die Hälfte der befragten Unternehmen an, im Zeitraum 2011–13 in Forschungsk Kooperationen involviert gewesen zu sein. Eine historische Betrachtung solcher Kooperationen lässt sich durch gemeinsame Forschungsprojekte, die von öffentlicher Hand gefördert wurden, abbilden und gibt Aufschluss über das Innovationssystem, in dem die Unternehmen agieren. In diesem nehmen Universitäten und Forschungseinrichtungen eine zentrale Position ein und unterhalten zahlreiche Kooperationen mit Unternehmen. In den

letzten zehn Jahren entfallen 70 Prozent der Förderung auf Forschungskonsortia mit mindestens einem Unternehmen. Hier zeigt sich, dass den Unternehmen komplementär öffentliche Akteure zur Seite stehen, die die Forschung und Entwicklung in der Privatwirtschaft unterstützen [6].

Die Kostenentwicklung der Technologien lässt sich anhand von sog. **Lernkurven** quantitativ fassen (siehe Methodikbox 5 Lernkurven). Für den Zeitraum von 1990 bis 2011 wurden für Windkraftturbinen Lernraten (learning-by-doing) für die Entwicklung der Technologiekosten von ca. 4 Prozent und für Photovoltaikmodule von ca. 17 Prozent, unter eher konservativen Annahmen, basierend auf den Daten in

**Box 5 Lernkurven**

Betrachtet man die technologische Weiterentwicklung anhand der Kosten für eine Energieeinheit, also etwa € pro Megawatt, können über den Zeitverlauf sog. Lernkurven bestimmt werden. Diese verdeutlichen die Kostendegression, welche durch verschiedene Faktoren, etwa Skaleneffekte, erhöhten Wettbewerb oder verbesserte Produktionsverfahren, erreicht werden können. Am häufigsten werden ein- oder zwei-Faktoren Lernkurven verwendet, die die Kostenentwicklung der Technologien im Verhältnis zum globalen Ausbau (learning-by-doing) und zu Forschungsbestrebungen (learning-by-researching) aufzeigen. Bei den ein-Faktor Lernkurven wird angenommen, dass mit jeder Verdoppelung des Ausbaus die Kosten der Technologie um x Prozent zurückgehen, wobei x als Lernrate bezeichnet wird.



Abbildung 10: Technologiekosten und weltweit installierte Leistung von Windturbinen und Solarmodulen (1990 – 2014) [20]

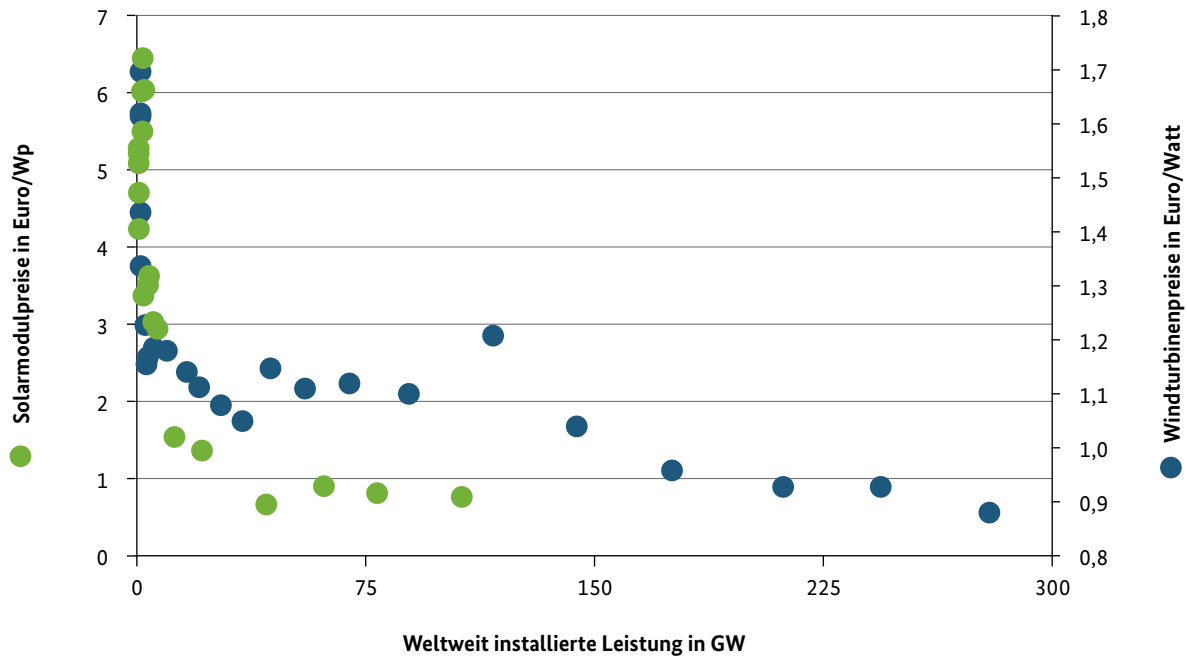


Abbildung 10 geschätzt [20]. Dabei ist zu beachten, dass für Photovoltaik die sich aufbauende globale Überkapazität der Produktionsanlagen mit ihrem Höhepunkt in 2011/12 einen maßgeblichen Kostendämpfer darstellt. Trotz der bereits erheblichen Kostenreduktionen sehen die Hersteller von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien laut GRETCHEN-Befragung noch deutliche Innovationspotentiale (u. a. bei Geothermie, Gezeitenkraftwerken, Photovoltaik und Offshore-Windkraft), sodass von einem weiteren Absinken der zukünftigen Stromgestehungskosten ausgegangen werden kann.

### 2.3 Struktureller Wandel und gesamtwirtschaftliche Effekte

Als Folge der Markt- und Technologieentwicklung und des daraus resultierenden Ausbaus der erneuerbaren Energien verändern sich der Mix der Stromerzeugung und die

dahinter stehenden ökonomischen **Strukturen**. Es kommt zu einer Verschiebung von konventionellen Großkraftwerken hin zu kleineren, dezentralen Anlagen. Die Herstellung dieser Anlagen steigt, wobei gerade deutsche Hersteller vielfach auch Vorprodukte und Komponenten über die gesamte Wertschöpfungskette liefern. Dazu zeigt die GRETCHEN-Befragung, dass gut 70 Prozent der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien Komponenten produzieren, wohingegen nur ein knappes Drittel der Unternehmen auch Endprodukte herstellen.

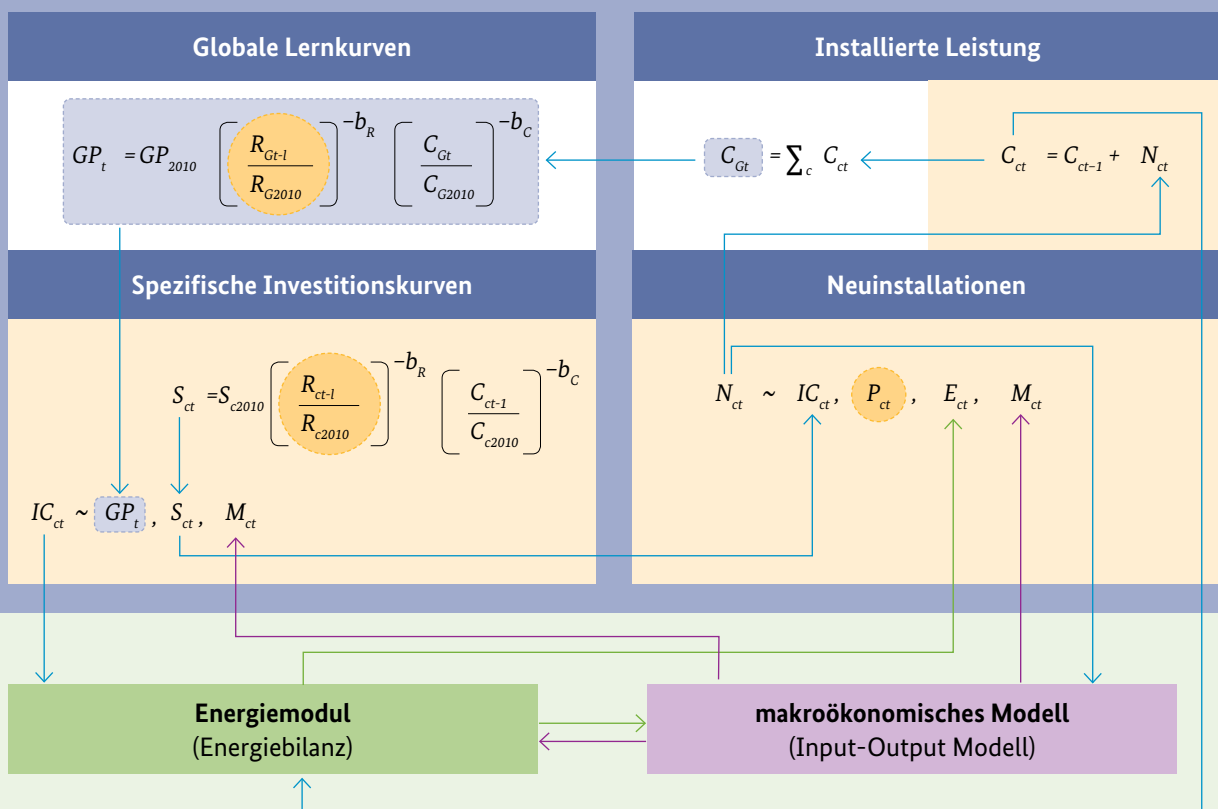
Die **gesamtwirtschaftlichen Effekte** und Indikatoren – wie beispielsweise Beschäftigung, Bruttoinlandsprodukt (BIP), Investitionen und CO<sub>2</sub>-Emissionen – des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung werden in Modellanalysen ermittelt. Der Vergleich von Alternativszenarien mit verschiedenen Impulsen (inländischer Ausbau einheitlich, mit Varianten zur Exportentwicklung, vgl. Abbildung 11) mit einer Referenzentwicklung (kontrafaktisches Szenario ohne Ausbau) im gesamtwirtschaftlichen Modellrahmen zeigt dann die Effekte des Ausbaus inklusive verschiedener Zweitrunden- und Rückkopplungseffekte [7, 18].

**Box 6 Endogenisierung des technologischen Wandels im Modell GINFORS\_E**

Die im Rahmen von GRETCHEN entwickelte Modellierung auf der Makroebene gemäß der unten stehenden Abbildung im RPGM-Modul des Modells GINFORS\_E verdeutlicht den komplexen Steuerungsmechanismus, vor dessen Hintergrund nationale Energiepolitik verlässliche Rahmenbedingungen für Investoren schaffen muss. Der Policy Mix in anderen (wichtigen) Ländern beeinflusst die Entwicklung der globalen Lernkurven über die Neuinstallationen. Damit verändern sich auch die global installierten Leistungen, was wiederum die Investitionskosten in allen Ländern beeinflusst. Dieser komplexe, weltweite Prozess trifft in den einzelnen Ländern auf unterschiedliche Strukturen, Politikinstrumente und Rückkopplungsschleifen. Im Rahmen von GRETCHEN ist der Modellierungsansatz im Modell GINFORS-E deutlich erweitert worden [20]. Die Rückkopplung in das makroökonomische Input-Output-Modell erfolgt für die Länder, in denen Windkraft- und Photovoltaik-Technologien hergestellt werden, über eine Anpassung der Vorleistungsstrukturen [18]. Das betrifft insbesondere den Einsatz von Produkten des Maschinenbaus und der Elektrotechnik. In Ländern, die erneuerbare Stromerzeugung nutzen, ändert sich der Strommix weg von fossilen Energieträgern.

In der makro-ökonomischen Modellierung finden sich verschiedene Aspekte des Policy Mixes wieder: betrachtete Dimensionen sind Innovations-, Energie- und Klimapolitik, sowohl in Deutschland als auch auf EU-Ebene, die OECD-Länder und ihre großen Handelspartner, verschiedene Technologien (Photovoltaik und Windkraft) und damit verschiedene Industrien [21] und durch die Nutzung von Input-Output-Modellen wird indirekt die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet [18].

Endogenisierung des technologischen Wandels im Modell GINFORS\_E [20]



- C: Installierte Leistung
- N: Neuinstallationen
- GP: Weltmarktpreis (Windräder/ PV Module)
- S: Systemkosten
- IC: Spezifische Investitionskosten
- R: Öffentliche F&E Ausgaben (Global, länderspezifisch)
- P: Politikvariablen (z.B. Einspeisevergütung, EEG-Dummy, ...)
- M: Variablen des makroökonomischen Modells
- E: Variablen des Energiemodells, z.B. Strompreis
- c: Länderindex
- G: Globale Variablen
- t: Zeitindex
- Legend:
  - Länderspezifisch
  - globale Variablen
  - möglicher Politikeinfluss

Die Szenarienanalysen zeigen, dass sich bei einer rein **nationalen Perspektive** die gesamtwirtschaftlichen Effekte des Ausbaus kurzfristig vor allem durch zusätzliche Investitionen ergeben. Längerfristig ergeben sich Preiseffekte durch die wachsende EEG-Umlage, von der aber besonders stromintensive Unternehmen befreit sind. Mit den unterschiedlichen Investitionsmöglichkeiten und Preiseffekten sind verschiedene Verteilungseffekte verbunden. Weitere Effekte ergeben sich dauerhaft durch Betrieb und Wartung der Anlagen. Insgesamt folgt [7]:

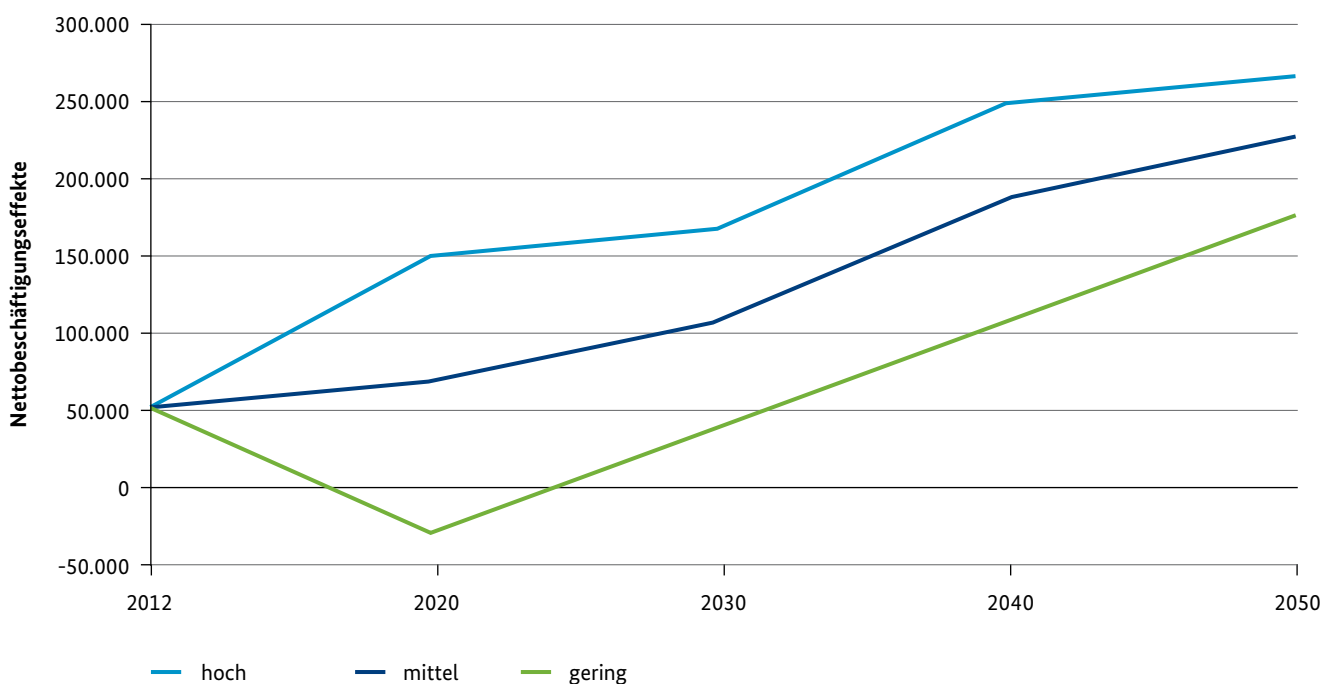
- ▶ Wegen des starken Photovoltaik-Ausbaus in den Jahren 2009 bis 2012 zeigt sich für diese Jahre ein positiver Nachfrageeffekt. Die Gesamtinvestitionen liegen dadurch über 15 Mrd. € jährlich höher als ohne den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Auch die BIP- (über 10 Mrd. €) und Beschäftigungswirkungen (50.000 bis gut 100.000 zusätzliche Beschäftigte) des Ausbaus der erneuerbaren Energien fallen in diesem Zeitraum positiv aus.
- ▶ In den Folgejahren ab 2014 führt dann die steigende EEG-Umlage zu einem negativen Kosteneffekt, der bei rein nationaler Betrachtung auch leicht negative Effekte bei BIP und Beschäftigung hervorruft. Die Belastung der konventionellen Stromwirtschaft durch den Ausbau lässt sich an den derzeit sehr schlechten Geschäftszahlen und schwierigen Zukunftsaussichten der großen Betreiber gut ablesen.

- ▶ Die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion eines beschleunigten Ausbaupfads liegt selbst im günstigsten Fall bis zum Jahr 2030 bei unter 2 Prozent der Gesamtemissionen, bis 2020 ist sie sehr gering [21].

Das Bild verschiebt sich, wenn die **internationale Dimension** des Ausbaus einbezogen wird, was daran liegt, dass deutsche Hersteller auf den Märkten für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien gut aufgestellt sind (vgl. auch Abbildung 11):

- ▶ Wenn berücksichtigt wird, dass die aktuellen und zukünftigen Exporte Folge des deutschen Policy Mixes sind, fallen die gesamtwirtschaftlichen Effekte auch mittelfristig in den meisten Fällen positiv aus und erreichen langfristig Größenordnungen von deutlich über 100.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen.
- ▶ Nur bei sehr pessimistischen Annahmen zum internationalen Ausbau und den Marktanteilen deutscher Hersteller ergeben sich mittelfristig (2020) negative BIP- und Beschäftigungseffekte. In der folgenden Abbildung zeigt dies das Szenario „geringer“ internationaler Ausbau, das für die Zukunft gegenüber dem aktuellen Stand deutliche Rückgänge der deutschen Exporte erneuerbarer Energietechnologien annimmt. Wahrscheinlich ist dieses „geringe“ Szenario nicht, da bei ihm deutsche Hersteller auf dem schnell wachsenden internationalen Markt absolute Ausfuhrückgänge hinnehmen müssten.

**Abbildung 11:** Nettobeschäftigungseffekte des Ausbaus erneuerbarer Energien bei unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der deutschen Anlagenexporte [7]



Global betrachtet wurde die Kostenentwicklung, insbesondere bei Photovoltaik, stark durch den deutschen Ausbau (vgl. Abbildung 4), aber auch durch die deutsche Förderung der Technologien getrieben. Die sinkenden Kosten der Technologien haben einen direkten Einfluss auf den vermehrten globalen Ausbau (siehe Methodikbox 6 Endogenisierung des technologischen Wandels im Modell GINFORS\_E), der dann zu weiteren Kostensenkungen führt (siehe Methodikbox 5 Lernkurven). Der deutsche Policy Mix für erneuerbare Energien hat somit einen, wenn vielleicht auch nur geringfügigen, indirekten Einfluss auf den Ausbau von Anlagen in anderen Ländern [19]. Er trägt dazu bei, die Elektrizitätsproduktion und damit den Strommix im Ausland zu dekarbonisieren. In den EU-Ländern werden die Emissionen zurückgehen, in den anderen OECD-Ländern trotz steigender Produktion konstant bleiben und auch in den BRICS-Ländern (Brasilien, Russland,

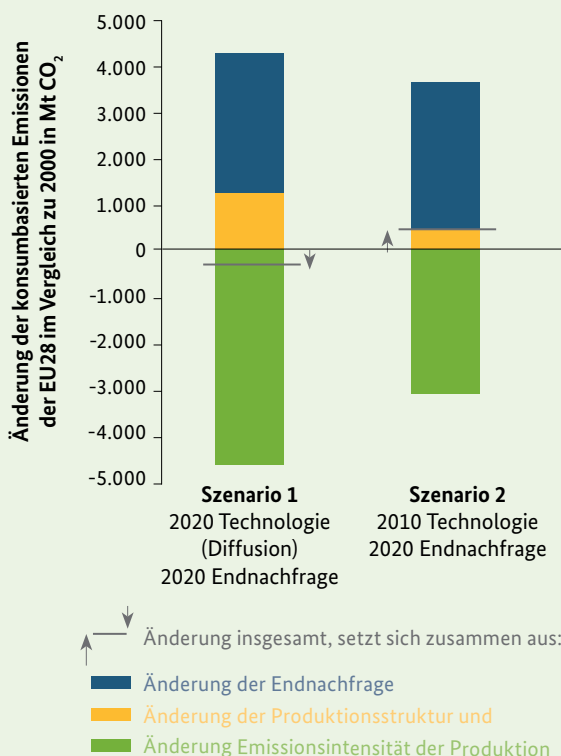
Indien, China, und Südafrika), die einen großen Anteil am globalen Wachstum von CO<sub>2</sub>-Emissionen haben, kommt es zu einer schwachen Abkopplung von Produktion und Emissionen: CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen dort nur halb so schnell wie die Produktion [18, 19].

Zusätzlich kann dieses Ergebnis möglicherweise einen Beitrag zu einer anderen Politikdiskussion liefern. Im Rahmen der internationalen Klimadebatte werden Politikmaßnahmen analysiert, die **konsumbasierte Emissionen** (siehe Methodikbox 7 Konsumbasierte Emissionen) beeinflussen können. Betrachtet man die globale Diffusion von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, kann man rückschließen, dass der Policy Mix in Deutschland dazu geführt hat, die konsumbasierten Emissionen im Inland zu senken [19].

### Box 7 Konsumbasierte Emissionen

Das Konzept der konsumbasierten Emissionen ordnet die Emissionen, die entlang globaler Produktionsketten entstehen, dem Endverbraucher bzw. dem Land des Endverbrauchers zu. Diese Art der Zurechnung der Emissionen ist komplementär zu dem bisher weitläufig genutzten Konzept des territorialen oder produktionsbasierten Accounting, bei dem die Emissionen dem Land zugeordnet werden, in dem sie entstehen. Unter Nutzung von multi-regionalen Input-Output-Systemen, die auf nationalen Input-Output-Tabellen und internationalen Handelsdaten basieren, können die konsumbasierten Emissionen aus den produktionsbasierten Emissionen abgeschätzt werden [19].

#### Einfluss der Diffusion von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien auf die konsumbasierten Emissionen der EU28 Länder [19]



Die Abbildung zeigt den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Änderung der konsumbasierten Emissionen der EU28 Länder insgesamt. Dazu wurde das Jahr 2000 als Basisjahr zum Vergleich mit zwei Szenarien ausgewählt. Szenario 1 schätzt die konsumbasierten Emissionen bei der erwarteten Endnachfrage für 2020 mit der für 2020 geschätzten Technologie (Produktionsstruktur und Emissionsintensität bei verstärkter Diffusion von Wind und Photovoltaik, siehe Methodikboxen 5 und 6). Szenario 2 basiert auf der Endnachfrage in 2020, wenn weiterhin die Technologie aus dem Jahr 2010 benutzt werden würde. Während bei Szenario 2 mit der Technologie von 2010 die Steigerung der Endnachfrage den stärkeren Effekt hat (und konsumbasierte Emissionen im Vergleich zu 2000 ansteigen), überwiegt der Effekt des Rückgangs der Emissionsintensität aufgrund der Diffusion von Wind und Photovoltaik bei Szenario 1, dem die für 2020 geschätzte Technologie zugrunde liegt, so dass ein Rückgang der konsumbasierten Emissionen zu erwarten ist.

## 3 Der Policy Mix für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien

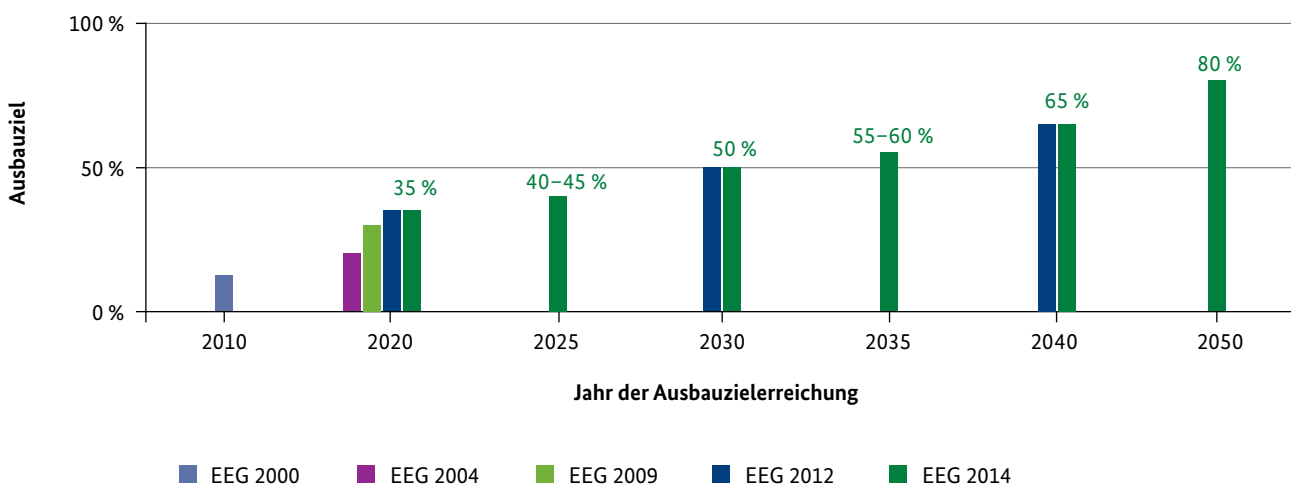
### 3.1 Ziele des Policy Mixes

Die ersten deutschen Forschungs- und Entwicklungsprogramme für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien entstanden in der Zeit der Ölkrise. Ab den 1990er Jahren wurde der Ausbau von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien zudem systematisch durch das Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG) gefördert, welches im Jahr 2000 vom Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) abgelöst wurde. Im Jahr 2010 hat die Bundesregierung mit dem Energiekonzept den langfristigen Umbau des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2050 beschlossen. Zentrale Ziele sind neben dem im Jahr 2011 festgelegten Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 die Minderung der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent bis 95 Prozent bis 2050 sowie die Reduktion des Energieverbrauchs um 50 Prozent gegenüber dem Jahr 2008. Bei den erneuerbaren Energien soll der Anteil am Bruttoendenergieverbrauch von 12 Prozent im Jahr 2013 auf 60 Prozent im Jahr 2050 steigen, beim Strom liegt das Ziel für 2050 bei 80 Prozent.

Im EEG finden sich konkrete Zielvorgaben für die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die in der

Vergangenheit teils übererfüllt und daher über die Zeit erhöht wurden. So sollte laut EEG 2004 bis 2020 ein Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Stromerzeugung von 20 Prozent erreicht werden, der dann aber bereits im Jahr 2011 erzielt wurde. Als Reaktion auf diesen rapiden Ausbau wurde im EEG 2009 und wiederum im EEG 2012 das Ausbauziel für 2020 erhöht (vgl. Abbildung 12). Mit dem EEG 2012 wurde ein langfristiges, ambitioniertes Ausbauziel von 80 Prozent im Gesetz verankert, und der anvisierte Ausbaupfad durch entsprechende Zwischenziele im EEG 2014 konkretisiert. Das Zwischenziel für 2025 wird laut GRETCHEN-Befragung (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014) von den Herstellern erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien als ambitioniert angesehen, aber vor dem Hintergrund des 80-Prozent-Ausbauziels für 2050 als nicht ambitioniert genug [12]. Das Ausbauziel für erneuerbare Energien ist allerdings Teil eines wesentlich komplexeren (energie)politischen Zielsystems, das wirtschaftliche Entwicklung, soziale Verträglichkeit und weitere Aspekte, etwa Natur- und Artenschutz, umfasst.

Abbildung 12: EEG-Zielvorgaben zum Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung [2]





### 3.2 Instrumente und ihr Zusammenspiel

Zur Erreichung der Ziele trägt ein umfangreicher Instrumentenmix bei, der über die Zeit weiterentwickelt und an Veränderungen im politischen und ökonomischen Umfeld angepasst wurde. Die verwendeten Instrumente decken verschiedene Politikfelder ab und haben unterschiedliche Zielsetzungen. Hinsichtlich des technologischen Wandels lassen sich die Instrumente nach ihrer primären Funktion grob in drei Kategorien unterteilen: nachfragefördernde, technologiefördernde und systemische Instrumente. Abbildung 13 bietet für diese drei Kategorien einen Überblick über beispielhafte Instrumente und unterscheidet diese dabei gemäß ihrem Typ in ökonomische Instrumente, Regulierung und Information.

In Deutschland wird ein Mix dieser Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien eingesetzt. Dieser Instrumentenmix setzt sich aus Instrumenten unterschiedlicher Politikfelder zusammen. Hierzu zählen bspw. Instrumente der Energie- und Klimapolitik (z. B. EEG, EnWG, EU-Emissionshandel) und der Innovationspolitik (z. B. Energieforschungsprogramme). Von Relevanz sind aber auch Instrumente anderer Politikfelder, wie bspw. der Umwelt- und Biodiversitätspolitik (z. B. Bundesnaturschutzgesetz).

Abbildung 14 gibt einen exemplarischen Überblick über den eingesetzten Instrumentenmix im Zeitverlauf.

Die wichtigsten ökonomischen Instrumente, die für die erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien relevant sind, werden im Folgenden näher vorgestellt.

**Technologiefördernde Instrumente** zielen darauf ab, Unternehmen bei der Durchführung von F&E zu unterstützen. Diese Unterstützung erfolgt in der Regel über die direkte Bereitstellung von öffentlichen Fördermitteln für einzelne Akteure. So haben laut GRETCHEN-Befragung in den Jahren 2011–2013 ein knappes Viertel der befragten Unternehmen öffentliche Fördermittel (aus Deutschland und der EU) für ihre F&E- und Innovationstätigkeiten erhalten (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014) [12]. Laut Förderkatalog der Bundesministerien wurden seit den 1970er Jahren 383 Mio. € für Windkraft und 1.450 Mio. € für Photovoltaik für F&E-Tätigkeiten bereitgestellt, wovon die Einzelförderung für Photovoltaik 1.010 Mio. € und für Windkraft 331 Mio. € beträgt (alle Angaben in Preisen von 1995) (vgl. Abbildung 15) [4]:

Abbildung 13: GRETCHEN Instrumententypologie mit ausgewählten Beispielinstrumenten [15]

		P r i m ä r e F u n k t i o n		
		Technologieförderung	Nachfrageförderung	Systemische Förderung
P r i m ä r e r T y p	Ökonomische Instrumente	F&E* Zuwendungen und Darlehen, steuerliche Anreize, staatliche Eigenkapitalhilfe	Subventionen, Einspeisetarife, Handelssysteme, Steuern, Abgaben, Pfandsysteme, öffentliche Beschaffung, Exportkreditgarantien	Steuerreform, Subventionsabbau, Infrastrukturbereitstellung, Verbundvorhaben
	Regulierung	Steuerreform, Subventionsabbau, Infrastrukturbereitstellung, Verbundvorhaben	Technologie- / Leistungsstandards, Produkt- und Praktikenverbote, Anwendungseinschränkungen	Marktdesign, Gewährleistung des Netzzugangs, Einspeisevorrang, Umwelthaftungsgesetz
	Information	Aus- und Weiterbildungsangebote, Vermittlung unternehmerische Kompetenzen, wissenschaftliche Workshops	Weiterbildung für neue Technologien, Bewertungs- und Kennzeichnungsprogramme, öffentliche Informationskampagnen	Bildungssystem, thematische Sitzungen, öffentliche Debatten, Verbundprojekte, Clusterförderung

\* F&E = Forschung, Entwicklung und Demonstration

Abbildung 14: Ausschnitt aus dem Instrumentenmix und seiner Entwicklung (2000 bis 2014) [14, 15]

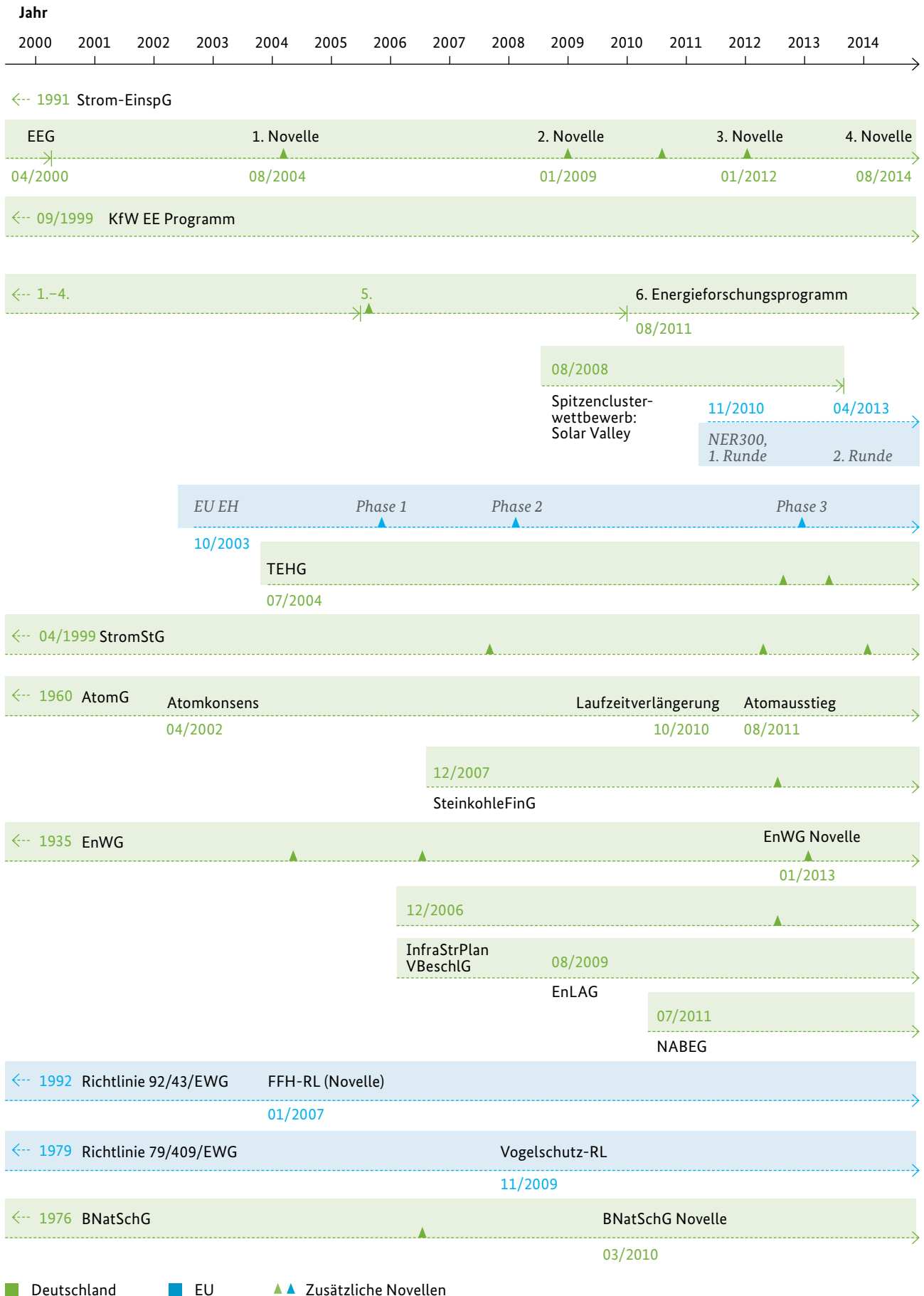
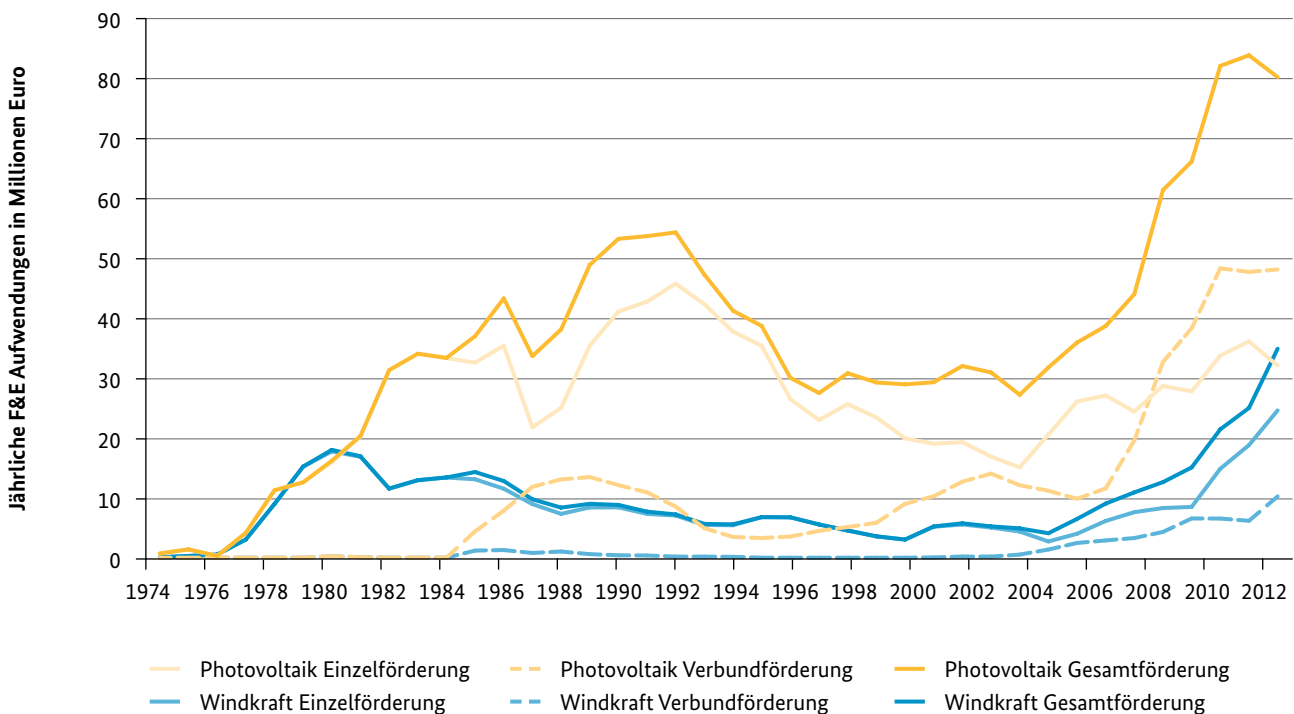


Abbildung 15: Öffentliche Forschungsmittel für Windkraft und Photovoltaik [4]



- Für Photovoltaik zeigt sich ein stark ansteigender Verlauf vom Ende der 1970er Jahre an, der 1992 einen Höhepunkt erreicht. Danach sinken die jährlichen Fördermittel und stabilisieren sich Ende der 1990er bei etwa 20 Mio. € pro Jahr. Ab 2004 steigen die jährlichen Fördermittel wieder an und lagen 2013 bei 32 Mio. €, nehmen aber seitdem wieder ab.
- Die Entwicklung für Windkraft verläuft ähnlich, es zeigen sich aber zwei wichtige Unterschiede: Die Höhe der jährlichen Fördermittel fällt – abgesehen von einer kurzen Periode Ende der 1970er – wesentlich geringer aus als bei Photovoltaik. Zudem wird das erste Fördermaximum früher – um 1980 – erreicht. Darauf folgt eine längere Phase langsam sinkender Fördermittel, die erst im Jahr 2000 beendet wird, um bis 2013 kontinuierlich auf 25 Mio. € anzusteigen.

**Systemische Instrumente** ändern und verbessern Rahmenbedingungen für Akteure und verstärken oder erleichtern dadurch Innovationstätigkeiten. Solche Verbesserungen zielen meist auf die (Forschungs-)Infrastruktur ab. Hierzu zählt bspw. die Förderung der Ausbildung von Fachkräften,

die laut GRETCHEN-Befragung den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ähnlich stark unterstützt wie die öffentliche F&E-Förderung und das EEG [12]. Des Weiteren zielen systemische Instrumente auf die Verbesserung des Informations- und Wissensaustausches zwischen Akteuren ab. In Deutschland wird das z. B. durch Verbundforschungs- oder Clusterförderung (etwa für das Solar Valley) erreicht, welche die Zusammenarbeit verschiedener Akteure (z. B. Unternehmen und Forschungseinrichtungen) im Rahmen gemeinsamer F&E-Projekte zum Ziel haben. Für Photovoltaik wurden 440 Mio. € und für Windkraft 52 Mio. € als Verbundforschungsförderung vergeben (vgl. Abbildung 15) [4]:

- Bei Photovoltaik nimmt die Verbundförderung einen relativ hohen Anteil an der Gesamtförderung ein und übertrifft in den letzten Jahren sogar die Einzelförderung. In 2013 erreichte sie 48 Mio. €.
- Bei Windkraft war der Anteil der Verbundforschung lange Zeit sehr gering und Mitte der 90er Jahre gar nicht vorhanden. Seit 2003 steigt sie kontinuierlich an.

**Nachfragefördernde Instrumente** tragen über die Förderung der Marktentwicklung zur Technologieentwicklung bei. In den 1990er wurden zur Entwicklung eines begrenzten Nischenmarktes Programme wie das 100/250-MW-Programm für Windkraft und die 1.000/100.000-Dächer-Programme für die Photovoltaik angeboten. Das Stromeinspeisungsgesetz von 1991 flankierte diese mit der Einführung einer Abnahmegarantie für Strom aus erneuerbaren Energien und der Festlegung einer technologieunabhängigen Einspeisevergütung. Da diese jedoch für die meisten erneuerbaren Energien nicht ausreichte, um die höheren Gestehungskosten gegenüber fossilen

Stromerzeugungstechnologien zu kompensieren, wurde im Jahr 2000 das EEG mit teilweise deutlich höheren und technologiespezifischen Einspeisevergütungen eingeführt. Die dadurch ausgelöste rasante Entwicklung des Marktes – insbesondere bei der Photovoltaik – lässt sich zu großen Teilen durch den Effekt auf die Gewinnspanne erklären (siehe Methodikbox 8 **Gewinnspanne**). Neben dem Heimatmarkt spielen inzwischen auch zunehmend im Ausland geltende Instrumente zur Schaffung von Märkten eine Rolle, was durch die Ergebnisse der GRETCHEN-Befragung bestätigt wird [12].

### Box 8 Gewinnspanne

Die Gewinnspanne, auch als Marge bezeichnet, zeigt die ‚Sog‘-Wirkung der nachfragefördernden Instrumente. Sie integriert die Wirkung der verschiedenen nachfragefördernden Instrumente (Einspeisevergütungen, Zinsvergünstigungen, Investitionszuschüsse) auf den Cash-Flow der Investition. Die Gewinnspanne kann daher als operationalisierte Politikvariable für diesen nachfragefördernden Instrumentenmix gesehen werden, die im Rahmen von GRETCHEN für die Photovoltaik und für Windkraft berechnet wurde aus: Gewinnspanne = Einspeisetarif - Stromgestehungskosten (LCOE) + annuierte finanzielle Förderung.

Bei der Photovoltaik wurde die Marge mit und ohne Förderung bestimmt (vgl. Abbildung). Entsprechend der Kostenentwicklung steigt die Marge mit und ohne Förderung im Zeitverlauf an. Die nachfragefördernden Instrumente führen zu einer deutlich höheren Marge. Allerdings fällt die Marge ohne Förderung im letzten Betrachtungsjahr höher als jene mit Förderung aus, da die Einspeisevergütung unter dem Strombezugspreis der Haushalte liegt (Basisfall ohne Förderung) [1, 2, 3].

#### Entwicklung der Gewinnspanne bei Photovoltaik (10-kWp-Anlagen) mit und ohne Förderung [2]

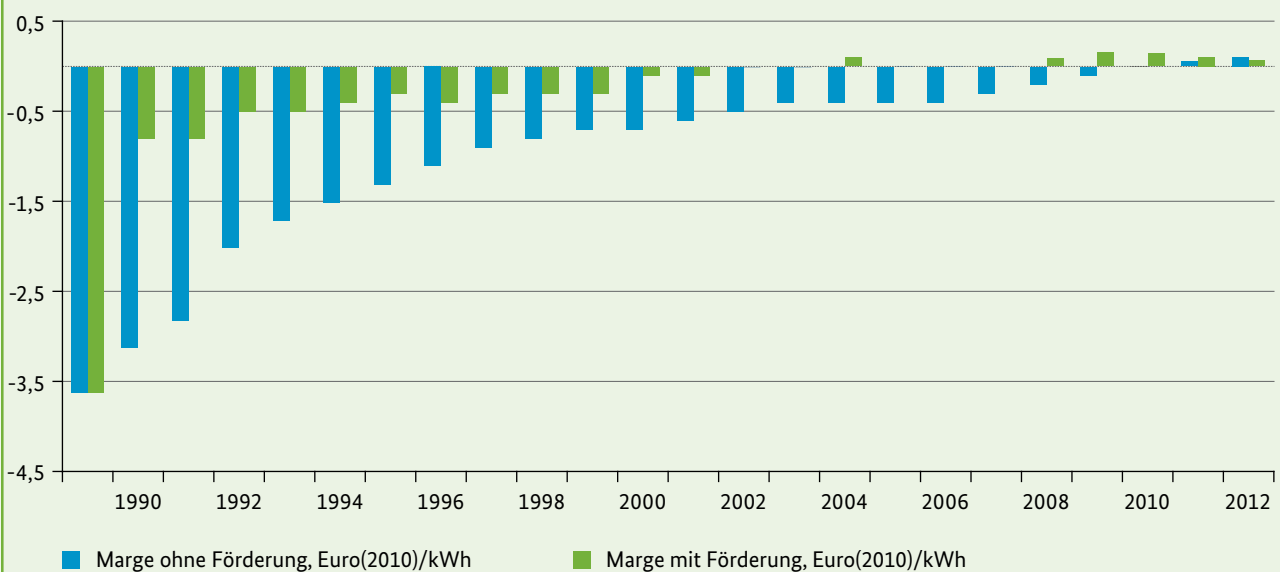
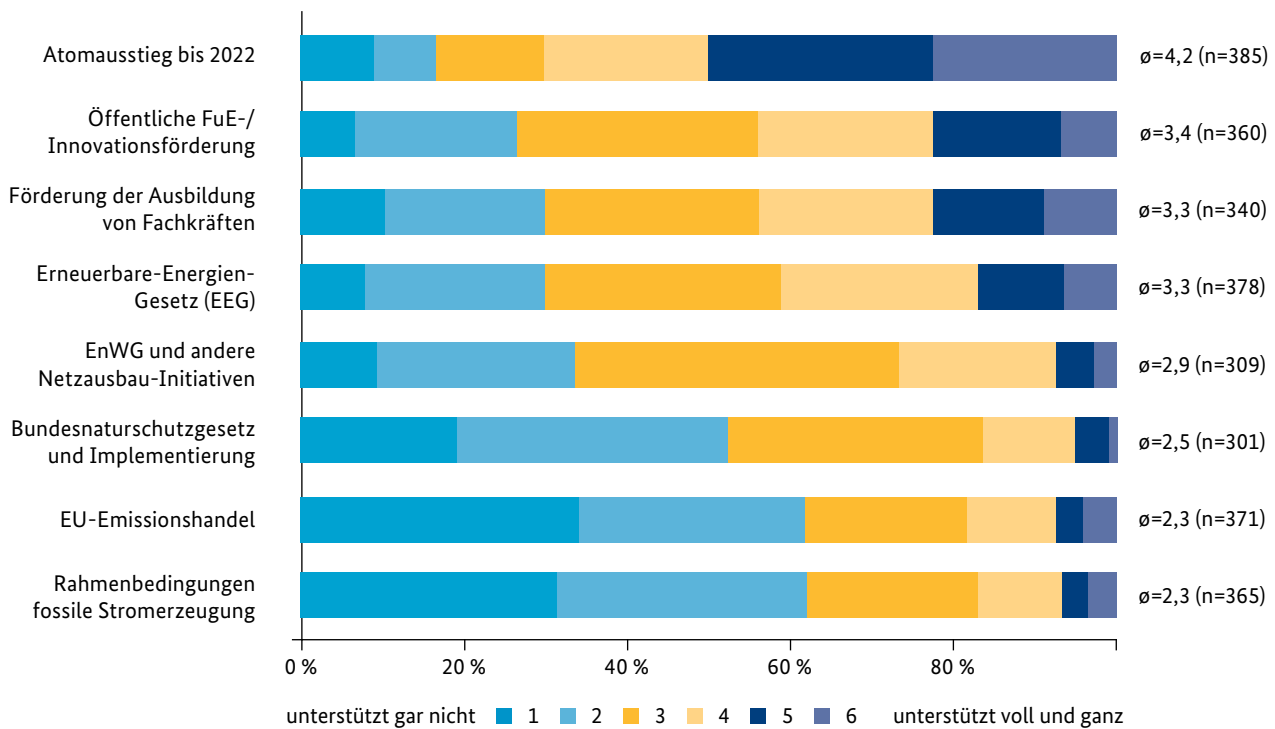


Abbildung 16: Einschätzung der Unterstützungswirkung ausgewählter Instrumente [12]

Inwiefern unterstützen folgende politische Instrumente und Maßnahmen in ihrer gegenwärtig gültigen Ausgestaltung den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien?



Dabei existieren die einzelnen Instrumente nicht losgelöst voneinander, sondern formen einen **Instrumentenmix**. Im Rahmen des GRETCHEN-Projekts wurde daher untersucht, ob das Zusammenspiel von Instrumenten im Instrumentenmix eine Wirkung entfaltet, die über die Wirkung einzelner Instrumente hinausgeht. So kann bspw. vermutet werden, dass sich nachfragefördernde und technologiefördernde Instrumente gegenseitig unterstützen, da erstere die Anzahl der Akteure erhöhen, die potentiell F&E betreiben können, während letztere die Fähigkeit dieser Akteure, F&E zu betreiben, verbessern. Laut GRETCHEN-Befragung wird allerdings die in den letzten Jahren vermehrt vorgeschlagene Umschichtung der EEG-Mittel hin zu mehr F&E-Förderung eher kritisch gesehen [12].

Die Zusammensetzung des Instrumentenmixes hat sich im Zeitverlauf deutlich verändert und flankierende Maßnahmen sind unterstützend hinzugekommen, welche die vielfältigen technologischen, gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen adressieren (vgl. Abbildung 16). Dennoch bemängeln laut GRETCHEN-Befragungen mehr als zwei Drittel der Unternehmen in 2014 das Fehlen wichtiger flankierender politischer Maßnahmen zur Unterstützung des Ausbaus erneuerbarer Energien [12].

Während beispielsweise der Atomausstieg den Ausbau der erneuerbaren Energien aus Sicht der Unternehmen am stärksten unterstützt, scheint der EU-Emissionshandel kaum eine unterstützende Wirkung zu entfalten (vgl. Abbildung 16). Ähnliches gilt für die sonstigen Rahmenbedingungen für fossile Stromerzeugungstechnologien, die gegenwärtig noch nicht so ausgestaltet sind, dass sie den Ausbau der erneuerbaren Energien gezielt unterstützen würden. Insgesamt gibt es nach Ansicht der Unternehmen nur bedingt Synergien zwischen den existierenden Instrumenten [12].

### 3.3 Glaubwürdigkeit und Kohärenz des Policy Mixes

Laut GRETCHEN-Befragung haben die Hersteller **den politischen Willen zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien** zu Zeiten des Atomausstiegs nach Fukushima als sehr hoch wahrgenommen (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014). Wie Abbildung 17 zeigt, gaben die Unternehmen allerdings an, dass dieser politische Wille in ihrer Wahrnehmung seitdem gesunken

ist [12]. Dabei ist der stärkste Abfall zu Zeiten der vom damaligen Bundesumweltminister Peter Altmaier initiierten Strompreisdebatte erfolgt: Um die steigenden Kosten der EEG-Umlage zu beschränken, hatte er vorgeschlagen, die garantierte Höhe der Einspeisevergütung nachträglich zu kürzen. Dieser später zurückgezogene Vorschlag löste eine erhebliche Verunsicherung der Investoren aus, da erstmalig die hohe Vorhersehbarkeit und damit Investitionssicherheit der deutschen Nachfrageförderung in Frage gestellt wurde. Obwohl die Ausgestaltung des EEG schließlich nicht verändert wurde, hat sich die wahrgenommene Stärke des politischen Willens der Bundesregierung zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von dieser Diskussion bisher nicht erholt. Stattdessen ist sie nach der Bundestagswahl zunächst weiter gesunken, und hat sich erst in den Jahren 2014/15 und damit nach Verabschiedung des EEG 2014 stabilisiert, allerdings auf einem relativ niedrigen Niveau [12, 13].

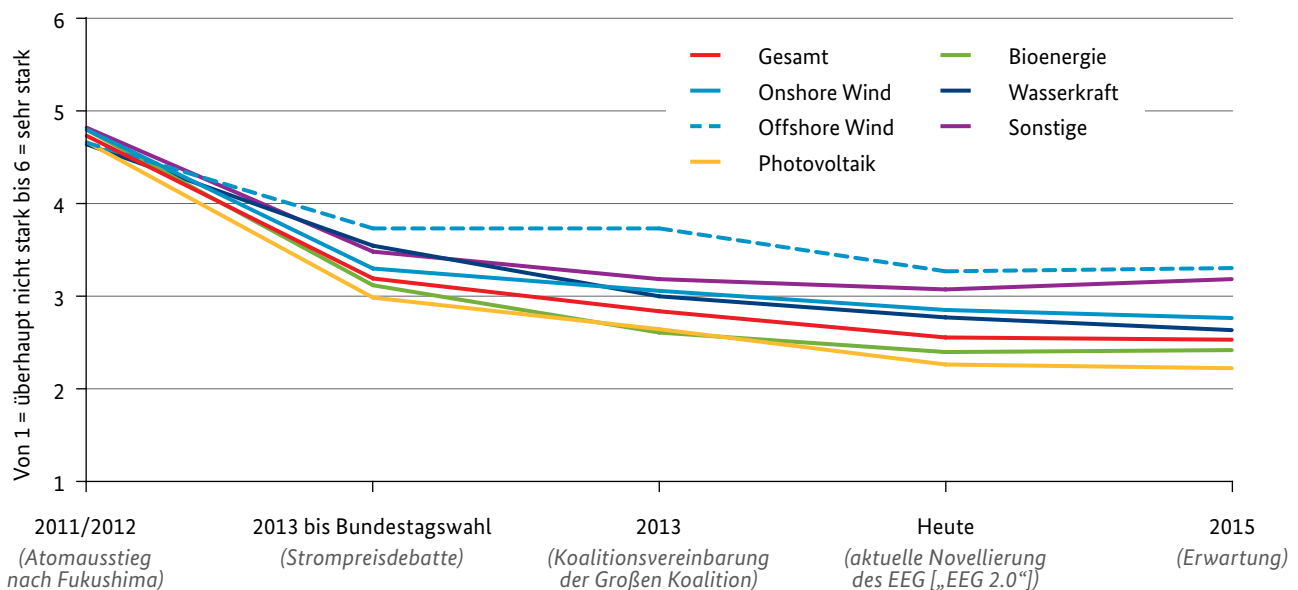
Eine Unterscheidung dieser Einschätzung der Stärke des politischen Willens der Bundesregierung nach technologischen Sparten zeigt, dass im Zeitraum 2011/12 der politische Wille zum Ausbau der erneuerbaren Energien von allen Sparten ähnlich wahrgenommen wurde und dass sich seitdem die Einschätzung aufgefächert hat [12]. So

nehmen Unternehmen aus dem Bereich Offshore-Windkraft den politischen Willen in 2014 als am höchsten wahr [siehe auch 9, 10, 11]. Demgegenüber bilden Unternehmen aus der Photovoltaik und Bioenergie das Schlusslicht [12]. Letzteres könnte u. a. an der starken Reduktion der Einspeisevergütung und der Beschränkung des Marktwachstumspotentials durch die Einführung enger Ausbaukorridore liegen.

Für das Jahr 2014 hat die GRETCHEN-Befragung diese **Glaubwürdigkeit** des Policy Mixes mit Hilfe verschiedener Formulierungen abgefragt. So sehen die Unternehmen zwar durchaus eine parteiübergreifende Zustimmung zum Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und empfinden die gesellschaftliche Akzeptanz und Unterstützung aus den Kommunen und Bundesländern als relativ hoch. Allerdings fehlen den Unternehmen ein stabiler politischer Wille und eine klare politische Vision für den Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien [12]. Insgesamt unterscheiden die Unternehmen deutlich zwischen der Glaubwürdigkeit auf nationaler Ebene (und damit dem politischen Willen der Bundesregierung) und sub-nationaler Ebene (also dem politischen Willen der Bundesländer und Kommunen) [13, 16].

**Abbildung 17:** Entwicklung der Stärke des politischen Willens der Bundesregierung zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (2011 bis 2015) [12]

Wie stark würden Sie den politischen Willen der jeweiligen Bundesregierung zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu folgenden Zeitpunkten einschätzen? (n=368)

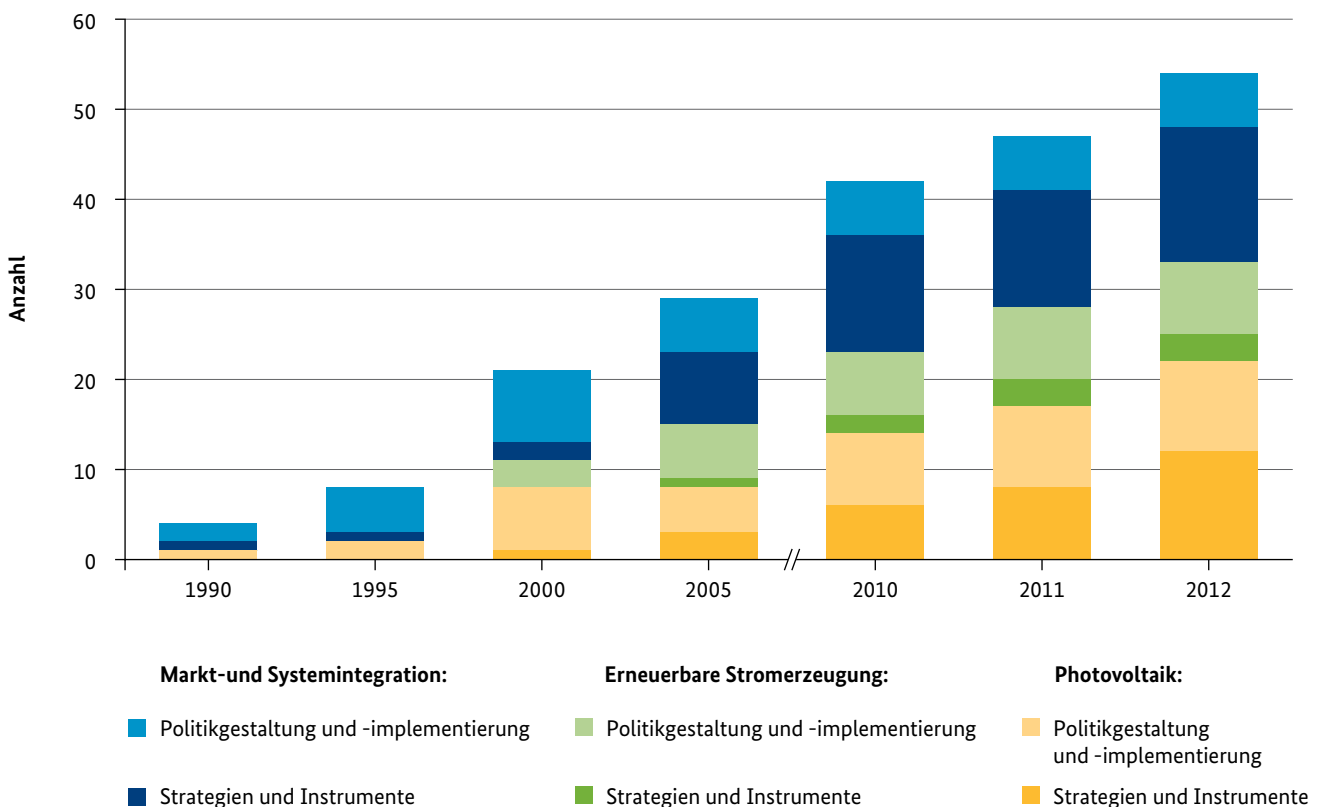




Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die stetige **Zunahme von Politikmaßnahmen** – wie Abbildung 18 für die Photovoltaik zeigt – von Unternehmen nicht unbedingt als Zeichen eines hohen politischen Willens verstanden wird. Stattdessen ist es möglich, dass eine hohe politische Aktivität nur dann als Bekenntnis der Politik zu einer Technologie empfunden wird, wenn die konkrete Ausgestaltung der Instrumente und deren Implementierung vorteilhaft für die Hersteller der Technologien ausfällt, was insbesondere bei der Photovoltaik seit Ende 2012 nicht mehr gegeben zu sein scheint. Dort führte die Senkung der Einspeisevergütungen zusammen mit dem globalen Konkurrenzdruck zu einem Absatzrückgang für deutsche Hersteller. Dieser Einbruch könnte aus Sicht der Hersteller negativ bewertet worden sein und dürfte eine Rolle bei der Einschätzung eines fehlenden politischen Willens zur Förderung der erneuerbaren Energien gespielt haben. Allerdings könnte die Zunahme der politischen Instrumente, die die Markt- und Systemintegration erneuerbarer Energien sowie die Umsetzung der Ausbaustrategie adressieren, als fortgesetzter Wille der Politik interpretiert werden, den Ausbau weiter voranzutreiben [2].

Die **Kohärenz der politischen Prozesse** zur Entscheidungsfindung und Implementierung des Policy Mixes für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien fällt laut GRETCHEN-Befragung eher gering aus. So wird von den Herstellern am stärksten bemängelt, dass Probleme in der Branche von der Politik nicht frühzeitig erkannt und Hemmnisse nicht immer behoben werden. Außerdem scheint es bei der Problemlösung eher selten zu einem konstruktiven Austausch zwischen Politik und Herstellern zu kommen. Des Weiteren hätten die letzten EEG-Novellierungen transparenter gestaltet werden können [12]. So zeigen Untersuchungen für Offshore-Windkraft bspw. für die Erhöhung der Einspeisevergütung im EEG 2012, dass die Art und Weise solcher politischen Problemlösungsprozesse die Funktionalität des technologischen Innovationssystems beeinflussen kann [9, 11]. Schließlich gaben die Unternehmen an, dass die Zuständigkeiten in den relevanten Bundesministerien klarer geregelt sein könnten. Außerdem scheinen Bund und Länder zu wenig an einem Strang zu ziehen [12].

Abbildung 18: Anzahl von Politikmaßnahmen mit Bezug zu Photovoltaik (1990 bis 2012) [2]



## 4 Innovationswirkung des Policy Mixes

Im Folgenden soll die Wirkung des in Kapitel 3 dargestellten Policy Mixes auf die in Kapitel 2 beschriebene Markt- und insbesondere Technologieentwicklung erläutert werden. Dabei wird explizit die Vielschichtigkeit des technologischen Wandels durch verschiedene Zielgrößen – wie den Patentoutput, die privaten F&E-Ausgaben, die Kooperationsneigung oder die Einbettung der Forschung in den internationalen Kontext – berücksichtigt.

### 4.1 Innovationswirkung von Zielen und deren Konsistenz

In der GRETCHEN-Befragung gaben die Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien die politischen **Ausbauziele für erneuerbare Energien** für das Jahr 2025 als zweitwichtigsten politischen Einflussfaktor für ihre Innovationsaktivitäten im Zeitraum 2011–2013 an (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014). Dabei sahen die Unternehmen die Bedeutung der deutschen Ausbauziele als ähnlich einflussreich wie nachfragefördernde Instrumente im In- und Ausland und ein glaubwürdiges Bekenntnis der Politik zur Energiewende an [12]. Allerdings kann die konkrete Höhe der Innovationsausgaben der Unternehmen nicht durch das Ausbauziel für erneuerbare Energien bis 2025 erklärt werden. Ähnliches gilt für die wahrgenommene Konsistenz der verschiedenen energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung. Die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass Hersteller, die das mittelfristige Ausbauziel für 2025 vor dem Hintergrund des 80-Prozent-Ziels für 2050 als nicht ambitioniert genug ansehen, vergleichsweise geringere Innovationsausgaben tätigen [16]. Diese Wirkung könnte u. a. daran liegen, dass die Unternehmen das 80-Prozent-Ziel aufgrund des geplanten Verlaufs des Ausbaus als nicht glaubwürdig ansehen.

Im Rahmen von Unternehmensfallstudien mit Herstellern und Betreibern von Offshore-Windkraftanlagen zeigt sich, dass die konsistente und über einen Zeitraum von zehn Jahren stabile und technologiespezifische **Offshore-Windkraft-Strategie** von 2002 mit ihren lang- und mittelfristigen Zielen einen maßgeblichen Einfluss auf die Innovationsaktivitäten der Unternehmen hatte. Daneben spielte aber auch die Konsistenz des übergeordneten Policy Mixes eine zentrale Rolle für die unternehmerischen F&E-Aktivitäten. Der Innovationsanreiz ging also nicht nur von den anspruchsvollen Offshore-Windkraft-Ausbauzielen aus, sondern hing ebenso maßgeblich davon ab, dass diese tatsächlich durch entsprechende Instrumente umgesetzt wurden [9].

Als ein Ergebnis der gesamtwirtschaftlichen Modellierung zeigt sich schließlich, dass die Dekarbonisierung der Stromerzeugung einen wichtigen Beitrag leistet, um die ambitionierten **Klimaschutzziele** der Bundesregierung

zu erreichen [21]. Das alleine reicht jedoch nicht aus – eine weitere Steigerung der Energieeffizienz in allen Sektoren ist unabdingbar, insbesondere bei der Wärmebereitstellung und im Transportsektor müssen vermehrt CO<sub>2</sub>-freie Lösungen zum Einsatz kommen. Hier gilt es jedoch, die Klimawirkungen der Technologien über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten und auch indirekte Effekte zu berücksichtigen. So ist gerade bei der Elektromobilität der Gesamteffekt auf Emissionen stark davon abhängig, ob die zusätzlich benötigte Elektrizität auch tatsächlich mit Hilfe von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien bereitgestellt wird.

### 4.2 Innovationswirkung einzelner Instrumente und deren Zusammenspiel

Im Rahmen des GRETCHEN-Projekts wurde eine Reihe von Politikinstrumenten genauer auf ihre Innovationswirkung hin untersucht. Im Folgenden wird zunächst die separate Wirkung von technologiefördernden, systemischen und nachfragefördernden Instrumenten (insbesondere im Inland, aber auch im Ausland) betrachtet. Im Anschluss daran wird die Wirkung des Instrumentenmixes, den diese Instrumente formen, betrachtet.

**Technologiefördernde Instrumente** zeigen positive Effekte auf die Technologieentwicklung – und zwar sowohl auf Patentanmeldungen [1, 4], private F&E-Ausgaben [16], die Größe des und die Vernetzung im nationalen Innovationssystem [4] und den Zugang zu internationalem Wissen [5] – sowie teilweise auf die technologische Wettbewerbsfähigkeit [3].

So bestätigen die Ergebnisse einen positiven Zusammenhang von öffentlicher Forschungsförderung und Patentanmeldungen deutscher Erfinder für die Photovoltaik und Windkraft [1]. Des Weiteren deuten Analysen der GRETCHEN-Befragung darauf hin, dass die Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien mehr für F&E ausgeben, wenn sie in der Vergangenheit öffentliche Fördermittel von Deutschland und/oder der EU für die Durchführung von F&E-Projekten erhalten haben

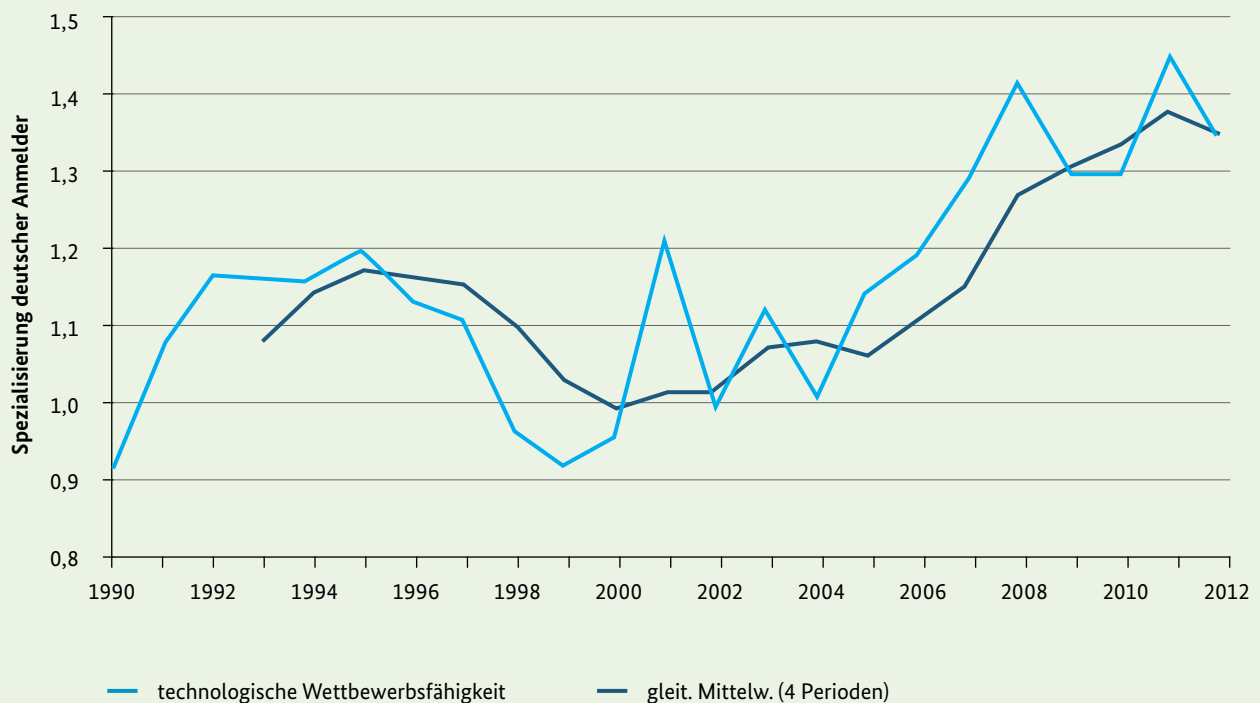
(siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014) [16]. Außerdem erhöhen technologiefördernde Instrumente die Anzahl der patentierenden Akteure, insbesondere bei Windkraft. Bei Photovoltaik hingegen führen sie zu einer stärkeren Vernetzung der Akteure [4]. Ebenso positiv wird die Qualität internationaler Partner bei Publikationen beeinflusst, was darauf hinweist, dass geförderte Akteure attraktive Kooperationspartner sind. Im Gegenzug verringert sich jedoch leicht die Anzahl der Verbindungen geförderter Akteure [5].

Anders sieht es für den Einfluss der technologiefördernden Instrumente auf die technologische Wettbewerbsfähigkeit aus (siehe Methodikbox 9 Technologische Wettbewerbsfähigkeit). Hier hält sich für die Photovoltaik der positive Einfluss dieses einzelnen Instruments in Grenzen. Wird hingegen die gemeinsame Wirkung von technologiefördernden Instrumenten und Ausbauzielen untersucht, zeigt sich ein deutlicher Einfluss dieser Ziel-Instrumenten-Kombination auf die technologische Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Photovoltaik-Industrie [3].

### Box 9 Technologische Wettbewerbsfähigkeit

Die technologische Wettbewerbsfähigkeit zeigt auf, wie stark sich deutsche Patentanmelder im Vergleich zum Rest der Welt auf Photovoltaik spezialisiert haben. Berechnet wird das Verhältnis von Photovoltaik-Patentanmeldungen deutscher Anmelder zu allen Patentanmeldungen deutscher Anmelder im Vergleich zu Photovoltaik-Patentanmeldungen global zu allen Patentanmeldungen global. Ein Wert über eins zeigt auf eine stärkere Ausrichtung der deutschen Anmelder auf Photovoltaik und damit auf eine gute Positionierung für zukünftige Märkte. Die Entwicklung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit in der Abbildung zeigt fast durchgehend eine starke Stellung der deutschen Photovoltaik-Technologieanbieter [2].

Entwicklung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit der Photovoltaik in Deutschland [2]



**Systemische Instrumente** erweisen sich als besonders effektiv bei der Förderung des Wissensaustauschs über Patentkooperationen [4] und der internationalen Vernetzung [5]. Wenn der Wissensaustausch im deutschen Innovationssystem über Patentkooperationen betrachtet wird, ergeben sich positive Effekte bei Photovoltaik und Windkraft, sowohl bezüglich der Anzahl der Patente, der Anzahl der forschenden Akteure als auch bei deren Vernetzung untereinander. Dabei scheint der Effekt systemischer Instrumente auf die Vernetzung bei Windkraft wesentlich stärker auszufallen als bei Photovoltaik [4]. Auch wenn die Vernetzung und internationale Einbettung der Photovoltaikforschung über Publikationen betrachtet wird, zeigt sich, dass eine geschickte Ausgestaltung des inländischen Forschungssystems die internationale Einbettung und damit den Zugang zu externem Wissen positiv beeinflussen kann. So ist z. B. eine große Anzahl von miteinander verbundenen Akteuren in einem nationalen Forschungssystem vorteilhafter für den internationalen Wissensaustausch als die Fokussierung auf wenige nationale Champions [5].

**Nachfragefördernde Instrumente** legen meist den Grundstein für die Entstehung eines attraktiven Marktes und zeigen starke positive Effekte für den technologischen Wandel – gemessen anhand von Patentanmeldungen [1, 4], privaten Innovationsaktivitäten und F&E-Ausgaben [12, 16], der Größe des und Vernetzung im nationalen Innovationssystem [4] und beim Zugang zu internationalem

Wissen [5] (siehe Methodikbox 10 Operationalisierung der nachfragefördernden Instrumente). Des Weiteren wird die technologische Wettbewerbsfähigkeit positiv beeinflusst [3].

Es zeigt sich ein stark positiver Einfluss der Erhöhung der Marktnachfrage – und damit verbunden der Erzeugungskapazitäten – auf die Anzahl von **Patentanmeldungen** bei Photovoltaik und Windkraft [1, 4]. Die GRETCHEN-Befragung macht zudem deutlich, dass für die Hersteller von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien die politikgetriebene Marktnachfrage die Innovationsaktivitäten positiv beeinflusst. Dabei nehmen die bestehenden und erwarteten inländischen und ausländischen nachfragefördernden Instrumente eine Schlüsselrolle unter den politischen Einflussfaktoren für unternehmerische Innovationsaktivitäten ein [12]. Lassen diese Instrumente einen Anstieg der Umsätze erwarten, so erhöhen die Unternehmen ihre **Innovationsausgaben** [16].

Zudem besteht ein positiver Einfluss der Nachfrageförderung auf **Kooperationen**. Die Anzahl der patentierenden Erfinder sowie deren Vernetzung im Bereich der Photovoltaik erhöht sich stark, während es bei Windkraft nur einen schwachen positiven Einfluss zu geben scheint [4]. Auch bei der Einbettung in die internationale Photovoltaik-Forschungslandschaft spielt der heimische Ausbau und das staatliche Beschaffungswesen, beispielsweise für spezielle Hochleistungsphotovoltaikzellen für Satelliten, eine Rolle [5].

### Box 10 Operationalisierung der nachfragefördernden Instrumente

Zur Schaffung eines Nischenmarktes für erneuerbare Energien wurde eine Vielzahl verschiedener nachfragefördernder Instrumente eingesetzt, für deren Quantifizierung im Rahmen von GRETCHEN vier Ansätze verwendet wurden:

- ▶ **Jährlicher Ausbau der einzelnen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien [1, 4, 5]:** entspricht der Marktnachfrage – diese kann in der Vergangenheit größtenteils auf nachfragefördernde Instrumente zurückgeführt werden, da die Technologien ohne Förderung nicht wettbewerbsfähig waren (Betrachtung kann auf den heimischen Kapazitätszubaub beschränkt werden oder die Märkte in anderen Ländern mit einbeziehen);
- ▶ **Staatliche Beschaffung von Speziallösungen [5]:** in diesem Fall die Anzahl von Satelliten, welche in der Regel durch besonders leistungsfähige Photovoltaikzellen betrieben werden;
- ▶ **Gewinnspanne [1, 2]:** Marge, die Investoren in erneuerbare Stromerzeugungstechnologien erzielen können und die über nachfragefördernde Instrumente meist erst positiv wird; und
- ▶ **GRETCHEN-Befragung [12, 13, 16]:** Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wurden direkt über die Wirkung nachfragefördernder Instrumente befragt.

Dabei hat auch die **Ausgestaltung** der nachfragefördernden Instrumente Einfluss auf die Innovationstätigkeit. So haben laut GRETCHEN-Befragung sowohl die Höhe und garantierte Dauer der Einspeisevergütung einen Einfluss auf die Innovationstätigkeit der Unternehmen als auch die jährliche Degression [12]. Im Fall der Windkraft scheint bspw. die allmähliche Reduktion der Einspeisevergütung mit erhöhten Innovationsaktivitäten einherzugehen. Ein Grund dafür sein, hiermit einen Beitrag zur Reduzierung der Stromgestehungskosten und zur Ausweitung der Absatzmärkte zu leisten [1, 12].

Schließlich zeigen weitere Untersuchungen für die Photovoltaik, dass nachfragefördernde Instrumente die **technologische Wettbewerbsfähigkeit** über ihren Effekt auf den Markt deutlich positiv beeinflussen können. Basis hierfür dürfte die mit der Nachfrageförderung einhergehende Zunahme des Wettbewerbs und die Realisierung von Größenvorteilen sowie die dadurch ausgelöste Weiterentwicklung der Technologien und Produktionsprozesse sein, die zu sinkenden Technologiekosten führt [2, 3].

Der Einfluss des **internationalen Ausbaus** der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien (und damit der Policy Mix anderer Länder) auf den deutschen Markt wurde mit Hilfe von Modellsimulationen geschätzt, die mit GINFORS\_E durchgeführt wurden (siehe Methodikbox 6 Endogenisierung des technologischen Wandels im Modell GINFORS\_E). Es zeigt sich, dass gerade im Bereich der Photovoltaik die zielkonforme Festsetzung der Anreizwirkung nachfragefördernder Instrumente sehr schwierig ist. Insbesondere in den Jahren von 2009 bis 2013 wurde beispielsweise die Einspeisevergütung für Photovoltaikanlagen nicht schnell genug gesenkt, sodass der Ausbau in Deutschland weit oberhalb des Zielkorridors lag. Ein Grund für die zu langsame Politikreaktion sind internationale Lernkurveneffekte, die die Kosten der Photovoltaik viel schneller verringert haben, als dies bei einer rein nationalen Betrachtung zu erwarten gewesen war. Die Nichtbeachtung der internationalen Perspektive führte hier zur Zielübererfüllung [21]. Bei **Projektionen** in die Zukunft zeigt sich, dass es schwer ist, eine optimale Höhe der Einspeisevergütung für Photovoltaik zu finden, auch da zukünftige Politikmaßnahmen in anderen Ländern schwer vorherzusehen sind. Für Windkraft hingegen tritt dieses Problem in weit geringerem Maße auf, weil die Technologie bereits reifer ist und damit die Lernkurveneffekte geringer sind [19, 21].

Bei der **Betrachtung des Instrumentenmixes** zeigt sich, dass für Windkraft und Photovoltaik der gemeinsame Effekt nachfragefördernder und technologiefördernder Instrumente auf die Anzahl der Patente und die Anzahl der Erfinder positiv ist. Gleiches ist für beide Technologien beim Zusammenwirken von systemischen und nachfragefördernden Instrumenten bei der Vernetzung zu beobachten.

Zudem scheinen technologiefördernde und systemische Instrumente nur dann wie gewünscht zu funktionieren, wenn gleichzeitig nachfragefördernde Instrumente angewendet werden. Nachfragefördernde Instrumente stellen somit eine wichtige Voraussetzung für die effektive Unterstützung von Innovation und der Funktionalität des Innovationssystems dar [4]. Außerdem deuten die Ergebnisse der GRETCHEN-Befragung darauf hin, dass Hersteller höhere Innovationsausgaben vornehmen, wenn sich die verschiedenen Instrumente in ihrer Wirkung unterstützen. Zeigen sich also Inkonsistenzen im Instrumentenmix, scheinen die Unternehmen mit ihren Innovationsausgaben zurückhaltender zu sein [16].

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, dass sowohl technologiefördernde und systemische Instrumente als auch die Instrumente zur Schaffung von Nachfrage nach erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien einen positiven und sich gegenseitig verstärkenden Einfluss auf die Innovationstätigkeit hatten. Ein Abstellen auf nur ein Instrument zur Innovationsförderung ist daher nicht ratsam. Vielmehr bedarf es eines Instrumentenmixes aus Instrumenten mit unterschiedlichen Funktionen, die sich in ihrer Wirkungsweise ergänzen und sich gerade dadurch gemeinsam positiv auf den technologischen Wandel auswirken.

### 4.3 Innovationswirkung von Konsistenz, Glaubwürdigkeit und Kohärenz des Policy Mixes

Die bisherigen Ergebnisse haben die Innovationswirkung von Zielen (Kapitel 4.1) und Instrumenten sowie des Instrumentenmixes (Kapitel 4.2) separat betrachtet. Dieses Kapitel geht einen Schritt weiter und beleuchtet, ob auch die Eigenschaften des Policy Mixes (Konsistenz, Glaubwürdigkeit und Kohärenz) eine Innovationswirkung entfalten.

Hinsichtlich der **Konsistenz des Policy Mixes** gab ein Großteil der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien in der GRETCHEN-Befragung an, dass die bestehenden politischen Instrumente nicht in der Lage sein werden, die ambitionierten deutschen Ausbauziele für Erneuerbare Energien für das Jahr 2025 zu erreichen (siehe Methodikbox 2 GRETCHEN-Befragung 2014). Diese wahrgenommene Diskrepanz zwischen dem Instrumentenmix und den Zielen scheint einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Innovationsausgaben der Unternehmen zu haben: Unternehmen, die den Instrumentenmix als nicht ambitioniert genug für die Zielerreichung ansehen, investieren weniger in Innovationsaktivitäten. Die Passung von Instrumenten und Zielen für private Innovationsausgaben gewinnt zudem an Bedeutung, wenn gleichzeitig auch die

wahrgenommene Glaubwürdigkeit des Policy Mixes mit berücksichtigt wird [16]. Für Offshore-Windkraft wurde diesbezüglich festgestellt, dass die negative Innovationswirkung eines inkonsistenten Policy Mixes zumindest teilweise durch eine hohe Glaubwürdigkeit des Policy Mixes kompensiert werden kann [9].

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der GRETCHEN-Befragung, dass ein glaubwürdiges Bekenntnis der Politik zur Energiewende für die Innovationsaktivitäten der Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien im Zeitraum 2011–2013 eine wichtige Rolle gespielt hat. Diese **Glaubwürdigkeit** des Policy Mixes wurde von den Unternehmen als annähernd so wichtiger Bestimmungsfaktor ihrer Innovationsaktivitäten angesehen wie das EEG, die

politischen Ausbauziele und ausländische nachfragefördernde Instrumente, wohingegen der EU-Emissionshandel nahezu keine Rolle spielte [12]. Weiterführende Analysen deuten darauf hin, dass Unternehmen, die den Policy Mix als glaubwürdiger ansehen, mehr in F&E investieren und vice versa. Dabei verstärken sich die Hinweise auf eine entscheidende Rolle der Glaubwürdigkeit für private Innovationsausgaben, wenn zusätzlich die Konsistenz des gesamten Policy Mixes berücksichtigt wird [16]. Des Weiteren wird die Bedeutung der Glaubwürdigkeit des Policy Mixes auch dadurch unterstrichen, dass Unternehmen, die in 2011–13 keine Innovationsaktivitäten durchgeführt haben, als wichtigsten Grund hierfür das Fehlen eines glaubwürdigen Bekenntnisses der Politik zur Energiewende angaben [12].

### Exkurs: Den Determinanten der Glaubwürdigkeit auf der Spur [13]

Die GRETCHEN-Befragung verweist auf eine hohe Bedeutung der Glaubwürdigkeit des Policy Mixes für den grünen technologischen Wandel. Insofern stellt sich die Frage, welche Aspekte des Policy Mixes die Glaubwürdigkeit beeinflussen.

- ▶ **Politikstrategie:** Wird das langfristige Ausbauziel für den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung im Jahr 2025 als relativ anspruchsvoll angesehen, so fällt auch die Einschätzung der Glaubwürdigkeit höher aus.
- ▶ **Instrumentenmix:** Es ist nicht nur das EEG und die ihm zugesprochene Unterstützung beim Ausbau der erneuerbaren Energien, das einen positiven Einfluss auf die wahrgenommene Glaubwürdigkeit hat. Auch der Atomausstieg, die Regelungen zum Netzausbau und der EU Emissionshandel unterstützen aus Sicht der Unternehmen die Glaubwürdigkeit des Policy Mix.
- ▶ **Ausgestaltung des EEG:** Betrachtet man vertiefend die Veränderungen im EEG des Jahres 2014, so zeigt sich, dass sich die sinkende Höhe der Einspeisetarife und die Einführung technologiespezifischer Ausbaukorridore negativ auf die empfundene Glaubwürdigkeit des Policy Mixes ausgewirkt haben.
- ▶ **Konsistenz des Policy Mixes:** Die Höhe der wahrgenommenen Glaubwürdigkeit wird aber noch viel stärker dadurch beeinflusst, wie die energie- und klimapolitischen Ziele harmonisieren, wie gut die Instrumente aufeinander abgestimmt sind und inwiefern der Instrumentenmix als ausreichend angesehen wird, um die langfristigen Ziele zu erreichen.
- ▶ **Kohärenz der politischen Prozesse:** Ein besserer Informationsaustausch zwischen Unternehmen und politischen Entscheidungsträgern sowie eine schnellere Problemerkennung und -lösung gehen mit einer höheren Einschätzung der Glaubwürdigkeit des Policy Mixes einher.

Um also die Glaubwürdigkeit – und damit die Innovationsausgaben für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien – zu erhöhen, scheint es eine Vielzahl von Möglichkeiten zu geben: zum einen können Ziele anspruchsvoller oder die einzelnen Elemente des Policy Mixes besser aufeinander abgestimmt werden. Konkret würde bspw. eine „Reparatur“ des EU Emissionshandels die Glaubwürdigkeit erhöhen. Auch eine Verbesserung des Informationsaustausches zwischen Unternehmen und Politik sowie eine Optimierung der Politikgestaltungsprozesse dürfte zu einer Erhöhung der Glaubwürdigkeit des Policy Mixes beitragen.

Hinsichtlich der **Kohärenz** der politischen Entscheidungsfindungsprozesse kann nur bedingt ein direkter Einfluss auf die Innovationstätigkeit nachgewiesen werden. Allerdings gibt es Anzeichen, dass insbesondere die prozeduralen Aspekte, also bspw. der als nicht hinreichend transparent empfundene EEG-Novellierungsprozess oder die teilweise widersprüchlichen Signale von Bund und Ländern, eine Rolle für die Höhe der F&E-Ausgaben

der Unternehmen gehabt haben könnten [16]. Außerdem haben Interviews mit Herstellern von und Investoren in Offshore-Windkraft-Anlagen für den Fall der Strompreisdebatte gezeigt, dass es durchaus einen direkten Einfluss der politischen Diskussionen auf Innovation geben kann – in dem besagten Fall aufgrund des resultierenden Vertrauensverlustes einen negativen Einfluss [9].



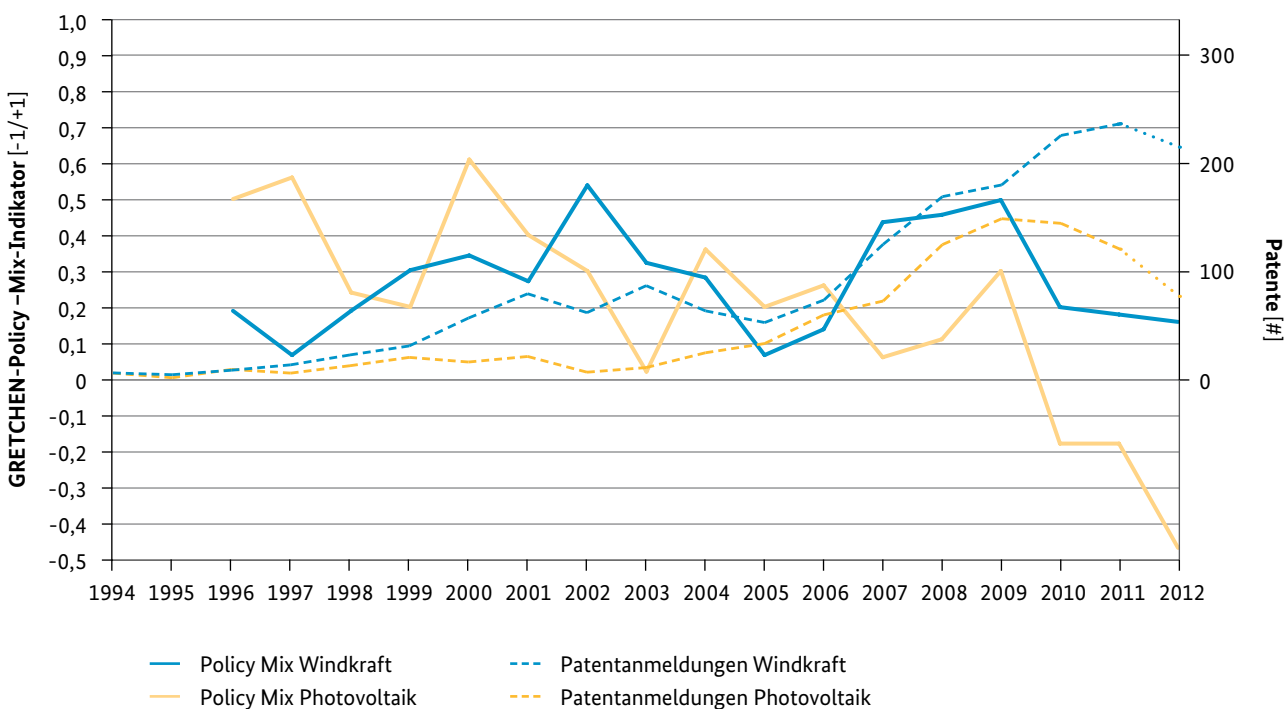
## 4.4 Innovationswirkung des gesamten Policy Mixes

Die in GRETCHEN durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass der Policy Mix für erneuerbare Energien einen deutlichen Einfluss auf den technologischen Wandel bei erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien hat. Allerdings haben die bisherigen Untersuchungen stets nur die Wirkung von Teilaspekten des in Kapitel 1 vorgestellten Policy-Mix-Konzeptes beleuchtet. Im Rahmen des GRETCHEN-Projektes wurden darüber hinaus auch erste Versuche unternommen, die Wirkung der Gesamtheit des Policy Mixes auf den technologischen Wandel zu untersuchen.

Dazu wurde ein Indikator für den Policy Mix für Photovoltaik und Windkraft konstruiert, der die verschiedenen Bestandteile des Policy-Mix-Konzeptes zusammenführt (siehe Methodikbox 11 **GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator**). Es zeigen sich deutliche Hinweise darauf, dass der Verlauf dieses Policy-Mix-Indikators den technologischen Wandel in Deutschland – gemessen anhand von Patentanmeldungen deutscher Erfinder – zu erklären hilft. Dabei unterscheiden sich die Ergebnisse wiederum zwischen Windkraft und Photovoltaik [1]:

- Für **Photovoltaik** deuten die Analysen auf einen negativen Zusammenhang der gemessenen Attraktivität des gesamten Policy Mixes mit Patentaktivitäten. Demnach sind die Patentanmeldungen trotz langsam sinkender Attraktivität des gesamten Policy Mixes in der Vergangenheit deutlich gestiegen. Allerdings zeichnet sich mit dem rapiden Absinken des Policy-Mix-Indikators unter Null eine Trendumkehr ab, denn die Patentanmeldungen sind seit diesem Zeitraum deutlich eingebrochen. Dies ist ein starker Bruch, da bis dahin die jährlichen Patentanmeldungen kontinuierlich gestiegen waren.
- Für **Windkraft** weisen die Analysen hingegen auf einen positiven Zusammenhang zwischen dem GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator und den Patentanmeldungen hin. Das heißt, dass die Anzahl der Patentanmeldungen der wahrgenommenen Attraktivität des Policy Mixes für Windkraft folgt. Dieser enge Zusammenhang deutet sich bereits aus dem in Abbildung 19 gezeigten, nahezu parallelen Verlauf der Patentanmeldungen und des Policy-Mix-Indikators an. Demnach wäre zu vermuten, dass die im Jahr 2012 erfolgten Patentanmeldungen für Windkraft weiter zurückgegangen sind, was jüngste Patenzahlen zu bestätigen scheinen.

**Abbildung 19:** Entwicklung des GRETCHEN-Policy-Mix-Indikators und der Patentanmeldungen deutscher Erfinder für Photovoltaik und Windkraft im Zeitraum 1994 bis 2012 [1]



### Box 11 GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator

Um die Dynamik und Komplexität des Policy Mixes zu erfassen, wurde im Rahmen des GRETCHEN-Projekts ein aggregierter Policy-Mix-Indikator entwickelt – jeweils für Photovoltaik und Windkraft. Hierzu wurden die monatlich erscheinenden Fachzeitschriften “Photon – Das Solarstrom-Magazin” (1996–2012) und “WindPower Monthly” (1994–2012) nach Artikeln durchsucht, die über Entwicklungen im Policy Mix berichten. Basierend auf einer Inhaltsanalyse von 1.063 Artikeln für Photovoltaik und 801 Artikeln für Windkraft wurde zunächst eine Policy-Mix-Datenbank aufgebaut, die jede Entwicklung im Policy Mix festhält. Dabei spielt nicht nur die konkrete Ausgestaltung von Politikinstrumenten eine Rolle, sondern bspw. auch Diskussionen um deren Implementierung und Novellierung sowie ausländische Politikmaßnahmen. Alle derartig dokumentierten ‘Policy-Mix-Ereignisse’ wurden anschließend mit einer ‘+1’ (bzw. ‘-1’) bewertet, wenn die Entwicklung im Policy Mix als positiv (bzw. negativ) für die Technologie angesehen wurde, und mit einer ‘0’, wenn der Artikel davon ausging, dass die Entwicklung neutral für die Technologie war. Aus diesen bewerteten Ereignissen wurde dann ein jährlicher Policy-Mix-Indikator berechnet, der die Attraktivität des Policy Mixes für eine Technologie wiedergibt. Hierzu wurden zunächst alle Einzelbewertungen eines Jahres summiert und dann durch die Anzahl der Policy-Mix-Ereignisse dividiert, sodass der Indikator jährliche Werte im Intervall von ‘-1’ bis ‘+1’ annimmt. Dieser Indikator bietet einen schnellen Überblick über die Einschätzung zur Entwicklung der Attraktivität des technologiespezifischen Policy Mixes der letzten zwanzig Jahre.

Demnach fiel die Attraktivität des Policy Mixes für Photovoltaik und Windkraft in der Vergangenheit größtenteils positiv aus, unterlag aber Schwankungen. Außerdem unterscheidet sich der konkrete Verlauf des Indikators zwischen Photovoltaik und Windkraft deutlich (vgl. Abbildung 19):

- ▶ Für die **Photovoltaik** weist der GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator für die letzten 20 Jahre eine tendenziell abnehmende Attraktivität des Policy Mixes auf und nimmt seit dem Jahr 2010 sogar negative Werte an. Maßgeblich dazu beigetragen haben dürften die intensiven Diskussionen zur Zukunft der Photovoltaikförderung und außerplanmäßige Reduzierungen in der Einspeisevergütung sowie anvisierte Ausbaugrenzen für die Photovoltaik. Diese negativen Entwicklungen werden bei Betrachtung anderer Indikatoren – wie bspw. der Gewinnspanne oder der jährlichen Ausbautzahlen – weniger deutlich bzw. nicht mit erfasst.
- ▶ Auch im Fall von **Windkraft** schwankt der Policy-Mix-Indikator über die Zeit, aber er wird im betrachteten Zeitraum nie negativ. So zeigt sich zunächst ein Ansteigen der Policy-Mix-Attraktivität bis zum Jahr 2002, gefolgt von einem Einbruch, der seinen Tiefpunkt im Jahr 2005 erreicht. Nach einer Erholung in den Folgejahren erreicht der Indikator im Jahr 2009 annähernd die gleiche Höhe wie beim Maximum in 2002, fällt daraufhin aber erneut ab, jedoch bedeutend weniger dramatisch als der GRETCHEN-Policy-Mix-Indikator für die Photovoltaik [1].

Insgesamt lässt sich festhalten, dass ein übergeordneter Policy-Mix-Indikator eine sinnvolle Ergänzung im Rahmen des Monitoring der Energiewende sein kann, da er einen schnellen ersten Überblick über die Entwicklungen im Policy Mix bietet. Aufgrund der gemeinsamen Berücksichtigung von Zielen, Instrumenten und insbesondere auch von politischen Diskussionen und weichen Faktoren ist dieser GRETCHEN-Indikator in der Lage, sonst

schwer messbare Veränderungen des Policy Mixes zu erfassen. Gleichzeitig unterstreichen die jüngeren, drastischen negativen Veränderungen in der Wahrnehmung des Policy Mixes für Photovoltaik, die durch den GRETCHEN-Indikator deutlich werden und mit einer Abschwächung der Patentaktivität einhergehen, die Bedeutung eines breiter angelegten Policy-Mix-Verständnisses.

## 5 Übergeordnete Schlussfolgerungen für Politik und Forschung

Das GRETCHEN-Projekt hat zu einer Vielzahl von Erkenntnissen über die Wirkungszusammenhänge des Policy Mixes und Innovation bei erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien geführt, aber auch Wissenslücken offenbart. Daraus lassen sich die folgenden Empfehlungen für Politik und Forschung ableiten.

### 5.1 Politikempfehlungen

In den letzten Jahren gab es in Deutschland eine intensive politische Diskussion über die Förderung erneuerbarer Energien. Die Debatte ist dabei teils sehr auf das EEG verengt geführt worden. Dagegen verdeutlichen die GRETCHEN-Forschungsergebnisse, dass der Policy Mix mit all seinen Aspekten die Entwicklung und Verbreitung dieser Technologien in Deutschland gefördert hat. Für die zukünftigen politischen Herausforderungen bei der Transformation des Energiesystems lassen sich daraus drei übergeordnete Politikempfehlungen ableiten:

- ▶ Für eine erfolgreiche Gestaltung des technologischen Wandels im Energiesystem ist eine aufeinander abgestimmte Kombination von verschiedenen politischen Instrumenten unerlässlich. Es gilt den **Policy Mix als Ganzes** zu erfassen und zu gestalten – ein Abstellen auf nur ein Instrument ist nicht zielführend.
- ▶ Um eine lebhafte Innovationstätigkeit anzuregen, muss dieser Policy Mix **glaubwürdig und in sich möglichst konsistent** sein. Ohne einen starken politischen Willen für den grünen Wandel besteht hingegen Unsicherheit über die zukünftigen Marktentwicklungen, was langfristige Investitionen in Innovationen behindert und Deutschlands technologische Wettbewerbsfähigkeit bei den betrachteten Technologien gefährdet.
- ▶ Der Wandel hin zu erneuerbaren Erzeugungstechnologien ist ein zunehmend globaler Prozess, der in Zukunft eine deutlich **stärkere supranationale Abstimmung** des Policy Mixes erfordert. Dabei ist die Diskussion um die Energiewende in Deutschland vorrangig auf deren Vorteile – u. a. in Form von Exportchancen, Arbeitsplätzen und ihren Beitrag zu internationalem Klimaschutz und nachhaltiger Entwicklung auszurichten.

Diese drei großen Politikempfehlungen zu einem supranational ausgerichteten, konsistenten und glaubwürdigen Policy Mix und einem politischen Diskurs, der die Vorteile der Energiewende stärker betont, ergeben sich aus folgenden dezidierten Ergebnissen des GRETCHEN-Projekts und daraus abgeleiteten Empfehlungen:

Einer der zentralen Aspekte des Policy Mixes ist der **Instrumentenmix** zur Förderung erneuerbarer Energien, der technologiespezifisch und in den verschiedenen Phasen des Innovationsprozesses unterschiedlich wirkt. Dabei unterstützen sich nachfrageseitig orientierte Maßnahmen sowie technologiefördernde und systemische Instrumente gegenseitig. Beim Einsatz des Instrumentenmixes ist darauf zu achten, dass dieser die verschiedenen Phasen des Innovationsprozesses berücksichtigt und entsprechend die verschiedenen am Innovationsprozess beteiligten Zielgruppen wie Technologieentwickler, Hersteller und Nachfrager abdeckt.

- ▶ **Die Politik sollte den gesamten Instrumentenmix im Blick haben, und diesen auf den Innovationsprozess der jeweiligen Technologien abstimmen.**

**Nachfragefördernde Instrumente** wie das EEG haben eine positive Innovationswirkung, da sie für noch nicht wettbewerbsfähige Technologien ökonomische Renditen ermöglichen und damit einen Nischenmarkt schaffen, in dem sich die neuen Technologien weiterentwickeln und später im Wettbewerb mit anderen Technologien bestehen können. Die erwirtschafteten Gewinne können von den Herstellern in weitere Innovationstätigkeiten und den Ausbau der Produktionskapazität investiert werden. Dadurch lassen sich die Technologiekosten senken, was wiederum zu weiterem Ausbau führt und damit einen sich selbst verstärkenden Prozess in Gang setzt, der die momentanen Pfadabhängigkeiten im Energiesystem zu überwinden hilft.

- ▶ **Nachfrageförderung ist für die Transformation des Energiesystems essentiell, muss aber mit steigender Wettbewerbsfähigkeit der geförderten Technologien angepasst werden.**

Auch die **Förderung von Forschung und Entwicklung** ist für den grünen Wandel zentral. Technologieförderung ist dabei besonders effektiv, wenn sie als Verbundforschung ausgestaltet ist, systemische Aspekte des Innovationsprozesses abdeckt und über die Vernetzung unterschiedlicher Akteure den Zugang und Austausch von Wissen erleichtert. Dies gelingt indirekt über die spezifische nationale Ausgestaltung des Innovationssystems und kann zudem direkt über eine von der Politik angestoßene Förderung von Verbundforschung unterstützt werden. Die eingesetzten systemischen Instrumente müssen hierbei den Wissensaustausch nicht nur national, sondern gerade auch international berücksichtigen, damit Deutschland in einem schnelllebigen Technologieumfeld anschlussfähig bleibt.

- ▶ Die Forschungsförderung sollte durch systemische Instrumente den Wissensaustausch verbessern und dabei möglichst viele und unterschiedliche Akteure vernetzen.
- ▶ Der Zugang zu internationalem Wissen sollte verstärkt in den Fokus der Forschungs- und Innovationspolitik gerückt werden, etwa durch internationale Forschungsk Kooperationen oder Forschermobilität.

Die Konsistenz des Instrumentenmixes mit den gesetzten politischen Zielen für den Ausbau der erneuerbaren Energien und das **glaubwürdige politische Bekenntnis** Deutschlands zu diesen Ausbauzielen haben einen entscheidenden Einfluss auf die unternehmerischen Investitionen in Forschung und Entwicklung. Um im technologischen Wettbewerb bestehen zu können, ist ein langfristiger Planungshorizont erforderlich, u. a. gestützt durch stabile Langfristziele und vorhersehbare Instrumente. Wie das Beispiel des Atomausstiegs zeigt, senden diesbezüglich klare Ausstiegspläne eindeutige politische Signale zur Unterstützung grüner Nischentechnologien. Demgegenüber stellen das Fehlen eines klaren Ausstiegsplans aus der Kohleverstromung und die ausbleibende Stärkung des EU-Emissionshandels ungenutzte Möglichkeiten zur Demonstration eines starken politischen Willens zur Energiewende dar.

- ▶ Ein glaubwürdiges politisches Bekenntnis zur Energiewende hat einen entscheidenden Einfluss auf private Innovationstätigkeiten und sollte daher gestärkt werden.
- ▶ Für eine hohe Glaubwürdigkeit und Konsistenz des Policy Mixes bedarf es nicht nur politischer Ziele und Instrumente zur Förderung der erneuerbaren Energien, sondern auch Instrumente für den geregelten Ausstieg aus den klimaschädlichen Konkurrenztechnologien.

Der Effekt des deutschen Policy Mixes auf die **Marktentwicklung im Ausland** und umgekehrt sollte angesichts globaler Lernkurven nicht mehr unterschätzt werden. Die globale Perspektive ist sehr wichtig, um die gesamtwirtschaftlichen Effekte des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien umfassend zu verstehen, gerade auch für die anstehende Phase der Integration in die Energiemärkte. Bisher lässt sich festhalten, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland zwar zu unterschiedlichen Verteilungseffekten geführt hat, die gesamtwirtschaftlichen Nettowirkungen mit Blick auf Wachstum und Arbeitsplätze aber positiv ausfallen.

- ▶ Die Politik muss die aus der Energiewende resultierende Stärkung von Wirtschaft und Wohlstand deutlicher im politischen Diskurs hervorheben.
- ▶ Der deutsche Policy Mix sollte stärker auf die Vorteile des weiteren Ausbaus abzielen, die sich aus der Erschließung neuer Märkte und den resultierenden gesamtwirtschaftlichen Effekten ergeben.

Der weltweite Ausbau erneuerbarer Energien ist **klimapolitisch** und zur Erreichung der post-2015-Entwicklungsziele von großer Bedeutung, da er die Kohlenstoffintensität globaler Produktionsketten reduziert und über Skalen- und Lerneffekte die Technologiekosten senkt. Dadurch ermöglicht er gerade Ländern, die ihre Stromversorgung (noch) ausbauen, einen preiswerteren Zugang zu erneuerbaren Energien. Die Existenz kostengünstiger erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien stellt zudem einen zentralen Baustein für den Klimagipfel in Paris dar. Voraussetzung für die fortgesetzte Reduktion von Technologiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen ist dabei die Schaffung und Stärkung globaler Märkte für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien.

- ▶ Deutschland muss sich für ein glaubwürdiges internationales Klimaabkommen mit ambitionierten und langfristigen Zielvorgaben einsetzen, das klare Signale für die Dekarbonisierung des globalen Energiesystems setzt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der in Deutschland und global eingeschlagene grüne Wandel im Bereich der Stromerzeugungstechnologien in die richtige Richtung weist, aber angesichts ambitionierter Energie- und Klimaschutzziele und der vielen Vorteile weiter verstärkt werden muss. Allerdings hat sich das **Innovationsklima** für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien in Deutschland seit dem Jahr 2011 **verschlechtert**. Dies belegen bspw. die verhaltene Entwicklung von Patentanmeldungen deutscher Erfinder und der technologischen Wettbewerbsfähigkeit, die rückläufigen Innovationsausgaben

deutscher Hersteller erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien und die rasanten technologischen Aufholprozesse insbesondere asiatischer Länder. Um weiterhin technologisch zur Weltspitze zu zählen, sollten diese Warnsignale ernst genommen und notwendige Anpassungen am Policy Mix vorgenommen werden.

- ▶ **Es wird ein dezidiertes Monitoring des deutschen Innovationsklimas für die Energiewende benötigt, um frühzeitig negative Entwicklungen zu erkennen.**
- ▶ **Um den deutschen Innovationsmotor nicht auszu-bremsen, sollten zeitnah Maßnahmen ergriffen werden, welche die Vorteile aus der Transformation des Energiesystems erhalten und weiter ausbauen.**

## 5.2 Forschungsempfehlungen

Die im Rahmen von GRETCHEN durchgeführten empirischen Arbeiten haben umfassend zu neuen Erkenntnissen über das Zusammenwirken verschiedener Instrumente und des Policy Mixes insgesamt geführt. Allerdings mussten einige Fragen zur Wirkung des Policy Mixes auf den technologischen und strukturellen Wandel unbeantwortet bleiben. Daraus lassen sich zwei zentrale Empfehlungen für die zukünftige Forschung in den Bereichen Ökonomie des Klimawandels, der ökonomischen Evaluation der Energiewende und der Umweltinnovationen ableiten:

- ▶ Eine **bessere Datenbasis** ist für weiterführende Forschungsarbeiten unabdingbar, sodass es zunächst gilt, die nationalen und internationalen Datenlücken zu schließen (insb. längere Zeitreihen, Unternehmensdaten).
- ▶ Die Wirkungsanalyse von Policy Mixes sollte auf **weitere Länder und Sektoren** ausgeweitet werden, wofür quantitative und qualitative Forschungsmethoden zu kombinieren und weiterzuentwickeln sind.

Für die wissenschaftliche Forschung und die systematische Evaluation politischer Instrumente und des Policy Mixes insgesamt spielt die **Verfügbarkeit von Daten** eine essentielle Rolle. Insbesondere werden längere Zeitreihen benötigt, um die Entwicklung und den Einfluss der Politikmaßnahmen quantitativ besser fassen zu können. Es empfiehlt sich daher eine Erweiterung der „Erneuerbare Energien in Zahlen“ um wichtige Kenngrößen zur Quantifizierung des Policy Mixes und seiner Wirkung. Hierzu zählen bspw. Im- und Exporte von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, Stromgestehungskosten der verschiedenen Technologien, die Stärke des politischen Willens und die Konsistenz des Policy Mixes. Die Bereitstellung solcher Daten würde das Monitoring des Innovationssystems im Bereich der erneuerbaren Energien deutlich verbessern und damit wichtige Informationen an alle Akteure im Innovationssystem liefern. Dies gilt nicht nur für Deutschland, sondern ebenso für andere Staaten, da sich viele Aussagen zur Wirkung des deutschen Policy Mixes nur unter Einbeziehung der internationalen Politik- und Marktentwicklungen hinreichend analysieren lassen.

Als besonders vielversprechendes Messinstrument zur Erhebung von Daten zum Zusammenhang von Policy Mix und Innovation hat sich die GRETCHEN-Befragung unter Herstellern erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien erwiesen. Diesbezüglich ergeben sich drei zukünftige Forschungsrichtungen: Erstens empfiehlt sich der Aufbau einer periodischen **Innovationsbefragung** unter Herstellern und Zulieferern aller Technologien, die im Rahmen der Energiewende relevant sind. Zweitens sollte die GRETCHEN-Befragung auch in anderen bedeutenden Herstellerländern mit unterschiedlichen Policy Mixes durchgeführt werden, um insbesondere die Innovationswirkung der Konsistenz, Glaubwürdigkeit und Kohärenz besser einordnen zu können. Drittens sollten gängige Innovationsbefragungen, wie bspw. die Europaweite Innovationserhebung, um Fragen zum Policy Mix ergänzt werden, um auch für andere Sektoren die Bedeutung politischer Bestimmungsfaktoren des grünen Wandels besser zu verstehen.

Da sich die Messung von Innovation und technologischem Wandel seit jeher schwierig gestaltet, wurden im Rahmen des GRETCHEN-Projektes **verschiedene Indikatoren für technologischen und strukturellen Wandel** zusammengestellt und ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Wahl



der Kenngröße erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Es empfiehlt sich daher, auch in zukünftigen Studien und Evaluationen auf eine Vielzahl von Innovationsindikatoren abzustellen, um ein ganzheitliches Bild zu ermöglichen. Aufgrund der schwierigen Datenlage und der hohen Komplexität sollten dabei verstärkt Forschungsansätze zum Einsatz kommen, die quantitative und qualitative Analysen kombinieren, um die Wirkungszusammenhänge dadurch besser verstehen zu können. Darüber hinaus sind **neue Ansätze oder Methoden** zur Erfassung des Einflusses verschiedener Politikmaßnahmen bzw. multipler Faktoren zu entwickeln, die speziell auf deren Zusammenwirken abzielen oder für bestimmte Phasen des Innovationsprozesses geeignet sind.

Die **Entwicklung von gesamtwirtschaftlichen Modellen**, welche die komplexen Zusammenhänge auch auf der internationalen Ebene und das Zusammenspiel von nationaler Politikgestaltung und globalen Entwicklungen angemessen abbilden und so auch nationale Politik bei ihren Entscheidungen unterstützen können, bleibt eine enorme Herausforderung. Mikro- und makroökonomische

Betrachtungen sind verstärkt zu integrieren, um die Wirkungszusammenhänge besser darstellen zu können. Dabei sollten die Entwicklungen in zentralen Märkten für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien verstärkt beobachtet werden.

Insgesamt gibt es eine Reihe von **Anwendungsmöglichkeiten** des entwickelten Policy-Mix-Konzepts. Hierzu zählen die Ausdehnung der Analysen auf weitere sich entwickelnde Technologien (z. B. komplementäre Klimaschutztechnologien wie Speicher, Brennstoffzellen und Energieeffizienztechnologien) und auf andere Märkte und Länder (z. B. Asien, USA). Bei Windkraft und Photovoltaik könnte die Analyse auf Nischen oder Teile der Wertschöpfungskette ausgeweitet werden, die für deutsche Unternehmen aufgrund von Komplexität oder Marktnähe Zukunftschancen bieten. Übergeordnetes Ziel dabei ist stets, aus dem generierten besseren Verständnis über die Wirkungsweise des Policy Mixes im Innovationssystem Politikempfehlungen zur Lenkung und Beschleunigung des grünen Wandels abzuleiten.





# Projektveröffentlichungen

- [1] **Boedeker, P. und Rogge, K.S. (2015):** Revisiting the link between policy and innovation: insights from novel policy mix indicators for the case of solar PV and wind in Germany. Working Paper Sustainability and Innovation, S13/2015. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [2] **Breitschopf, B. (2015):** Policy mix and the impact on technologies and industry: The challenge – how to make policies quantifiable? Working Paper Sustainability and Innovation, S06/2015. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [3] **Breitschopf, B. (2015):** Impacts of policies on market formation and competitiveness – The case of the PV industry in Germany. Working Paper Sustainability and Innovation, S10/2015, Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [4] **Cantner, U., Graf, H., Herrmann, J. und Kalthaus, M. (2014):** Inventor Networks in Renewable Energies: The Influence of the Policy Mix in Germany, Jena Economic Research Papers 2014-034. Jena: Universität Jena.
- [5] **Graf, H. und Kalthaus, M. (2015):** International Collaboration Networks in Photovoltaic Research, Vortrag bei der EMAEE-Konferenz in Maastricht, Juni 2015.
- [6] **Herrmann, J. und Töpfer, S. (2014):** Structural similarity and dependency of research networks in the German PV-industry. Vortrag auf der 14. IAEE European Energy Konferenz in Rom, Oktober 2014.
- [7] **Lutz, C., Flaute, M., Lehr, U. und Wiebe K.S. (2015):** Economic impacts of renewable power generation and the role of endogenous technological change. GWS Discussion Paper 15/9, Osnabrück: GWS.
- [8] **Mattes, K., Müller, S., Jäger, A., Weidner, N. und Weißfloch, U. (2014):** Adoption and Diffusion of Renewable Energy Technologies: Influence of the Policy Mix in the Manufacturing Industry. Working Paper Sustainability and Innovation, S6/2014. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [9] **Reichardt, K. und Rogge, K.S. (2014):** How the policy mix and its consistency impact innovation: findings from company case studies on offshore wind in Germany. Working Paper Sustainability and Innovation, S7/2014. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [10] **Reichardt, K., Negro, S., Rogge, K.S. und Hekkert, M. (2015):** Analyzing interdependencies between policy mix and technological innovation systems: the case of offshore wind in Germany. Innovation Studies Utrecht (ISU) Working Paper Series, ISU Working Paper #15.04. Utrecht: Universiteit Utrecht.
- [11] **Reichardt, K., Rogge, K.S. und Negro, S. (2015):** Unpacking policy processes for addressing systemic problems: The case of offshore wind in Germany. Working Paper Sustainability and Innovation, S2/2015. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [12] **Rogge, K.S. (2015):** Innovationsaktivitäten von Herstellern erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien. Deskriptive Ergebnisse der GRETCHEN-Unternehmensbefragung April – Juli 2014. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [13] **Rogge, K.S. und Duetschke, E. (2015):** Why do they believe in it? An investigation into the determinants of policy mix credibility for the case of manufacturers of renewable power generation technologies in Germany. Poster bei der 6. Internationalen Konferenz für Nachhaltigkeitstransformationen (IST), August 2015. Brighton: University of Sussex.
- [14] **Rogge, K.S. und Reichardt, K. (2013):** Towards a more comprehensive policy mix concept for environmental technological change: a literature synthesis. Working Paper Sustainability and Innovation, S3/2013. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [15] **Rogge, K.S. und Reichardt, K. (2015):** Going Beyond Instrument Interactions: Towards a More Comprehensive Policy Mix Conceptualization for Environmental Technological Change. SPRU Working Paper Series (SWPS), 2015-12: 1-47.
- [16] **Rogge, K.S. und Schleich, J. (2015):** Do policy mix characteristics matter for (eco-)innovation? A survey-based exploration for manufacturers of renewable power generation technologies in Germany. Vortrag bei der 5. Konferenz des Eu-SPRI-Forums in Helsinki, Juni 2015.
- [17] **Weißfloch, U., Müller, S. und Jäger, A. (2013):** Wie grün ist Deutschlands Industrie wirklich? Verbreitung von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger im Verarbeitenden Gewerbe. PI-Mitteilung 64. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- [18] **Wiebe, K.S., und Lutz, C. (2015):** Green change – renewable power generation in an input-output framework. GWS Discussion Paper 15/13, Osnabrück: GWS.
- [19] **Wiebe, K.S. (2015):** The impact of renewable energy diffusion on European consumption-based emissions. Vortrag auf der 23. IIOA Konferenz in Mexico City, Juni 2015.
- [20] **Wiebe, K.S. und Lutz, C. (2013):** The Renewable Power Generation Module (RPGM) – An extension to the GWS model family to endogenize technological change in the renewable power generation sector. GWS Discussion Paper 13/7, Osnabrück: GWS.
- [21] **Wiebe, K.S. und Lutz, C. (2014):** Analyzing the consistency of the policy mix for renewable energy technologies on the macro-level. Vortrag bei der IAEE Konferenz in Rom, Oktober 2014.
- [22] **Zhu, L. (2015):** What Drove the Development of China's PV Industry in 2006–2012? Working Paper. Beijing, Karlsruhe: IPM, Fraunhofer ISI.

# Partner

Das **Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI** analysiert Entstehung und Auswirkungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

**Folgende Wissenschaftler/innen haben am Projekt mitgearbeitet:**

*Karoline S. Rogge (Gesamtprojektleitung), Barbara Breitschopf, Paul Boedeker, Kristin Reichardt, Katharina Mattes, Joachim Schleich, Elisabeth Dütschke, Angela Jäger, Nadezda Weidner, Simon Müller, Ute Weißfloch, und Franziska Borkel.*

Die **Friedrich-Schiller-Universität Jena** ist Thüringens einzige Volluniversität. 1558 gegründet, verfügt sie heute über ein breites Angebot mit mehr als 200 Studienmöglichkeiten, in denen rund 19.000 Studierende eingeschrieben sind. Die Forschung der Universität Jena orientiert sich an den Leitlinien „Light – Life – Liberty“ und zeichnet sich durch eine hohe Forschungsdynamik aus. Traditionell pflegt sie einen interdisziplinär angelegten Arbeitsstil sowie eine intensive Vernetzung mit außeruniversitären Forschungsinstituten und der Wirtschaft. Mit ihrer bundesweit als beispielhaft anerkannten Graduierten-Akademie setzt die Universität Jena auf optimale Qualifikation und höchste Qualitätsstandards in der wissenschaftlichen Ausbildung.

**Folgende Wissenschaftler haben am Projekt mitgearbeitet:**

*Uwe Cantner (Projektleitung), Holger Graf, Johannes Herrmann, Martin Kalthaus und Stefan Töpfer*

Die **Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) mbH** ist ein unabhängiges, privates Wirtschaftsforschungs- und Politikberatungsunternehmen. Ihr Ziel ist die Begleitung gesellschaftlicher Transformations- und Entwicklungsprozesse durch eine sachorientierte, vorurteilsfreie und faktenbasierte Beratungstätigkeit. Im Kern der Tätigkeit steht die Entwicklung und Anwendung von Datensystemen und empirisch fundierten ökonomischen Modellen, die wirtschaftliche Zusammenhänge auf unterschiedlichen Skalen transparent abbilden. Vielfältigen Fragen der Energie-, Klima- und Umweltökonomie sowie -politik werden bearbeitet.

**Folgende Wissenschaftler/innen haben am Projekt mitgearbeitet:**

*Christian Lutz (Projektleitung), Kirsten Wiebe, Markus Flaute und Ulrike Lehr.*

[www.projekt-gretchen.de](http://www.projekt-gretchen.de)



## Impressum

### Das

**Fraunhofer-Institut für  
System- und Innovationsforschung ISI**  
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe  
Telefon +49 721 6809-0 | Fax +49 721 689152

ist eine rechtlich nicht selbständige Einrichtung der  
Fraunhofer-Gesellschaft  
zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Hansastraße 27 c | 80686 München  
**www.fraunhofer.de**

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer gemäß § 27 a  
Umsatzsteuergesetz: DE 129515865  
Registergericht  
Amtsgericht München  
Eingetragener Verein  
Register-Nr. VR 4461

**Internetseite des GRETCHEN-Projekts**  
<http://www.projekt-gretchen.de/>

**Verantwortliche Redakteurin**  
Dr. Karoline S. Rogge

### Kontakt

Brigitte Kallfaß  
Phone: +49 721 6809-150  
E-Mail: [brigitte.kallfass@isi.fraunhofer.de](mailto:brigitte.kallfass@isi.fraunhofer.de)

### Gestaltung

design.ideo, Büro für Gestaltung, Erfurt

### Druck

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

### Bildnachweise

Seite 1: Thomas Bethge/Fotolia.com;  
Seite 8: stockWERK/Fotolia.com; Seite 13: industrieblick/  
Fotolia.com; Seite 41: Thaut Images/Fotolia.com

### Förderung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde  
mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und  
Forschung (BMBF) im Förderschwerpunkt „Ökonomie  
des Klimawandels“ unter dem Förderkennzeichen Econ-  
C-026 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt bei den Autor/inn/en.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

