

# Erneuerbare Energien aus Sicht der Innovationsforschung

Konzeptionelle und empirische Grundlagen einer innovationsorientierten Ausgestaltung der Politik zur Förderung erneuerbarer Energietechnologien

Rainer Walz

Mario Ragwitz



Fraunhofer-Institut für  
System- und Innovationsforschung ISI

ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«

Rainer Walz, Mario Ragwitz

# Erneuerbare Energien aus Sicht der Innovationsforschung

Konzeptionelle und empirische Grundlagen einer  
innovationsorientierten Ausgestaltung der Politik zur  
Förderung erneuerbarer Energietechnologien

FRAUNHOFER VERLAG

**Ansprechpartner:**

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe  
Telefon 07 21 68 09-0  
Telefax 07 21 68 91 52  
E-Mail [info@isi.fraunhofer.de](mailto:info@isi.fraunhofer.de)  
URL [www.isi.fraunhofer.de](http://www.isi.fraunhofer.de)

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

ISSN: 1612-7455

ISBN: 978-3-8396-0318-5

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2011

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## **Vorwort**

Ohne die systematische Steigerung des Einsatzes erneuerbarer Energien gibt es keine nachhaltige Entwicklung. Durch Aktivitäten treibender Kräfte in Wissenschaft, Politik, Wirtschaft, gesellschaftlichen Organisationen und vieler Einzelpersonen ist es in Deutschland gelungen, den Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromgewinnung von rund 17 TWh (Mrd. kWh) im Jahr 1990 auf rund 37 TWh im Jahr 2000 und rund 102 TWh im Jahr 2010 zu steigern. Bis zum Jahr 2020 soll sich ihr Anteil gegenüber 2010 auf mindestens 35 Prozent verdoppeln. Hierfür sollen die erneuerbaren Energien konsequent ausgebaut und die Energieeffizienz weiter erhöht werden mit dem Ziel, dass die erneuerbaren Energien danach den Hauptanteil an der Energieversorgung übernehmen.

Damit diese Ziele möglichst zügig erreicht werden können, sind weitere Innovationschübe erforderlich. Umso wichtiger wird es, innovationsfreundliche Rahmenbedingungen wie das EEG zu erhalten und weitere zu schaffen, wissenschaftlich-technische Weiterentwicklungen mit organisatorischen und institutionellen Innovationen zu verknüpfen und Innovation und Diffusion erneuerbarer Energietechnologien noch besser miteinander zu verzahnen.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fördert die Erforschung und Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien, unterstützt vom Projektträger Jülich (PTJ). Nicht nur technische Fortschritte bestimmen ihren weiteren Ausbau. Auch politische, ökonomische, ökologische und soziale Rahmenbedingungen und Impulse sind zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund unterstützt das BMU bereits seit einigen Jahren Projekte im Bereich von Querschnittsaktivitäten, Systemstudien und übergreifenden Forschungsvorhaben für den anstehenden Transformationsprozess zu einer Energieversorgung mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien.

Das Wissen um die innovationsfreundliche Ausgestaltung der Rahmenbedingungen und neue Ansätze zur Abschätzung der künftigen Innovationsdynamik stellen wichtige Querschnittsfragen dar. Gleichzeitig kommt der technologischen Positionierung Deutschlands und den damit verbundenen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Chancen eine hohe Bedeutung für die zielgerichtete Ausgestaltung der Politiken zu. Das renommierte Fraunhofer ISI gehört zu den führenden europäischen Innovationsforschungsinstituten. Es weist gleichzeitig hervorragende Kompetenzen im Bereich der erneuerbaren Energien auf, die es seit vielen Jahren in die deutsche und europäische Politikdiskussion einbringt. Mit diesen Förderaktivitäten konnten die Grundlagen zur Erarbeitung der hier vom Fraunhofer ISI vorliegenden Publikation geschaffen werden,

die die Innovationsforschung mit den spezifischen Fragestellungen erneuerbarer Energietechnologien verbindet.

MinR Dr. Wolfhart Dürschmidt

Leiter des Referats „Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der Erneuerbaren Energien“ im BMU

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Konzeptionelle Zusammenhänge und Weiterentwicklungen.....</b>	<b>3</b>
2.1	Einflussfaktoren für Innovationen.....	3
2.1.1	Technologieorientierte und unternehmensinterne Faktoren .....	4
2.1.1.1	Forschung, Entwicklung und technologiegebundenes Lernen .....	4
2.1.1.2	Unternehmensinterne Faktoren .....	6
2.1.1.3	(Ko-) Evolutorische Prozesse .....	8
2.1.1.4	Autonomer technischer Wandel und der Einfluss der Zeit.....	12
2.1.2	Marktorientierte Faktoren.....	13
2.1.2.1	Änderungen der relativen Preise .....	13
2.1.2.2	Marktkonzentration .....	14
2.1.2.3	Nachfrage .....	15
2.1.3	Regulierung und Wahl der Politikinstrumente als Bestimmungsfaktor .....	16
2.1.3.1	Ökonomische Instrumente .....	17
2.1.3.2	Ordnungsrechtliche Maßnahmen.....	18
2.1.3.3	Jenseits einzelner Politikinstrumente: Politikstile.....	20
2.1.3.4	Empirische Ergebnisse zur Bedeutung der Instrumentenwahl .....	20
2.2	Innovationen bei Erneuerbaren Energietechnologien im Rahmen des Innovationssystemansatzes .....	22
2.2.1	Konzeption der „Systems of Innovation“ .....	22
2.2.2	Beeinflussung der Funktionen eines Innovationssystems .....	24
2.2.3	Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse.....	26
2.3	Bestimmungsgründe für First-Mover-Vorteile .....	28
2.3.1	Bedeutung und Begriffsbestimmung.....	28
2.3.2	Technologiebezogene Faktoren auf der Angebotsseite .....	30
2.3.3	Marktkontextfaktoren der Nachfrage.....	32
2.3.4	Regulierungsbedingte Faktoren.....	34
2.3.5	Faktoren für Wissensspillover.....	36

2.3.6	Ansätze für die empirische Modellierung.....	39
2.4	Zusammenfassung der konzeptionellen Ergebnisse.....	48
<b>3</b>	<b>Technologische Leistungsfähigkeit bei erneuerbaren Energietechnologien.....</b>	<b>53</b>
3.1	Methodik und Indikatoren .....	53
3.2	Empirische Ergebnisse zur Innovationsdynamik von Erneuerbaren Energietechnologien.....	59
3.3	Technologische Leistungsfähigkeit einzelner Länder bei Erneuerbaren Energietechnologien.....	61
<b>4</b>	<b>Ableitung von Hinweisen für eine innovationsorientierte Gestaltung der Förderpolitik.....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>75</b>
A.1	Anhang .....	87
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>107</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Innovation entlang einer technologischen Trajektorie .....	11
Abbildung 2-2:	Heuristisches Schema eines Innovationssystems .....	23
Abbildung 2-3:	Schema einer Innovationssystemanalyse .....	25
Abbildung 2-4:	Wirkungsgraph der Systembeziehungen im Lead-Market Modell zur Bestimmung der Exportanteile erneuerbarer Energietechnologien .....	43
Abbildung 2-5:	Modellstruktur des systemdynamischen Lead-Market- Modells .....	45
Abbildung 2-6:	Überblick über die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für die Exportanteile Deutschlands bei Windkraftanlagen .....	47
Abbildung 3-1:	Künftige Kosten-Degression bei Erneuerbaren Energietechnologien auf Basis von Erfahrungskurven .....	60
Abbildung 3-2:	Entwicklung der Patentdynamik bei Erneuerbaren Energietechnologien (1991 = 100).....	61
Abbildung 3-3:	Literatur-, Patent- und Welthandelsanteil bei Erneuerbaren- Energie-Technologien im Jahr 2007 .....	62
Abbildung 3-4:	Entwicklung des Patentanteils bei Erneuerbaren-Energie- Technologien für ausgewählte Länder.....	63
Abbildung 3-5:	Patentintensität bei Erneuerbaren-Energie-Technologien für ausgewählte Länder .....	63
Abbildung 3-6:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Erneuerbaren- Energie-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA .....	64
Abbildung 3-7:	Entwicklung der Patentanteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien .....	66
Abbildung 3-8:	Spezialisierung von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbar-Energien-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA .....	66
Abbildung 4-1:	Öffentliche FuE-Aufwendungen für Erneuerbare Energien in IEA-Ländern.....	68
Abbildung 5-1:	Innovationssystem für Technologien für erneuerbare Energien .....	77

---

Abbildung 5-2:	Innovationsindikatoren im Bereich von Technologien für erneuerbare Energien für ausgewählte Länder in 2007 .....	79
Abbildung 5-3:	Spezialisierung Deutschlands im Bereich von Technologien für erneuerbare Energien im Jahr 2007 .....	80
Abbildung 5-4:	Systemdynamisches Modell zur Projektion der Exportanteile von Windkraftanlagen.....	82
Abbildung A-1:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Erneuerbaren-Energie-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA.....	87
Abbildung A-2:	Patent- und Welthandelsanteil bei Biokraftstoffen im Jahr 2007 .....	87
Abbildung A-3:	Entwicklung des Patentanteils bei Biokraftstoffen für ausgewählte Länder .....	88
Abbildung A-4:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Biokraftstoffen mit Hilfe des RPA und RWA.....	88
Abbildung A-5:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Biokraftstoffen mit Hilfe des RPA und RCA.....	89
Abbildung A-6:	Patent- und Welthandelsanteil bei Photovoltaik (PV) im Jahr 2007 .....	89
Abbildung A-7:	Entwicklung des Patentanteils bei PV für ausgewählte Länder .....	90
Abbildung A-8:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei PV mit Hilfe des RPA und RWA.....	90
Abbildung A-9:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei PV mit Hilfe des RPA und RCA .....	91
Abbildung A-10:	Patent- und Welthandelsanteil bei Solarthermie im Jahr 2007 .....	91
Abbildung A-11:	Entwicklung des Patentanteils bei Solarthermie für ausgewählte Länder .....	92
Abbildung A-12:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Solarthermie mit Hilfe des RPA und RWA.....	92
Abbildung A-13:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Solarthermie mit Hilfe des RPA und RCA.....	93
Abbildung A-14:	Patent- und Welthandelsanteil bei Wasserkraft-Technologien im Jahr 2007 .....	93

---

Abbildung A-15:	Entwicklung des Patentanteils bei Wasserkraft-Technologien für ausgewählte Länder.....	94
Abbildung A-16:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Wasserkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA.....	94
Abbildung A-17:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Wasserkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA .....	95
Abbildung A-18:	Patent- und Welthandelsanteil bei Windkraft-Technologien im Jahr 2007 .....	95
Abbildung A-19:	Entwicklung des Patentanteils bei Windkraft-Technologien für ausgewählte Länder .....	96
Abbildung A-20:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Windkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA.....	96
Abbildung A-21:	Spezialisierung ausgewählter Länder bei Windkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA .....	97
Abbildung A-22:	Anteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien.....	97
Abbildung A-23:	Entwicklung der Patentanteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien .....	98
Abbildung A-24:	Spezialisierung von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbar-Energien-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA .....	98

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zusammenhang von staatlicher Regulierung und den Funktionen eines Innovationssystems.....	28
Tabelle 3-1:	Typischerweise in Studien zu erneuerbaren Energietechnologien berichtete Lernraten.....	59
Tabelle A-1:	Lernraten von Biomasse Technologien .....	99
Tabelle A-2:	Lernraten von Geothermie- Technologien.....	100
Tabelle A-3:	Lernraten von Wasserkraft-Technologien .....	100
Tabelle A-4:	Lernraten von Gezeiten-Technologien .....	101
Tabelle A-5:	Lernraten von PV-Technologien.....	102
Tabelle A-6:	Lernraten von Solarthermie-Technologien .....	104
Tabelle A-7:	Lernraten von Windkraft-Technologien .....	105

## 1 Einführung

Die Bedeutung erneuerbarer Energien für den Klimaschutz und die Ressourcenschonung sind genauso unbestritten wie die Notwendigkeit weiterer Innovationen in diesem Bereich. Bisher gibt es aber ein Defizit bei der Aufarbeitung und der Einbeziehung der Erkenntnisse der Innovationsforschung in die Politikdiskussion. Insbesondere haben sich in den letzten Jahren erhebliche Weiterentwicklungen in der Innovationsforschung ereignet, die in der klimapolitischen Diskussion bisher wenig wahrgenommen werden, obwohl sie für die Begründung und das Verständnis gerade von Systeminnovationen wie den Umbau des Energiesystems hin in Richtung erneuerbarer Energien von zentraler Bedeutung sind.

Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens<sup>1</sup> ist die Aufarbeitung des Kenntnisstands zu den Schnittstellen von "Innovation und erneuerbare Energien". Zunächst soll durch die Analyse der konzeptionellen Zusammenhänge den zentralen deutschen Akteuren die wichtigsten Faktoren aufgezeigt werden, von denen eine hohe Innovationsdynamik abhängt, um ihnen damit Hilfestellung für eine frühzeitige Orientierung in ihrer strategischen Positionierung zu ermöglichen. Der Schnittstelle zwischen erneuerbaren Energien und Innovationsforschung wird sich von zwei Seiten genähert: Einmal wird auf die Behandlung von Aspekten innerhalb der erneuerbaren Energien Community eingegangen, die implizit eine hohe Affinität zu Innovationen haben. Dies betrifft insbesondere die Diskussion um künftige Kostenreduktionen, wie sie mit dem Konzept der Erfahrungskurven thematisiert wird. Zum anderen wird an den Entwicklungen der Innovationsforschung angesetzt, und die daraus folgenden Konsequenzen auf den Anwendungsfall erneuerbare Energietechnologien herunter gebrochen. Diese Konsequenzen beziehen sich sowohl auf die wichtigsten Faktoren, die die Innovationsdynamik beeinflussen, als auch auf die Auswirkungen, die diese auf den Außenhandel mit erneuerbaren Energietechnologien nach sich ziehen.

Im empirischen Teil des Forschungsvorhabens werden Innovationsindikatoren zu den erneuerbaren Energien erhoben und aktualisiert, ökonometrische Analysen über die Bestimmungsgründe der Innovationsaktivität bei erneuerbaren Energietechnologien vorgestellt sowie Ansätze für eine empirische Modellierung von First-Mover-Vorteilen und darauf basierenden Exporterfolgen erprobt.

Diese Publikation folgt dieser Aufgabenstellung: Im Kapitel über die konzeptionellen Zusammenhänge werden drei unterschiedliche Themenkomplexe angegangen: Zu-

---

<sup>1</sup> Das dieser Publikation zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt unter dem Förderkennzeichen 0327651 gefördert.

nächst werden die Einflussfaktoren von Innovationen diskutiert. Danach wird das Konzept der Innovationssysteme vorgestellt, auf die Spezifika erneuerbarer Energiesysteme herunter gebrochen und durch ökonometrische Untersuchungen hinsichtlich der Verallgemeinerbarkeit der zentralen Schlussfolgerungen auf eine empirisch breitere Basis gestellt. Schließlich widmet sich der dritte Themenkomplex den Zusammenhängen zwischen Innovation und Außenhandelserfolgen. Nach einer Diskussion des Konzeptes der First-Mover-Vorteile wird ein erster systemdynamischer Modellierungsansatz vorgestellt, mit dem sich die Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf die Technologieexporte im Kontext des Innovationssystems simulieren lassen.

Das Kapitel über die Innovationsdynamik und die technologische Leistungsfähigkeit einzelner Länder bei erneuerbaren Energietechnologien ist ebenfalls empirisch geprägt. Zunächst werden entsprechende Innovationsindikatoren und zugehörige Messkonzepte vorgestellt. Danach wird die Innovationsdynamik im Bereich erneuerbarer Energien mit Hilfe von Patentindikatoren sowie einer Übersicht über die sich mit dem Konzept der Erfahrungskurven ergebenden Lernraten analysiert. Schließlich erfolgt eine ländervergleichende Analyse der technologischen Leistungsfähigkeit bei erneuerbaren Energietechnologien. Die sich aus diesen Analysen ergebenden Hinweise für die innovationsorientierte Ausgestaltung der Förderpolitik werden in einem weiteren Kapitel vorgestellt. Die Publikation schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und der Identifizierung weiterer Forschungsfragen.

## 2 Konzeptionelle Zusammenhänge und Weiterentwicklungen

### 2.1 Einflussfaktoren für Innovationen

Die Einflussfaktoren für neue Technologien – und damit auch für Erneuerbare Energietechnologien – sind äußerst vielfältig. Zu diskutieren sind hier zum einen die Faktoren, die für Innovationen allgemein relevant sind, zum anderen die Faktoren, die dafür ausschlaggebend sind, dass eine bestimmte Innovations*richtung* eingeschlagen wird. Hierbei werden auch die Einflussfaktoren bezüglich der Zielrichtung Umweltfreundlichkeit ausgewertet, die auf Grund der ähnlichen Zielrichtung eine hohe Relevanz auch für erneuerbarer Energietechnologien aufweisen. Daraus ergibt sich ein sehr breites Bündel an relevanten Erklärungsansätzen, deren theoretische Grundlagen sich zum Teil stark (bis hin zur Unvereinbarkeit) unterscheiden. Im Folgenden wird nach der Art der Bestimmungsfaktoren unterteilt. Dies erleichtert den Bezug zur Literatur, die die Relevanz der Bestimmungsfaktoren für verschiedene Phasen im Innovationsprozess (Sartorius/Zundel 2005) oder nach Ausmaß der Neuerung (radikal oder inkrementell; technologischer Regimewechsel oder Wandel entlang einer technologischen Trajektorie; vgl. Dosi 1982) differenziert. Damit soll eine gewisse Politiknähe der Darstellung erreicht werden. Dies wird allerdings damit erkauft, dass sich Bestimmungsfaktoren, die sich aus einer bestimmten Theorierichtung (z. B. Hypothese der induzierten Innovation) ableiten, auf unterschiedliche Abschnitte verteilen.

Bereits Schmookler (1966) unterschied zwischen „technology push“ und „demand pull“ Faktoren und auch neuere Forschung hält diese Kategorien noch für relevant (Rennings 2000; Pavitt 1984). Beide Kategorien werden hier deshalb aufgegriffen, jedoch deutlich erweitert. Im Abschnitt 2.1.1 werden unter technologieorientierten Faktoren FuE-Investitionen, Lerneffekte aber auch ko-evolutorische Prozesse und autonomer technischer Wandel behandelt und um unternehmensinterne Faktoren ergänzt. Im Abschnitt 2.1.2 werden unter marktorientierten Faktoren relative Preisänderungen, Marktstruktur und Nachfrage (im Sinne von demand pull) dargestellt. Regulatorischen Faktoren wird für Innovationen bei erneuerbaren Energien eine besondere Relevanz zugesprochen, da die Etablierung der Nachfrage essenziell von der Umweltregulierung abhängt (vgl. Blind et al. 2004; Beise/Rennings 2005) und der zentral betroffene Infrastruktorsektor Energie – und hier insbesondere die Elektrizitätswirtschaft - auch nach einer Liberalisierung der Märkte noch immer einen sektoralen Regulierungsbedarf aufweisen, so dass eine "triple regulatory challenge" besteht (Walz 2007). Der Regulierung als Bestimmungsfaktor ist deshalb ein eigener Abschnitt (vgl. Abschnitt 2.1.3)

gewidmet. Der Innovationssystemansatz, der diese unterschiedlichen Perspektiven integriert, wird allerdings erst im sich anschließenden Abschnitt 2.2 dargestellt.

Auf die theoretischen Hintergründe der einzelnen Bestimmungsfaktoren wird jeweils verwiesen. Grob zu unterscheiden sind einerseits neoklassisch geprägte Ansätze, die von rationalem optimierendem Verhalten der Akteure ausgehen und Marktgleichgewichte analysieren. Andererseits spielen Ansätze eine große Rolle, die der evolutorischen Ökonomik zuzurechnen sind. Bezüglich des Verhaltens wird hier von der strengen Rationalität des homo oeconomicus abgewichen, auch wenn Selektionsprozesse dazu führen können, dass das empirisch beobachtete Verhalten „as if“ rational wirkt (vgl. Conlisk 1996). Eine wichtige Rolle spielen Verhaltensroutinen (vgl. z. B. Nelson/Nelson 2002), die sich über längere Zeiträume herausgebildet haben, und die an die Stelle der – in der Neoklassik vorherrschenden – permanenten Optimierung auch aufgrund kleinster Änderungen in den Rahmenbedingungen treten. Den daraus abgeleiteten Bestimmungsfaktoren wird insbesondere für radikalen Wandel eine prominente Rolle zugesprochen, wobei die Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung solch radikalen Wandel notwendig erscheinen lassen (Dosi 1982; Weber, Hemmelskamp 2005a). Den Bestimmungsfaktoren des radikalen Wandels ist deshalb ein eigener Unterabschnitt gewidmet.

## **2.1.1 Technologieorientierte und unternehmensinterne Faktoren**

### **2.1.1.1 Forschung, Entwicklung und technologiegebundenes Lernen**

Technischer Wandel ist in Modellen der „Neuen Wachstumstheorie“ explizit das Ergebnis öffentlicher und vor allem privater Investitionstätigkeiten in FuE (Lucas 1988, Romer 1986, 1990), d. h. Innovationen entstehen endogen aus dem Optimierungsverhalten der Wirtschaftssubjekte. Technologisches Wissen oder Innovation wird als nicht-rivalisierendes Gut charakterisiert, dessen Nutzung nicht oder - z. B. durch Patente - nur teilweise ausschließbar ist (Voß et al. 2003). In diesen Modellen kommen Investitionen in FuE nicht nur dem investierenden Unternehmen zugute, sondern erhöhen auch die Produktivität bzw. Produktqualität anderer Unternehmen. Durch diese so genannten *Spill-overs* ist langfristiges ökonomisches Wachstum überhaupt erst möglich. Anders als im einfachen neoklassischen Gleichgewichtskonzept sind Marktgleichgewichte deshalb allerdings mit positiven Externalitäten behaftet, was u. a. dazu führen kann, dass der Markt nur unzureichend in R&D investiert (z. B. Romer 1990). Dieses Ergebnis kann unter gewissen Voraussetzungen durch Regulierung, insbesondere FuE-unterstützende Politiken verbessert werden.

Die evolutorische Ökonomie lehnt Optimierung als Verhaltensannahme, und so auch als Grundlage von Entscheidungen für Investitionen in FuE ab (vgl. Nelson und Nelson 2002). Sie greift das Konzept der beschränkten Rationalität (Simon 1947; Simon 1981) und des satisfizierenden Verhaltens auf, d. h. die Suche nach einer optimalen Entscheidung wird abgebrochen, wenn der Zielerreichungsgrad eine bestimmte Schwelle überschritten hat (s. auch Jaffe et al. 2002). Dies scheint insbesondere im Hinblick auf die großen Unsicherheiten hinsichtlich des potenziellen Ergebnisses von Investitionen in FuE plausibler als die Verhaltensannahmen der Neoklassik. Gemäß dem evolutionären Modell des technologischen Fortschritts von Nelson und Winter (1982) nutzen die Unternehmen Daumenregeln und Routinen für die Frage, wie viel sie in FuE investieren sollen.

In der empirischen Forschung sind FuE-Ausgaben ein verbreitetes Näherungsmaß für die Innovationsaktivitäten von Unternehmen (Acs/Audretsch 1987; Grupp 1997). Für den Umweltbereich finden Rehfeld et al. (2004; 2007) empirische Belege für einen positiven Zusammenhang zwischen FuE-Aktivitäten und umweltrelevanten Produktinnovationen. Die empirischen Prognosen des evolutorischen Modells hängen von den konkreten Daumenregeln ab, die die Unternehmen benutzen (Winter, Kaniovski, Dosi 2000).

Arrow (1962) bezieht erstmals *Lerneffekte* in die Analyse des Wachstums des Sozialprodukts mit ein. Lerneffekte in der Produktion bewirken z. B., dass der benötigte Arbeitseinsatz pro Kapitaleinheit mit neuen Kapitaljahrgängen abnimmt. Investitionen erhöhen demnach nicht nur die gegenwärtige Produktionskapazität, sondern gleichzeitig auch die zukünftige Produktivität, da sie neues technologisches Wissen erzeugen. In Modellen wird diese Art von technologischem Wandel beispielsweise dadurch abgebildet, dass die spezifischen Kosten einer Technologie als Funktion der kumulierten Kapazitäten dargestellt werden, wobei die spezifischen Kosten geringer sind, je mehr Kapazität bereits installiert ist. Die kumulierte Kapazität steht dabei stellvertretend für das Wissen, das bei der Produktion (*learning-by-doing*) und der Anwendung (*learning-by-using*) entsteht (vgl. Löschel 2002). Die empirische Abschätzung von Lern- bzw. Fortschrittsraten ist vor allem im Bereich von Energietechniken (erneuerbare Energien und Technologien zur rationellen Energienutzung) weit verbreitet (vgl. OECD 2000; Ostertag et al. 2002; Wene et al. 2000). Sie sind u. a. für Foresightstudien im Allgemeinen und insbesondere für die Modellierung von langfristigen Entwicklungen wichtig. Dabei spielen auch Analogieschlüsse von Lernraten bei etablierten Technologien bzw. Produkten auf Lernraten bei zukünftigen umweltfreundlicheren Ersatztechnologien eine Rolle. Allerdings bleibt in diesen Ansätzen unerklärt, unter welchen Bedingungen es zu den Lerneffekten kommt.

### 2.1.1.2 Unternehmensinterne Faktoren

#### *Fähigkeiten*

Die theoretische Betrachtung firmeninterner Faktoren basiert oft auf Ansätzen der evolutischen Ökonomie und der ressourcenorientierten Sicht der Unternehmung („resource-based view of the firm“, s. z. B. Wernerfelt 1984; Barney 1991; Bernauer 2005). Diesem Ansatz zufolge bestimmen firmeninterne Faktoren wie Strategie, Struktur und Fähigkeiten wesentlich die Innovationsaktivität (Fagerberg et al. 2005). Durch die Anwendung der ressourcenorientierten Sicht auf Umweltstrategien von Unternehmen entwickeln Hart (1995) und Russo et al. (1997) ein Konzept von „grünen“ Fähigkeiten. Viele Forschungsarbeiten befassen sich mit der Klassifizierung von unternehmerischen Umweltstrategien und deren Potenzial zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit. Dabei wird im Allgemeinen zwischen proaktiven und reaktiven Strategien sowie zwischen unterschiedlichem Umfang der Strategien (firmenintern, marktorientiert oder beides) unterschieden (Meffert et al. 1998). Cleff und Rennings (1999) identifizieren vier strategische Hauptziele, die Unternehmen zu Umweltinnovationen veranlassen: Kostenreduktion, Erhalt oder Vergrößerung des Marktanteils, Umweltbewusstsein und Reputation sowie Einhaltung von Gesetzen. Speziell für umweltrelevante Produktinnovationen finden Rehfeld et al. (2004) signifikante Einflüsse des Ziels der Einhaltung aktueller oder erwarteter gesetzlicher Anforderungen.

Einige Autoren untersuchen organisatorische Fähigkeiten, insbesondere den Einfluss von Umweltmanagementsystemen auf Umweltinnovationen. Die zugrunde liegende Hypothese ist, dass (zertifizierte) Umweltmanagementsysteme (z. B. ISO 14001, EMAS) Umweltinnovationen direkt begünstigen, indem sie Umweltziele sowie Umweltmanagementstrukturen und -programme zu deren Erreichung etablieren (Coglianese et al. 2001; Johnstone 2001). Indirekt erleichtern sie Umweltinnovationen durch das Anstoßen organisatorischer Lernprozesse und durch die Bereitstellung entscheidungsrelevanter Umweltinformationen (Melnik et al. 2003). Beides fördert die Fähigkeit zu innovieren (Bradford et al. 2000).

Auf der empirischen Ebene resümiert ein Überblicksartikel zu Studien aus den Neunzigerjahren, dass Umweltmanagementsysteme stark auf kurzfristige Prozesskontrolle und weniger auf Innovationen ausgerichtet seien (Dyllick/Hamschmidt 1999). Eine neuere OECD-Studie zeigt jedoch einen positiven Einfluss von Umweltmanagementsystemen auf Umweltinnovationsaktivitäten (Johnstone et al. 2001). Melnik et al. (2003) untersuchen die Einflüsse von zertifizierten gegenüber nicht-zertifizierten Umweltmanagementsystemen und kommen zu dem Schluss, dass zertifizierte Umweltmanagementsysteme einen signifikant höheren Einfluss auf die Umweltperformance eines

Unternehmens haben. Dies bestätigen Rennings et al. (2003) für EMAS. Dyllick/Hamschmidt (2000) zeigen, dass sich der Einfluss der ISO 14001 allmählich von Prozess- auf Produktinnovationen verlagert. Dies wird von aktuellen Studien bestätigt, die zeigen, dass nur zertifizierte Umweltmanagementsysteme signifikante Effekte auf umweltrelevante Produktinnovationen aufweisen (Rehfeld et al. 2004; Rennings et al. 2005). Allerdings ist bisher noch ungeklärt, ob von einer derartigen Verschiebung der Innovationsperspektive auch erneuerbare Energietechnologien betroffen sind.

### *Unternehmensgröße*

Neben Strategien und Fähigkeiten ist die Unternehmensgröße ein weiterer seit langem untersuchter Bestimmungsgrund von Innovationsaktivitäten. Bereits Schumpeter postulierte einen positiven Zusammenhang zwischen Firmengröße und Innovation, da große Unternehmen eher monopolistisch agieren können und deswegen risikofreudiger seien. Andererseits kann argumentiert werden, dass gerade in monopolistisch strukturierten Märkten der Innovationsdruck hinsichtlich radikaler Innovationen geringer ausfällt, da die ungefährdete Marktposition ein Verbleiben auf der traditionellen Technologie ermöglicht, ohne dass es zu einem Verlust der Marktstellung kommt. Einige Autoren sehen dagegen Vorteile bei KMU, da sie aufgrund ihrer geringen Größe schneller auf Veränderungen reagieren können. Weniger Bürokratie, höheres Engagement des Managements, stärkerer Wettbewerbsdruck, höhere FuE-Effizienz und Nischenstrategien sprechen demnach dafür, dass kleine Unternehmen besser innovieren (Geschka 1990; Rothwell et al. 1994). Acs/Audretsch (1987) zufolge hängt es von der Marktstruktur ab, welche Firmengröße der Innovationstätigkeit zuträglich ist: Große Firmen seien in konzentrierten, kapitalintensiven Märkten innovativer, kleine Firmen haben dagegen in wettbewerbsintensiveren Märkten Vorteile.

Mit Blick auf Umweltinnovationen argumentieren Baylis et al. (1998), dass Umweltaktivitäten finanzielle und personelle Ressourcen binden und ein bestimmtes Wissen voraussetzen. Daraus wird abgeleitet, dass große Unternehmen bessere Möglichkeiten zur Reduktion von Umweltauswirkungen haben. Weitere empirische Studien zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen Firmengröße und Umweltinnovation (Cleff/Rennings 1999; Rehfeld et al. 2004). Allerdings wird aus methodischer Sicht vielen Studien zu unternehmensinternen Bestimmungsfaktoren vorgeworfen, dass sie bei der Operationalisierung von Umweltproduktinnovationen zu stark vereinfachen, indem sie nur binär unterscheiden, ob ein Unternehmen eine Umweltproduktinnovation durchgeführt hat oder nicht (Bernauer et al. 2005).

Festzuhalten bleibt, dass es keine eindeutige Aussage bezüglich der Unternehmensgröße gibt. Sich starkem Wettbewerb ausgesetzte Firmen (und daher oftmals kleine

und mittlere Unternehmen) scheinen eher einen hohen Innovationsanreiz aufzuweisen, während die Fähigkeit zu Innovationen stärker bei großen Unternehmen zu sein scheint.

#### *Der behaviouristische Ansatz*

Gemäß dem behaviouristischen Ansatz und aufbauend auf der Theorie des geplanten Verhaltens aus der Sozialpsychologie wird Verhalten von Akteuren von deren Absichten, Einstellungen, Werthaltungen und ihrer Kontrolle über die Handlungsmöglichkeiten bestimmt (Ajzen 1988; 1991). Ein wesentliches Ergebnis ist, dass die *Wahrnehmung* der eigenen Handlungsmöglichkeiten und Fähigkeiten zusätzlich zu den tatsächlichen Handlungsmöglichkeiten und Fähigkeiten für innovatives Verhalten der Zielgruppe der Programme zentral ist.

Montalvo (2001; 2002) konkretisiert den behaviouristischen Ansatz für die Analyse von Umweltinnovationsverhalten von Unternehmen. Auf aggregiertester Ebene wird die Umweltinnovationsbereitschaft betrachtet, die durch die Einstellung gegenüber Umweltinnovation, der Wahrnehmung von sozialem Druck in Richtung Umweltfreundlichkeit zu innovieren, und der wahrgenommenen Beherrschbarkeit des Umweltinnovationsprozesses determiniert wird. Die drei Determinanten werden in mehreren hierarchischen Stufen weiter aufgefächert. In einer ersten quantitativen empirischen Überprüfung des Modells auf die Diffusion der Brennstoffzelle konnten die Relevanz und die Wirkungsrichtungen der Determinanten weitgehend bestätigt werden (Sartorius 2008). Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Verbreitung der Erkenntnis über erfolgreiche Innovationen (z. B. durch Demonstrationsprojekte von erfolgreichen Weiterentwicklungen erneuerbarer Energietechnologien oder Netzbildung) auch erhebliche innovationssteigernde Wirkungen bei weiteren Akteuren auslösen kann.

#### **2.1.1.3 (Ko-) Evolutorische Prozesse**

Viele Autoren mit evolutionsökonomischem Hintergrund heben die grundlegende Unsicherheit bei Innovationen hervor. Dies gilt insbesondere in der Frühphase, wenn die Anwendungskontexte nicht absehbar sind. Für solche Entscheidungssituationen wird das rationale Optimierungskalkül der neoklassischen Ökonomik als ungeeignet eingeschätzt (s. z. B. Rennings 2000, INFRAS/Fraunhofer ISI 2004). Die evolutorische Ökonomik berücksichtigt dagegen die Zukunftsoffenheit innovativer Prozesse explizit und bietet damit viel versprechende Ansätze für die Erklärung technischen Wandels (Nelson/Winter 1982; Dosi 1982; Dosi et al. 1988; Nelson 1995). Insbesondere wird eingeräumt, dass sie bei der Erklärung von radikalem und langfristigem technologischem Wandel hilfreich sei, weil sie Überraschungen zulässt und Pfadabhängigkeiten, Irreversibilitäten sowie Übergangsprozesse betrachtet.

Eines der Kernelemente der evolutorischen Ökonomik ist die Betrachtung von Innovationsprozessen als Analogie zur biologischen Evolution. Zwei Mechanismen werden für das Entstehen von Innovationen als zentral angesehen: die Generierung von Vielfalt im Sinne einer Anzahl verschiedener technischer Varianten und die Selektion, u. a. durch Nachfragestrukturen aber auch nicht-ökonomische Faktoren wie Politik und Kultur (Voß et al. 2003).

Eine größere Vielfalt ist per se für Innovationen förderlich (s. Weber 1999). Der selektive Druck kann dazu führen, dass eine bestimmte Technologie zum dominanten „technologischen Paradigma“ wird. Kostenvorteile, Vorsprünge bei Lerneffekten und eine gute Passfähigkeit mit Konsum- und Produktionsmustern, Infrastrukturen und Netzwerken führen zu Pfadabhängigkeiten und technologischen Trajektorien (Dosi et al. 1988). Solche „lock-in“ Effekte führen zum Ausschluss anderer (technologischer) Optionen. Dabei ist hervorzuheben, dass der ursprüngliche Vorsprung einer Technologie auf purem Zufall beruhen kann, und der daran anschließende Selbstverstärkungsprozess damit kein Garant für die Durchsetzung der überlegenen Technologie ist (Arthur 1988). Sie können im Gegenteil der Durchsetzung umweltfreundlicherer Technologien – z. B. einem Übergang hin zu erneuerbaren Energietechnologien - im Wege stehen. Der Umstieg auf eine andere Trajektorie als Politikansatz hat unter dem Begriff „transition management“ Eingang in die Literatur gefunden. Der damit verbundenen Vorstellung einer weichen Transformation technologischer Regimes wird von anderen Autoren der abrupte Übergang als wahrscheinlicher entgegengesetzt (Berkhout 2005).

Rennings (2000) stellt fest, dass das Konzept von Variation und Selektion in der evolutorischen Ökonomik stark auf technologische Innovationen abstellt und komplexere Feed-back-Mechanismen zwischen Variationen und Selektionsumgebung nicht betrachtet. Solche Mechanismen thematisiert Norgaard (1984) im Paradigma der Ko-Evolution, worunter er einen andauernden Feed-Back Prozess zwischen zwei evolvierten Systemen, einschließlich sozialer und ökologischer Systeme versteht. Rennings favorisiert diesen Ansatz zur Analyse von Umweltinnovationen, da er die Betrachtung aller Subsysteme einschließt und die Bedeutung ihrer Interaktion betont. Als Beispiel eines umweltrelevanten ko-evolutorischen Innovationsprozesses nennt er den Ausstieg aus CFC, wobei das Montreal-Protokoll als institutionelle Innovation eine herausragende Rolle gespielt hat (zum Ausstieg aus CFC in Deutschland und den USA s. Kühn, Osorio-Peters 1999). Die hierbei thematisierten Zusammenhänge finden in einer anwendungsorientierten Version auch innerhalb des Innovationssystemansatzes Berücksichtigung.

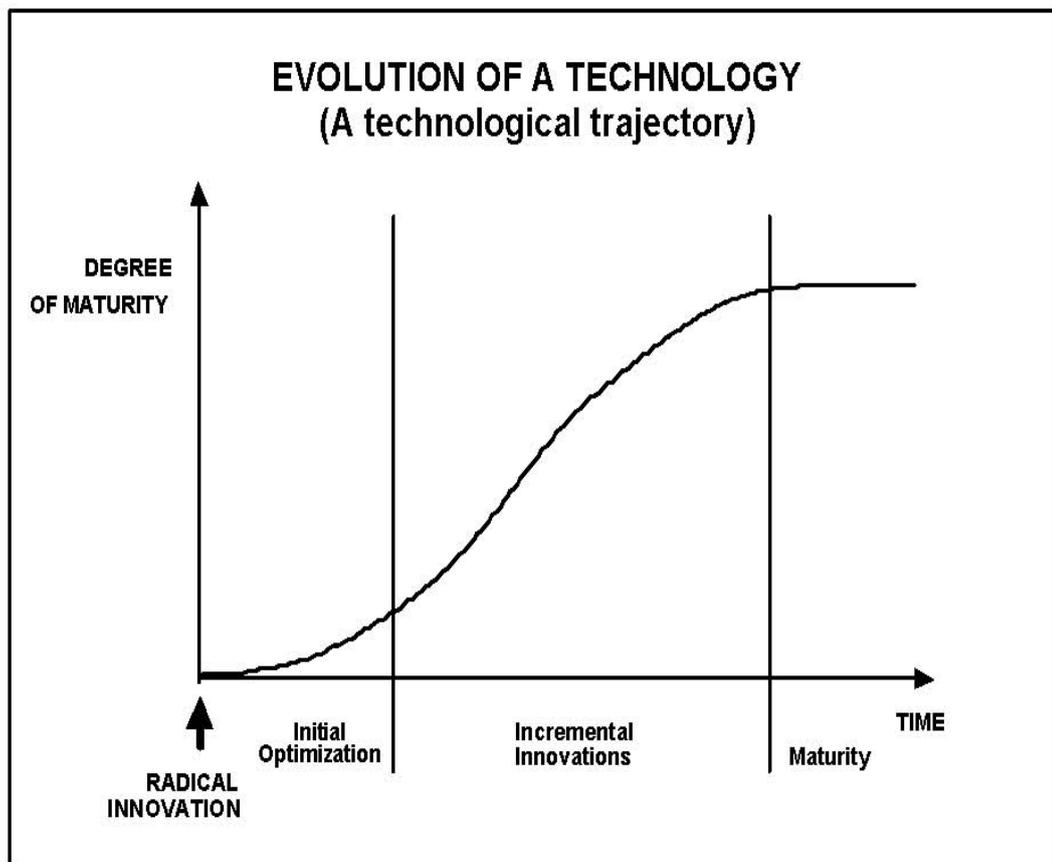
In den Arbeiten von Dosi (1982), Nelson/Winter (1982) sowie Perez/Soete (1988) wird die notwendige Ko-Evolution zur Erklärung des Unterschieds zwischen radikalen und

inkrementellen Innovationen und der Pfadabhängigkeit von Innovationen entlang technologischer Trajektorien herangezogen. Eine radikale Innovation beginnt mit einem neuen technologischen Paradigma. Es besteht eine hohe Diversität in unterschiedlichen Designs, die miteinander konkurrieren. Selektionsmechanismen führen zur Herausbildung eines dominanten Designs. Lern- und Skaleneffekte führen zu sinkenden Kosten, diese führen zur weiteren Diffusion, die wiederum weitere inkrementelle Innovationen entlang der technologischen Trajektorie ermöglichen. Die Innovationen sind jedoch kein rein technischer Prozess, sondern erfordern immer auch Anpassungen des organisatorischen und institutionellen Umfelds. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein etabliertes technologisches Paradigma zur Herausbildung von Institutionen führt, die die weitere Entwicklung der Technologie fördern. Beispiele für eine derartige Ko-Evolution sind:

- Senkung Transaktionskosten, da eine Bündelung gemeinsamer Interessen der Träger des Paradigmas erfolgt
- Standardisierung von Produkten und Prozessen, die die Koordination zwischen Herstellern, Zulieferern und Kunden verbessert
- Entwicklung von Verbänden etc., die die Formulierung eines gemeinsamen Interesses ermöglicht und die Legitimität nach außen verdeutlichen kann
- Abstimmung zwischen Firmen und Bildung von Netzwerken
- Rückwirkung auf Wissenschaft und Ausbildung, z. B. durch neue Journals und neue technische Vereinigungen, neue Ausbildungsgänge, Ausrichtung der Forschung auf Weiterentwicklung der Trajektorie
- Anpassungen des Rechtssystems, sowohl durch Lösungen spezieller Rechtsprobleme (z. B. Vertragskonstruktionen), oder die Herausbildung neuer Rechtsformen
- Aufbau (z. T. staatlicher) Infrastrukturen (z. B. begleitende Netzinfrastruktur)
- Veränderung unternehmensinterner Strukturen.

Allerdings entwickelt sich das organisatorische und institutionelle Umfeld in der Regel langsamer als die Technologien, und mit einer gewissen Zeitverzögerung. Sobald aber die Ko-Evolution einsetzt und wieder in zeitlichen Einklang mit der technischen Entwicklung kommt, tritt ein Innovationsschub bei den inkrementellen Innovationen ein. Damit verläuft die Innovationskurve inkrementeller Innovationen im Zeitablauf nicht linear, sondern weist eine Beschleunigung auf, wenn es zur Ko-Evolution kommt.

Abbildung 2-1: Innovation entlang einer technologischen Trajektorie



Sources: Nelson & Winter / G. Dosi

Die Ko-Evolutionen sind von erheblicher Bedeutung für daraus resultierende Pfadabhängigkeiten, die den Übergang von einem konventionellen auf ein auf erneuerbares Energiesystem erschweren (vgl. Unruh 2000): Denn die Notwendigkeit der Ko-Evolution des technischen Systems mit dem organisatorischen und institutionellen Umfeld stellt ein Hindernis für das Herausbilden eines neuen technologischen Paradigmas dar, so lange dieses Umfeld auf das alte technologische System ausgerichtet ist und keine Passfähigkeit für das neue aufweist. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Konkurrenz zwischen dem technologischen Paradigma auf das organisatorische und institutionelle Umfeld ausweitet. So ist es eine strategische Option für die Vertreter des traditionellen Paradigmas, die Anpassung des organisatorischen und institutionellen Umfeldes an das neue Paradigma zu verhindern oder zu verzögern, um die eigene Wettbewerbsposition gegenüber dem neuen technologischen Paradigma zu verbessern bzw. um den Umstieg hinauszuzögern.

Unmittelbar einsichtig ist die Bedeutung der Ko-Evolution im Fall der erneuerbaren Energiesysteme: Das bisherige traditionelle Stromsystem hat zu Ko-Evolutionen bei der begleitenden Infrastruktur (z. B. Netzausbau entsprechend den Bedürfnissen der großen fossilen und nuklearen Erzeugungseinheiten), aber auch zu entsprechenden sozialen und rechtlichen Ko-Evolutionen (z. B. Institutionen und Politikmaßnahmen, die das traditionelle Stromsystem stützen, wie Konzentration der Stromerzeugung bei großen EVU, vertikale Integration von Braunkohlegewinnung und Verstromung, oder Haftungsrecht bei nuklearen Anlagen etc.) geführt. Unter diesen Bedingungen stößt der Umstieg des neuen Paradigmas an Grenzen. Wenn es aber dann zur Anpassung des organisatorischen und institutionellen Umfeldes an das neue Paradigma der erneuerbaren Energien kommt (z. B. Ausbau der Netzstrukturen entsprechend den Bedürfnissen der erneuerbaren Energien), wird der oben beschriebene Effekt der Beschleunigung der inkrementellen Innovationen den Umstieg auf das neue Paradigma nochmals beschleunigen.

#### **2.1.1.4 Autonomer technischer Wandel und der Einfluss der Zeit**

Der Grundgedanke des *autonomen* technischen Wandels geht zurück auf Solow (1956). Technologischer Fortschritt bzw. technologisches Wissen wird als öffentliches Gut angesehen, das außerhalb der Ökonomie entsteht, also exogen ist. Der autonome Produktivitätsfortschritt ergibt sich als Residualgröße, und zwar als Abweichung der Wachstumsrate des Sozialproduktes von den Wachstumsraten der Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit. Die Determinanten dieser Residualgröße werden nicht weiter untersucht. Dennoch wird der autonome technische Wandel an dieser Stelle erwähnt, da dieser Ansatz im Rahmen der Modellierung u. a. aus methodischen Gründen nach wie vor eine große Rolle spielt. Er wird in der Regel durch eine Konstante oder einen Zeittrend abgebildet, z. B. in der Form von konstantem Produktivitätswachstum von 2 - 3 % pro Jahr oder einer autonomen Verbesserung der Energieeffizienz (Aznar/Dowlatabadi 1999). In ähnlicher Weise lassen sich auch auf sektoraler oder Produkt-Ebene Produktivitätsveränderungen (z. B. Energieeinsatz pro t Stahl) im Zeitverlauf darstellen. Im Bereich des Energie- und Klimaschutzes hat sich dafür der sog. autonome Energieeffizienzverbesserungsfaktor (AEEI) etabliert (Manne/ Richels 1992, Nordhaus 1994; Grubb et al. 2002; Köhler et al. 2006). Technischer Wandel vollzieht sich dabei kontinuierlich, nicht sprunghaft. Technologiesprünge können in diesem Rahmen nur durch die Annahme über neue Zukunftstechnologien (backstop technologies) abgebildet werden, die zu einem bestimmten Zeitpunkt wettbewerbsfähig werden und als weitere Option zur Verfügung stehen.

## **2.1.2 Marktorientierte Faktoren**

### **2.1.2.1 Änderungen der relativen Preise**

Veränderungen in den relativen Preisen der Produktionsfaktoren als Treiber für technologischen Wandel wurden bereits von Hicks (1932) betrachtet, der damit den Grundstein für die Theorie des induzierten technischen Wandels innerhalb der neoklassischen Theorie legte. Danach bewirkt z. B. ein Anstieg der Lohnkosten relativ zu den anderen Faktorkosten, dass die Innovationen in Richtung arbeitssparender Technologien verstärkt werden. Übertragen auf die Umweltpolitik bedeutet die Theorie des induzierten technischen Wandels, dass eine Verteuerung der umweltbelastenden Aktivitäten oder des Inputs natürlicher Ressourcen zu Umweltinnovationen führt. Entsprechend würde eine Verteuerung der traditionellen Energieversorgung auch zu Innovationen bei den erneuerbaren Energietechnologien führen.

Ostertag (2003b) ergänzt die Hypothese der induzierten Innovation aus Sicht der neuen Institutionenökonomik. Diese betont die grundsätzliche Bedeutung von Institutionen für alle Aspekte des wirtschaftlichen Handelns (Eggertsson 1990; Richter, Furubotn 1999; Williamson 1975; Williamson 1985; Williamson, Winter 1991). Aufgrund ihres Annahmengerüsts (eingeschränkte Rationalität, opportunistisches Verhalten, Existenz von Informationskosten) führt nicht nur die Produktion, sondern auch der Austausch von Gütern zu Kosten, und zwar zu Transaktionskosten, die eigenen Determinanten unterliegen. Am Beispiel von Energie-Contracting diskutiert Ostertag (2003b), wie hohe Transaktionskosten als Innovationstreiber sowohl für technischen wie auch für organisatorischen oder institutionellen Wandel wirken können.

Die evolutorische Ökonomik schränkt mit ihrer Annahme von routinemäßigem statt permanent optimierendem Verhalten implizit die Hypothese der induzierten Innovation ein und stellt so auch die daraus resultierenden Instrumentenpräferenzen in Frage. Denn wenn das Innovationsverhalten durch Verhaltensroutinen bestimmt wird, kommt es nicht nur auf Veränderungen durch veränderte relative Preise, sondern auch auf Veränderungen der Verhaltensroutinen selbst an. Entsprechend könnte z. B. eine Wirkung von freiwilligen Selbstverpflichtungen damit begründet werden, dass sie dazu beitragen, die Verhaltensroutinen zu verändern.

Auf der empirischen Ebene kommen Thirtle und Rutan (1987) in ihrem Überblicksartikel zu dem Ergebnis, dass die vorliegenden statistischen Untersuchungen in der Tat darauf schließen lassen, dass eine Änderung der relativen Faktorpreise Auswirkungen auf die Innovationsgeschwindigkeit hat. Allerdings bezogen sich die ausgewerteten Arbeiten nicht auf den Umweltbereich. Im Umweltbereich besteht nämlich ein grundlegendes Problem darin, die in der Vergangenheit sehr stark durch ordnungsrechtliche

Politikmaßnahmen geprägten Veränderungen in statistisch messbare Variablen zu transformieren. Entsprechend liegen hier deutlich weniger ökonometrisch-statistische Analysen vor, die sich zudem häufig bei den erklärenden Variablen mit Hilfsgrößen behelfen müssen.

Eine derartige Hilfsgröße sind die Umweltausgaben. Hier kommt Grupp (1999) zu positiven Zusammenhängen zwischen Umweltausgaben und Patentaktivität in den zugehörigen Technologiefeldern. Ein derartiger Zusammenhang wird allerdings von Jaffe und Palmer (1997) nicht bestätigt. Am intensivsten wurde bisher der Energiebereich untersucht, zumal hier mit den Energiepreisen eine statistisch gut verfügbare erklärende Variable zur Verfügung steht. Hier kommen neuere Untersuchungen (Newell et al. 1999, Grupp 1999, Schleich 2001; Popp 2002; Schleich et al. 2003 und Schleich 2004; Lutz et al. 2005) zum Ergebnis, dass Steigerungen in den relativen Energiepreisen energiesparende Innovationen auslösen. Allerdings sind die statistische Signifikanz dieses Zusammenhangs, und auch die Größenordnung des Einflusses, der auf die Energiepreise entfällt, unterschiedlich. Insgesamt kann aus diesen Arbeiten zwar geschlossen werden, dass relative Veränderungen in den relevanten Kosten zwar tatsächlich den umwelttechnischen Fortschritt beeinflussen. Da aber für die einzelnen Untersuchungsgegenstände jeweils eine Reihe weiterer fallspezifischer Determinanten besteht, kann eine verallgemeinerte, quantitative Beziehung für die Induzierung dieses Fortschritts nicht aufgestellt werden.

### **2.1.2.2 Marktkonzentration**

Bereits Schumpeter (1942) postulierte einen positiven Zusammenhang zwischen Marktkonzentration und Innovation. Er begründet dies damit, dass Marktkonzentration Unsicherheiten reduziert und Unternehmen verstärkt zu Investitionen in FuE motiviert. Andere Autoren, z. B. Levin et al. (1985), Porter (1990) oder auch Dosi et al. (1990) argumentieren, dass hart umkämpfte Märkte zu höheren Innovationsdruck führen. Insofern Konzentration zu fehlenden Wettbewerbsdruck und Trägheit führt, werden demnach Innovationen behindert. Insgesamt ergibt sich hier also Argumentationsmuster, die die Innovationsfähigkeit und die Innovationsneigung unterscheiden, ähnlich wie es bereits bei der Diskussion von Unternehmensgröße der Fall ist.

In Deutschland ist das Modell von Kantzenbach von Bedeutung (Kantzenbach 1967, Fees 1997, und der kurze Überblick in Voß et al. 2003). Kantzenbach betrachtet dafür die Wettbewerbsintensität verschiedener Marktformen. Unter der Wettbewerbsintensität versteht er die Geschwindigkeit, mit der innovationsbedingte Extragewinne durch bereits am Markt tätige oder neue Marktteilnehmer wegkonkurriert werden. Zentrale Faktoren, die die Wettbewerbsintensität bestimmen sind das Verhalten der Unterneh-

men (kooperativ-kartellistisch oder unabhängig), die Anzahl der Anbieter und der Grad der Heterogenität der Produkte. Optimal ist die Wettbewerbsintensität, bei der der technische Wandel maximiert wird.

Den Zusammenhang zwischen Wettbewerbsintensität und technischem Fortschritt erklärt Kantzenbach mittels der Innovationsneigung und den Innovationsmöglichkeiten. Die Innovationsneigung ist um so größer, je länger durch Kostensenkung erzielte Extragewinne aufrechterhalten werden können und je größer der Verlust durch vernachlässigte Innovationen ist. Die Innovationsmöglichkeiten sind durch die Gewinne bestimmt. Beides wird durch die Marktform bestimmt. Insgesamt schlussfolgert Kantzenbach daraus, dass ein weites Oligopol mit mäßiger Produktdifferenzierung die Innovationsaktivität optimiert. Kritisiert wurde an dem Ansatz, dass der Begriff „weites Oligopol“ derart unscharf sei (Fees 1997). Wird – wie bei der Messung der Unternehmenskonzentration oftmals üblich – ein Herfindahl-Index für die größten sechs Unternehmen benutzt, so bleibt unklar, in welchem Wertebereich ein weites Oligopol gilt.

Bei sich neu etablierenden Märkten und frühen Innovationsphasen sind diese Überlegungen allerdings nur teilweise anwendbar. Hier besteht oftmals das Problem, dass sich entsprechende Unternehmen überhaupt noch herausbilden müssen. Da kann es bereits ein Anzeichen für eine positive Entwicklung sein, wenn überhaupt einige Player auf der Unternehmensseite aktiv sind. Hier muss sich das Augenmerk stärker darauf richten, ob die Bedingungen im Innovationssystem es zulassen, dass eine radikale Alternative neben einem dominanten technologischen Paradigma entwickeln kann.

### **2.1.2.3 Nachfrage**

Ein nach Schmookler (1966) entscheidender Faktor für das Auslösen von Innovationen ist der Nachfragesog (demand pull). Kundenwünsche werden erkannt und in Anforderungen an neu zu entwickelnde Produkte und Prozesse übersetzt. Im Allgemeinen wird der nachfrageorientierten Generierung von Innovationen zugesprochen, Ergebnisse mit einem höheren Maß an Marktakzeptanz zu erzielen (Rothwell et al. 1974; von Hippel 1978). Entscheidend ist die Definition der Anforderungen an die angewandte Forschung und Entwicklung auf Basis zukünftiger Kundenwünsche. (Mowery/Rosenberg 1978; Lundvall 1988). Kommunikationskanäle, Austauschbeziehungen, Lead-User-Konzepte (von Hippel 1986), Netzwerke (Teubal 1991) und gegenseitige Lernprozesse durch „user-producer-interaction“ (Lundvall 1991) stellen allesamt relevante Möglichkeiten dar, diese Kundenwünsche zu identifizieren.

Die Literatur zu „grünem Marketing“ befasst sich mit den Möglichkeiten, grüne Märkte als Treiber für Innovationen zu schaffen (Meffert et al. 1998; Belz 2001). Ökologisch orientierte Nachfrager, die bereit sind, für umweltfreundlichere Produkte (hierzu zählt

auch „grüner Strom“) eine Preisprämie zu zahlen, sollten nach Einschätzung in den 1980er und frühen 1990er Jahren an Gewicht zunehmen (Peattie 2001). Spätere Studien zeigen jedoch, dass Einstellungen und tatsächliches Kaufverhalten auseinander fallen (Wong et al. 1996, Kuckartz 1998; Prakash 2002). Nach Ostmeier und Meffert (1990) erweisen sich dabei institutionelle Käufer weniger gespalten als private Verbraucher, was mit einer stärker rationalen Nutzenabwägung im Rahmen des professionellen Beschaffungsprozesses begründet wird. Für die Durchsetzung umweltfreundlicher Innovationen auf Massenmärkten ist es dagegen wichtig, dass Produkte neben dem „Öko-Bonus“ zusätzlichen Nutzen für den Verbraucher stiften (Villiger et al. 2000). Solche zusätzlichen Nutzenelemente können z. B. Energiekosteneinsparungen, verbesserte Produktqualität und –haltbarkeit, positive Gesundheitseffekte oder – am ehesten für erneuerbare Energietechnologien relevant - Imageeffekte sein (Meffert et al. 1998).

Verständliche und glaubwürdige Informationen können den Nachfragesog nach Umweltproduktinnovationen verstärken (Wong et al. 1996; Reinhardt 1998; Meffert et al. 1998). In diesem Kontext ist die positive Innovationswirkung von Öko-Labeln zu sehen (Hemmelskamp/Brockmann 1997; Prakash 2002). Die Strategie der (politisch unterstützten) kooperativen Beschaffung setzt ebenfalls auf der Nachfrageseite an. Durch die Bündelung großer Nachfrager, die Abstimmung ihrer Produkthanforderungen und das Absichern eines gewissen anfänglichen Absatzvolumens unterstützt das Instrument die kundenorientierte Entwicklung von Produktneuheiten. Dieses Konzept stammt ursprünglich aus dem skandinavischen Raum, findet aber auch zunehmend in anderen Europäischen Ländern Anwendung (Ostertag 2003a). In jüngster Zeit werden die politikbedingten Beeinflussungen auf der Nachfrageseite zunehmend unter dem Schlagwort der "nachfrageorientierten Innovationspolitik" thematisiert. Ein erster zusammenfassender Überblick, der auch Beispiele im Energie- und Klimapolitikbereich umfasst, wurde für den Deutschen Bundestag erstellt und macht die Bandbreite der in Frage kommenden traditionellen und innovativen Politikinstrumente deutlich (vgl. Edler et al. 2006).

### **2.1.3 Regulierung und Wahl der Politikinstrumente als Bestimmungsfaktor**

Die unterschiedlichen Erklärungsansätze der Entstehung von (Umwelt-) Innovationen haben letztendlich auch unterschiedliche Implikationen für die Politik. Während sich exogener technischer Wandel naturgemäß nicht durch Politikmaßnahmen beeinflussen lässt, können bei endogenem technischen Wandel zielgerichtete Politikmaßnahmen durchaus sinnvoll sein. Analysen zur Eignung der Instrumente befassen sich einerseits mit der „richtigen“ Instrumentenwahl. Dabei sind aus Sicht der Transaktionskostenöko-

nomie neben Wirksamkeits- und Effizienzüberlegungen auch die durch die politischen Instrumente selbst verursachten Transaktionskosten maßgeblich für Wahl und Ausgestaltung der Instrumente (Betz 2003; Ostertag 2003b). Andererseits befasst sich die Instrumentenanalyse mit der Abschätzung der Nettoeffekte dieser Instrumente. Erkennt man die politische Steuerbarkeit des technischen Wandels an, stellte sich die Frage des Crowding-Out-Effektes bzw. die Opportunitätskostenfrage. Die Stimulierung von Innovationen (durch Politik) in einem bestimmten Bereich (z. B. CO<sub>2</sub>-Minderung) kann dazu führen, dass Innovationen in anderen Sektoren verringert werden (Voß et al. 2003; Jaffe et al. 2002). Im Folgenden wird zunächst die Diskussion zu einzelnen Kategorien von Instrumenten zusammengefasst, bevor auf übergeordnete Politikkonzepte eingegangen wird.

### **2.1.3.1 Ökonomische Instrumente**

Gemäß der Hicks'schen Hypothese des induzierten technischen Wandels ist für die Innovationswirkung entscheidend, dass von den Instrumenten ein kontinuierlicher finanzieller Anreiz ausgeht. Hierbei beurteilt die neoklassische Umweltökonomik ökonomische Instrumente wie Abgaben und handelbare Emissionsrechte eindeutig am Besten, da Restemissionen weiter mit Kosten belastet sind und damit ein permanenter Anreiz besteht, nach weiteren Möglichkeiten zur Reduktion der Umweltbelastung zu suchen (Michaelis 1996).

Typischerweise ändern ökonomische Instrumente die relativen Preise. Mit der Einführung des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels schieben sich in jüngster Zeit die handelbaren Umweltzertifikate in den Vordergrund. Erste Auswertungen deuten hier darauf hin, dass zusätzlich zu den relativen Preisänderungen auch zahlreiche Implementationsdetails erheblichen Einfluss auf die Innovationswirkungen dieses Instrumentariums haben (Schleich et al. 2009; Rogge et al. 2010). Zu dieser Thematik laufen gegenwärtig intensive Forschungsbemühungen, so dass hier in Zukunft mit weiteren empirischen Aussagen zu rechnen ist. Allerdings muss bei der Wirkung des Emissionshandels speziell auf Innovationen bei Erneuerbaren Energien die unterschiedliche Fristigkeit der jeweils verfolgten Zielsetzungen berücksichtigt werden. Der Emissionshandel ist kurzfristig ausgelegt, um die Zielsetzungen des Kyoto-Protokolls zu erfüllen. Entsprechend kann er nicht die Knappheiten im CO<sub>2</sub>-Preis widerspiegeln, die für eine weitreichende Erreichung der Klimastabilisierungsziele (z. B. Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % bis 2050) notwendig sind. Andererseits besteht weitgehend Einigkeit, dass eine derartige Zielsetzung den breiten Einsatz erneuerbarer Energien erfordert. Daraus folgt, dass bereits aus diesen unterschiedlichen Zeithorizonten nicht erwartet werden kann, dass vom Emissionshandel genügend Anreize zur Vornahme von Innovationen bei den erneuerbaren Energien ausgehen. Vielmehr ist hierzu eine eigenständige, auch nachfra-

gegenseitige Politik zur Förderung erneuerbarer Energietechnologien erforderlich (Walz 2005).

Auf der Basis der neuen Wachstumstheorie sind neben Abgaben und handelbaren Emissionsrechten auch FuE-Förderung und Maßnahmen zur Förderung von Spillovers – insbesondere bei öffentlicher FuE – zur Internalisierung positiver Externalitäten von Forschungsergebnissen gerechtfertigt. Für leitungsgebundene Infrastrukturtechnologien, die für verbesserte Umweltbedingungen eine zentrale Rolle spielen, sind außerdem Strukturen natürlicher Monopole und monopolistischer „bottlenecks“ Anlass für Regulierungen. Eine nähere Analyse dieser „dreifachen regulatorischen Herausforderung“ im Hinblick auf Innovationswirkungen findet sich in Walz (2007).

### **2.1.3.2 Ordnungsrechtliche Maßnahmen**

Der Einsatz des Ordnungsrechts wird in der Umweltökonomie neoklassischer Prägung überwiegend als wenig innovationsfreundlich eingestuft (Michaelis 1996). Zwar besteht ein Anreiz, die vorgeschriebenen Grenzwerte mittels kostensenkender Innovationen kostengünstiger einzuhalten, jedoch fehlen Anreize, mehr für den Umweltschutz zu tun als vorgeschrieben, da für die verbleibenden (zulässigen) Restbelastungen keinerlei Kosten entstehen (Cansier 1993). Ein Anreiz für weitergehende Innovationen ist zwar auch bei den Herstellern von Umwelttechnik denkbar, wenn mit einer Verschärfung der Anforderungen gerechnet werden kann. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn sich die Grenzwerte an einem Stand der Technik orientieren, wodurch zugleich eine gleichsam staatlich garantierte Mindestnachfrage nach den neuen Umwelttechnologien garantiert wird. Dem steht entgegen, dass die betroffenen Anwender einen Anreiz haben, bestehende Möglichkeiten zur weiteren Reduktion der Belastung nicht bekannt zu geben, was unter dem Schlagwort „Schweigekartell der Oberingenieure“ Eingang in die Literatur gefunden hat (Michaelis 1996). Der neoklassischen Sicht zufolge erzeugt strikte Regulierung insgesamt negative Effekte auf Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit, da sie die Ausgaben der Unternehmen steigert und ihren Handlungsspielraum stark einengt. Bei begrenzten Investitionsbudgets kann erzwungene FuE für saubere Technologien zudem zur Minderung von FuE-Bemühungen in anderen, möglicherweise profitableren Feldern führen, wie z. B. im Kerngeschäft der Unternehmen (Gray/Shadbegian 1995 in Bernauer et al. 2005).

Eine alternative Betrachtung von Regulierungsstandards stellen Newell et al. (1999) an, indem sie das Modell des induzierten technischen Wandels erweitern. Danach können auch nicht-preisbezogene Beschränkungen im Rahmen der induzierten Innovationshypothese analysiert werden, wenn die von ihnen ausgehenden Wirkungen als Veränderungen von Schattenpreisen oder impliziten Preisen interpretiert werden kön-

nen. Die Wirkungen von ordnungsrechtlichen Maßnahmen sind in diesem Rahmen der Wirkung ökonomische Instrumente ähnlich.

Der negativen Einschätzung der Innovationswirkung von Umweltrecht stellen Porter und van der Linde (1995a; 1995b) ihre Hypothese entgegen, dass gut strukturierte Umweltregulierung nicht nur der Umwelt nützt, sondern auch der regulierten Industrie, indem sie zur Umsetzung vernachlässigter Investitionsmöglichkeiten führt. Diese Hypothese wird Voss et al. (2003) zufolge plausibel, wenn man sie in den konzeptionellen Rahmen der evolutorischen Ökonomie einbettet: „Wenn Unternehmen ihre Innovationsstrategien ohnehin nicht optimieren, besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit, dass sie aufgrund der neuen externen Einschränkung ihre Strategien überdenken und dabei neue Produktionsverfahren entdecken, die letztlich kostengünstiger und profitabler sind. Umweltregulierung könne damit grundsätzlich eine „Win-Win-Situation“ hervorrufen, in der die Umweltbelastung sinkt und zugleich die Unternehmensprofite steigen“ (Voß et al. 2003, 13). Die Porter-Hypothese impliziert, dass die Kosten der Einhaltung der Regulierung durch so genannte „innovation offsets“ überkompensiert werden können, so dass die Nettokosten der Einhaltung von Umweltvorschriften sinken.

Die empirische Evidenz zu den Wirkungen des Ordnungsrechts ist begrenzt. Ökonometrische Studien zur Überprüfung der Hypothese kommen zu uneinheitlichen Ergebnissen, sind aber auf Grund methodischer Probleme ohnehin nur bedingt aussagekräftig (vgl. Jaffee et al. 2003). An den qualitativen Fallstudien zum Thema wird zuweilen kritisiert, dass sie unsystematische anekdotische Evidenz zugrunde legen (Bernauer et al. 2005). Andererseits mehren sich die Fallstudien, die positive Innovationswirkungen auch vom ordnungsrechtlichen Instrumentarium feststellen (vgl. Wallace 1995, Klemmer et al. 1999, Walz 2004). Im Ergebnis zeigte sich hier, dass auch von ordnungsrechtlichen Maßnahmen ein positiver Innovationseffekt ausgehen kann, jedoch immer eine Vielzahl von Systembedingungen zu beachten ist, worauf bereits Porter und van de Linde selbst hingewiesen haben. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist deshalb schwierig. Bedeutsam ist, dass die Ergebnisse darauf hindeuten, dass den – u. a. von den evolutorischen und institutionellen Ansätzen sowie der Umweltpolitikanalyse betonten – Systembedingungen und weichen Kontextfaktoren eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zukommt. Andererseits lässt sich aus den Fallstudien auch ablesen, dass im Kontext der Rahmenbedingungen auch den Preiserwartungen eine besondere Bedeutung zukommt, was wiederum den Hypothesen der neoklassischen Umweltökonomik entgegenkommt. Dies deutet darauf hin, dass die verschiedenen für Umweltinnovationen relevanten Theoriestränge sich teilweise gegenseitig ergänzen.

### 2.1.3.3 Jenseits einzelner Politikinstrumente: Politikstile

Die Umweltpolitikanalyse - ein Zweig der empirisch ausgerichteten politikwissenschaftlichen Policy Analysis (Jänicke et al. 1999, Héritier 1993, Howlet, Ramesh 1995) - betont die Bedeutung von konsensualen Zielfindungsprozessen und der Institutionalisierung von Lernprozessen. Sie fasst eine Politik der nachhaltigen Entwicklung als strategisches Konzept auf, das der Komplexität von Problemlagen, Handlungschancen und Lernprozessen Rechnung trägt. Als politisch beeinflussbare Größe spielt hierbei der Politikstil eine entscheidende Rolle (Richardson 1982, Jänicke 1996).

Aus diesen Grundgedanken heraus lassen sich auch die Bedingungen für eine innovationsfreundliche Umweltpolitik gewinnen. Denn „ein Politikstil, der Ansatzpunkte zum Umweltschutz bei allen Akteuren setzt, schafft gleichzeitig Innovationsanreize auf der Anbieter- und Nachfrageseite [...] und fördert das Zusammenspiel von Innovation und Diffusion“ (Klemmer et al. 1999, S. 50). Die Betonung liegt damit indirekt auf der Bedeutung von kooperativer Zusammenarbeit aller am politischen Willensbildungs- und Entscheidungsprozess beteiligten Akteure. Anzustreben ist hier ein dialogorientierter Politikstil, der Erkenntnisse aus Lernprozessen und veränderten Konstellationen berücksichtigen kann, zugleich aber keinen Zweifel an der Entschlossenheit zur Umsetzung der Politik aufkommen lässt und eine Langfristorientierung ermöglicht (Blazejczak et al. 1999).

Im Unterschied zur neoklassischen Umweltökonomik kommt es bei der Umweltpolitikanalyse zu einer ganz erheblichen Relativierung der Instrumentendebatte, die als zweitrangig für den Erfolg gesehen werden: So zieht Jänicke (1996, S. 11) aufgrund der Auswertung zahlreicher international vergleichender Fallstudien folgendes Fazit: "Die Instrumentenwahl ist generell für den Ausgang wenig erklärungsfähig, wenn die Stärke, Konfiguration oder Kompetenz der Akteure, ihre strategische Langzeitorientierung, ihre situativen und strukturellen Handlungsbedingungen und der Charakter des Problems ausgeklammert werden. Es gibt im internationalen Vergleich auch kaum einen Erfolgsfall, der auf ein einziges Instrument zurückgeführt werden kann. Auch die einseitige Staatsfixierung wird den tatsächlich wirkenden Einflussfaktoren kaum gerecht. Oft ist es auch nicht primär die konkrete Instrumentenwahl, die zählt, sondern der informationelle Signaleffekt der Maßnahme als solcher. Wichtig sind dabei Informations- und Kommunikationsprozesse, die von Interventionen ausgelöst werden."

### 2.1.3.4 Empirische Ergebnisse zur Bedeutung der Instrumentenwahl

Empirische Analysen liegen einmal für die Bedeutung der Stringenz der Umweltpolitik, zum anderen für die Wirkungen unterschiedlicher Instrumententypen vor. Dabei verwenden zahlreiche Studien die Umweltausgaben als Proxy-Größe für die Stringenz der

Umweltpolitik, während die Innovationstätigkeit mit Hilfe von Patentindikatoren gemessen wird. Brunnermeier/Cohen (2003), Hamamoto (2006), Popp (2006) und Hasic et al. (2008) finden einen positiven Zusammenhang zwischen Kosten des Umweltschutzes als latente Variable für Stringenz und Innovationstätigkeit. Die Ergebnisse von Popp (2003), Lange-Bellas (2005) und Johnstone et al. (2008) unterstützen die Hypothese von der Überlegenheit ökonomischer Instrumente bezüglich des Kriteriums der Innovationsfreundlichkeit. Allerdings weist Taylor (2008) darauf hin, dass diese Überlegenheit sich abschwächt, wenn Unsicherheiten oder gar Instabilitäten die Perzeption des Instrumenteneinsatzes bestimmen. Walz (2004) verdeutlicht die Rationalität der Anbieter im Technologiewettbewerb, Innovationsaktivitäten zum Übertreffen eines gesetzten Mindeststandards hinaus zu unternehmen. Schließlich deuten die Ergebnisse von Lanoie et al. (2007) darauf hin, dass die Stringenz der Politik zentraler zu sein scheint als die Instrumentenwahl.

Auch auf Basis von Befragungen von Unternehmen findet sich ein gemischtes Bild über die Zusammenhänge von Umweltpolitik und Innovation. Rennings et al. (2006) und Rehfeld et al. (2007) verweisen auf die Bedeutung organisatorischer Aspekte. Die Analysen von Arimura et al. (2007) und Rennings et al. (2007) verdeutlichen ebenfalls die Wichtigkeit der Stringenz der Politikmaßnahmen. Horbach (2007) unterstreicht, dass es gerade die Bedeutung verschiedener Faktoren – Umweltpolitik, Einsatz von Managementsystemen, und generelle Innovationsfähigkeit der Unternehmen – ist, deren Zusammenspiel die Innovationswirkung bewirkt. Folie et al. (2007) und Popp et al. (2008) schließlich führen noch die Bedeutung von Marktdynamik und Kundenpräferenzen an. Im Energiebereich deuten die Ergebnisse von Popp (2002), Schleich et al. (2003) und Lutz et al. (2005) darauf hin, dass eine Verteuerung der Energiepreise zugleich auch Innovationen bewirkt. Allerdings schwankt sowohl die statistische Signifikanz der Ergebnisse, als auch die Bedeutung des Energiepreisanstiegs zwischen den Studien.

Die Innovationswirkungen von Politikmaßnahmen bei erneuerbaren Energietechnologien wurden in unterschiedlichen Länderfallstudien untersucht. Die meisten von ihnen gingen in ihrer Wirkungsanalyse auf die Anreizstrukturen ein, die von den unterschiedlichen Instrumenten ausgehen (Mitchell/Connor 2004; Langniss/Wiser 2003; Meyer 2004; Bird 2005; Menz 2005; Szarka 2006; Ragwitz et al. 2007; Lewis/Wiser 2007). Diese Studien kommen zum Ergebnis, dass Politikmaßnahmen ein zentraler Innovationstreiber sind. Die Subventionierung von FuE durch Förderprogramme sowie nachfrageseitige Programme, die die Einspeisung regulieren, spielen beide eine Rolle. Ein näher untersuchter Bereich aus dem Energiebereich ist die Windenergiebranche. Hier zeigen vergleichende internationale Fallstudien (vgl. Walz/Kotz 2003; Bergek/Jacobsson 2003; Beise/Rennings 2003, Ragwitz et al. 2005; Walz 2007) ein-

deutig, dass staatliche Politikmaßnahmen, die dem Bereich der ökonomischen Instrumente zugerechnet werden, ein wesentlicher Treiber für die Innovationen waren. Allerdings relativieren zwei Ergebnisse die neoklassische Hypothese von eindeutigen positiven Innovationswirkungen der ökonomischen Instrumente: Erstens zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Instrumentenausprägungen. So scheinen verbindlich festgelegte Einspeisevergütungen deutlich höhere Wirkungen zu zeitigen als Quoten- oder Bidding-Systeme. Zweitens gibt es eine Reihe weiterer Systembedingungen, die für den Erfolg von Bedeutung sind, wie die Kommunikation zwischen den Akteuren, FuE-Politiken und das Vorliegen langfristiger Politikziele, die zu einer erhöhten Legitimität der Innovationsanstrengungen beitragen. Damit wird aber deutlich, dass die Entscheidung für ein ökonomisches Instrument allein bei weitem noch keine positive Innovationswirkung garantiert, sondern vielmehr zahlreiche zusätzliche Bedingungen beachtet werden müssen.

## **2.2 Innovationen bei Erneuerbaren Energietechnologien im Rahmen des Innovationssystemansatzes**

### **2.2.1 Konzeption der „Systems of Innovation“**

Zur Erklärung der Innovationstätigkeit bedient sich die neuere Innovationsforschung der Heuristik des Innovationssystems (vgl. z. B. Carlsson, Stankiewicz 1995; Edquist, McKelvey 2000; Carlsson et al. 2002; Lundvall et al. 2002; Edquist 2005; Malerba 2005). Die zentrale Aussage dieser Konzeption ist, dass das Hervorbringen und die Diffusion neuer Lösungen nicht nur vom Vorliegen entsprechender Anreize bei Innovatoren und Adaptionern abhängt, sondern auch vom Zusammenspiel der unterschiedlichen Akteure und Institutionen des Innovationsprozesses (vgl. Abbildung 2-2).

Der Innovationssystemansatz weist kein geschlossenes theoretisches Fundament auf. Er ist bewusst heterodox aufgebaut ist, um möglichst viele relevante Aspekte berücksichtigen zu können. Zielsetzung des Innovationssystemansatzes ist nicht die Theoriebildung, sondern die Herausbildung einer anwendungsorientierten Heuristik, mit der reale Innovationssysteme systematisch analysiert werden können. Im Rahmen dieser Heuristik kommt es zu einer Erweiterung der Einflussfaktoren. Neben der Einschätzung der Wirtschaftlichkeit von Innovationen durch die Akteure wird zunehmend auch weichen Kontextfaktoren wie z. B. den Kommunikationsmustern zwischen den Beteiligten, aber auch dem Regulierungsmuster zwischen Politik und Regulierten und den Koevolutionen der Systeme erhöhte Bedeutung zugeschrieben – mit anderen Worten der Vielzahl der Einflussfaktoren, die in den vorigen Kapiteln einzeln diskutiert wurden.

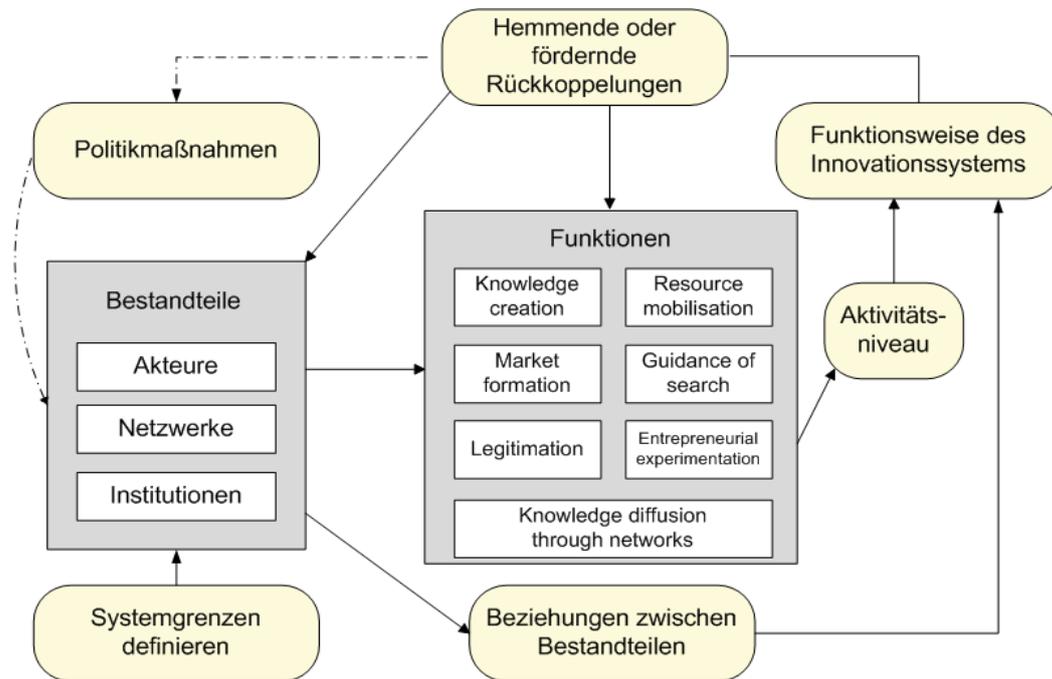


auch die spezifischen Regulierungserfordernisse des Elektrizitätsmarktes berücksichtigt werden müssen.

## 2.2.2 Beeinflussung der Funktionen eines Innovationssystems

Insbesondere im Hinblick auf die Analyse der Entwicklung von Innovationssystemen sowie hinsichtlich einer vergleichenden Systematisierung zwischen den Ländern wird zunehmend eine Betrachtung der Funktionen eines Innovationssystems durchgeführt (Smits/Kuhlmann 2004; Hekkert et al. 2007 und 2008; Bergek et al. 2008 b und c). Es wird hervorgehoben, dass für die Steuerung nicht nur der Innovationsgeschwindigkeit sondern auch der Innovations*richtung*, wie es für eine umweltorientierte Innovationspolitik notwendig ist, eine dynamische Betrachtung des Innovationssystems notwendig ist (Hekkert et al. 2006). Ausgehend von technologiespezifischen Innovationssystemen als Analyseeinheiten, wird der Frage nachgegangen, welche Veränderungsprozesse ablaufen, damit emergente Technologien und dazugehörige emergente Innovationssysteme so wachsen, dass sie neben oder als Teil des bereits bestehenden Innovationssystems bestehen können. Als zentral werden dabei die *Funktionen* eines Innovationssystems angesehen, nämlich (1) unternehmerische Tätigkeit, (2) Wissensgenerierung, (3) Wissensdiffusion über Netzwerke, (4) Lenkung der Suche, (5) Marktformation, (6) Mobilisierung von Ressourcen und (7) Schaffung von Legitimität bzw. Überkommen von Widerständen gegen Veränderungen. Es wird argumentiert, dass die Funktionen sich durch gegenseitige Wechselwirkungen selbst verstärken (oder abschwächen) können, so dass letztlich ein Wachstums- (oder Schrumpfungs-) Prozess für das betrachtete technologiespezifische Innovationssystem entsteht. In der Analyse dieser Dynamik ist besonders die zeitliche Abfolge von Ereignissen (z. B. regulierende Intervention, Aktivitäten der Unternehmer, Reaktion der Öffentlichkeit / Legitimität...) wichtig. Dabei kann es zu selbstverstärkenden Prozessen und Rückkopplungen zwischen den einzelnen Funktionen kommen, die entweder positiv (virtuous cycle) oder negativ (vicious cycle) auf die Entwicklung des Innovationssystems einwirken. Insgesamt geht eine Innovationssystemanalyse damit entsprechend der in Abbildung 2-3 schematisch skizzierten Vorgehensweise vor.

Abbildung 2-3: Schema einer Innovationssystemanalyse



Quelle: in Anlehnung an Bergek et al. 2008c

In den letzten Jahren hat es eine Reihe von Veröffentlichungen zu Innovationsprozessen bei erneuerbaren Energietechnologien gegeben, die auf einem Innovationssystemansatz beruhen (Bergek/Jacobsson 2003; Agterbosch et al. 2004; Foxon et al. 2005; Alkemade et al. 2007, Walz 2007, Bergek et al. 2008a, Jacobsson et al. 2009, Hekkert/Negro 2009). Gleichzeitig gibt es zahlreiche weitere Fallstudien, in denen Teilelemente wie der Politikstil oder das gewählte Politikinstrumentarium in Fallbeispielen untersucht werden (Jänicke/Weidner 1995; Klemmer et al. 1999; Reiche/Bechberger 2004; Lauber/Mez 2004, Bergek et al. 2008a). Fasst man diese Fallstudien zusammen, ergeben sich die folgenden stilisierten Ergebnisse:

- Regulierung auf der Angebotsseite, wie z. B. FuE-Subventionen, wirken nicht nur bezüglich der Funktionen "supply of resources" und "help in guiding search". Sie tragen außerdem zur Formung von Netzwerken bei und stärken damit die Funktion "knowledge diffusion". Erwartet wird damit ein signifikanter positiver Beitrag von FuE-Subventionen auf Innovationen.
- Da die externen Umweltkosten trotz vorliegender partieller Internalisierung (z. B. durch den Emissionshandel) insgesamt nur zum Teil in die Kosten internalisiert sind, liegen die entscheidungsrelevanten Kosten der erneuerbaren Energien in vielen Fäl-

len noch immer über denjenigen alternativer Versorgungsoptionen. Regulierungen auf der Nachfrageseite, (z. B. durch Einspeisevergütungen, Quotasysteme) sind erforderlich, um die Nachfrage herbeizuführen. Durch diese Regulierung werden die Funktionen "market formation", "supply of resources" und "knowledge creation by user-producer interaction" ermöglicht.

- Die Stabilität bzw. Vorhersehbarkeit der Regulierung, sowie die Langfristorientierung der Zielbildung sind wichtige Variablen des Politikstils, die auf die Funktionen "legitimacy of technology" und "guidance of search" einwirken.
- Die Ausgestaltung der nachfrageseitigen Instrumente beeinflussen die Risikoperzeption und die Transaktionskosten und wirken auf die Funktionen "supply of resources" und "market formation" ein. Auf Grund der durchgeführten Fallstudien wird davon ausgegangen, dass feste Einspeisevergütungen bezüglich dieses Wirkungsmechanismus insbesondere in den früheren Innovationsphasen eine größere Wirkung aufweisen als alternative Instrumentarien.
- Die Diversität der Technologieoptionen ist ein zentraler Aspekt für das Wirksamwerden von Selektionsmechanismen. Daher ist die Ausgestaltung der Fördermechanismen auch bezüglich der Anzahl der Technologien, die zur Anwendung kommen, zentral. Je breiter die Förderung angelegt ist, desto mehr Technologien kommen zum Einsatz, wodurch das "Lernen im Markt" begünstigt wird.

Zentrales Ergebnis ist damit, dass die Innovationsprozesse sehr stark durch das Wechselspiel politischer Maßnahmen mit den funktionellen Zusammenhängen bestimmt werden. Gleichzeitig wird ein überproportional hoher Einfluss staatlicher Aktionen deutlich, um positive Rückkopplungsschleifen und einen selbsttragenden Aufbau des Innovationssystems zu initiieren.

### 2.2.3 Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse

Fallstudien wie die gerade angeführten zu den Innovationssystemanalysen bei erneuerbaren Energien weisen den Nachteil auf, dass sie schwer vergleichbar und verallgemeinerbar sind. Daher wurde eine ökonometrische Analyse durchgeführt, in der die Bestimmungsgründe für Innovationen bei Windturbinenentwicklung statistisch untersucht wurden. Folgende Variablen wurden (Walz et al. 2011) herangezogen:

- Als zu erklärende Variable werden die Patentzahlen bei Windkraftturbinen herangezogen.
- Die jährlichen staatlichen FuE-Ausgaben für Windkraft bilden die Regulierung auf der Angebotsseite ab.
- Der Einfluss der Nachfragerregulierung im heimischen Markt wird durch die Entwicklung der installierten Kapazität im Inland erfasst. Hinsichtlich der Bedeutung der Nachfrageentwicklung im Ausland auf die Innovationstätigkeit im Inland werden die Exporte an Windkraftanlagen herangezogen (learning bei exporting).

- Zur Bedeutung der Politikvariablen wurde ein länderspezifischer Politikindex gebildet, in den entsprechend den oben skizzierten Fallstudienresultaten die Stabilität und Langfristigkeit der Regulierung und Zielsetzung, der Instrumententyp sowie die Breite der geförderten Technologievarianten eingeht.

Diese Analyse bezieht sich auf 12 Länder (Österreich, Dänemark, Frankreich, Bundesrepublik Deutschland, Italien, Japan, Niederlande, Spanien, Schweden, Schweiz, Großbritannien, USA) und den Zeitraum von 1991 bis 2006. Für die Panelschätzung aus Zeitreihen und Querschnittsdaten wurde schätztechnisch ein binominaler Ansatz sowie ein Poisson-Panel Ansatz gewählt. Im Ergebnis zeigt sich, dass die gewählten erklärenden Variablen die Vornahme von Innovationen statistisch signifikant erklären können.

Diese ökonometrische Analyse unterstreicht die Bedeutung staatlichen Handelns für die Innovationen bei erneuerbaren Energietechnologien. Nicht nur die FuE-Förderung, sondern auch die frühzeitige Diffusion der Technologien in den Markt sind eine wichtige Voraussetzung für weitere Innovationen. Hier spielen auch Exporterfolge eine wichtige Rolle, die die Innovationstätigkeit im Inland weiter antreiben. Schließlich deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Stil und Ausgestaltung der Politik in der Tat positive Innovationserfolge nach sich ziehen.

Diese Ergebnisse sind von höchster Bedeutung für die gegenwärtige Politikdebatte. Danach wäre eine Förderstrategie, die einseitig auf die Förderung von FuE setzt, und die Diffusion der Erneuerbaren Energietechnologien auf später verschiebt, ganz eindeutig suboptimal, da die durch frühzeitige Diffusion erforderlichen Lerneffekte aus der user-producer Interaction dann ausfallen würden. Insofern sind Maßnahmen wie das EEG in Deutschland nicht nur ein Instrument zur Steigerung des Einsatzes bestehender Erneuerbarer Energietechnologien, sondern gleichzeitig auch zentrales Element einer nachfrageseitigen Innovationspolitik.

Tabelle 2-1: Zusammenhang von staatlicher Regulierung und den Funktionen eines Innovationssystems

<p>Nachfrageseitige Regulierung sorgt für Nachfrage und Diffusion erneuerbarer Energietechnologien und ist daher Voraussetzung für</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• market formation</li> <li>• supply of resources</li> <li>• knowledge diffusion by user-producer interaction</li> </ul>
<p>Angebotsseitige Regulierung zur Förderung von FuE-Aktivitäten trägt bei zu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• knowledge diffusion through networks</li> <li>• knowledge creation</li> <li>• supply of resources</li> <li>• guidance of search</li> </ul>
<p>Stabilität der Regulierung und langfristige Zielsetzungen führen zu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• legitimacy of technology</li> <li>• guidance of search</li> </ul>
<p>Design der Politikinstrumente (z. B. feste Einspeisevergütungen, Degression der Tarife) beeinflussen die Risikoperzeption und die Eintrittsmöglichkeiten neuer Akteure und damit mittelbar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• supply of resources</li> <li>• market formation</li> <li>• knowledge diffusion through networks</li> </ul>
<p>Anzahl und Diversität der geförderten Technologien erhöhen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• knowledge creation</li> <li>• guidance of search</li> </ul>

Quelle: in Anlehnung an Walz et al. 2008c

## 2.3 Bestimmungsgründe für First-Mover-Vorteile

### 2.3.1 Bedeutung und Begriffsbestimmung

Der Zusammenhang zwischen Innovation und erneuerbaren Energietechnologien wird zunehmend auch im Kontext der wirtschaftlichen Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes erneuerbarer Energien thematisiert. Neben der preislichen Wettbewerbsfähigkeit, die durch die Kosteneffekte beeinflusst wird, werden Außenhandelserfolge auch durch den *Qualitätswettbewerb* bestimmt. Vor allem bei technologieintensiven Gütern, zu denen auch die Umwelt- und Klimaschutztechnik zählen, hängen hohe Marktanteile von der Innovationsfähigkeit einer Volkswirtschaft und der frühzeitigen Marktpräsenz ab (Cantwell 2005). Eine forcierte nationale Strategie im Umweltbereich führt nach dieser Argumentation dazu, dass sich die betreffenden Länder frühzeitig auf die Bereitstel-

lung der hierzu erforderlichen Güter spezialisieren. Bei einer nachfolgenden Ausweitung der internationalen Nachfrage nach diesen Gütern sind diese Länder dann auf Grund ihrer frühzeitigen Spezialisierung und des erreichten Innovationsvorsprungs in der Lage, sich im internationalen Wettbewerb durchzusetzen (Blümle 1994; Porter/van der Linde 1995; Taistra 2001). Die strategischen Überlegungen, die eine moderne Umweltpolitik im Einklang mit der Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit sehen, und daher auf eine Integration von Umwelt- und Innovationspolitik abzielen, beruhen auf dieser Logik von „First-Mover-Vorteilen“. Beispiele hierfür finden sich sowohl im nationalen Rahmen (z. B. die Initiative Innovation und Umweltschutz des BMU) als auch in der jüngsten europäischen Politikdiskussion um „Europe 2020 – A strategy for smart, sustainable and inclusive growth“.

Eine Realisierung von First-Mover-Vorteilen erfordert ein Nachziehen des Auslandes. Sicherlich gibt es erhebliche Schwierigkeiten bei internationalen Verhandlungen im Umweltbereich. Ein wichtiges Beispiel hierfür sind die internationalen Klimaverhandlungen, bei denen der Einbezug wichtiger Emittenten in verbindliche Zielvereinbarungen noch immer aussteht. Dennoch spricht der ökologische Problemdruck für ein Nachziehen des Auslandes, vor allem wenn die relevanten Problemlösungsstrategien zusätzlich zur Verminderung der ökologischen Problemlagen auch noch dazu beitragen, die wirtschaftlichen Belastungen steigender Energie- und Ressourcenpreise abzumildern. Die zunehmende Diffusion erneuerbarer Energien in Schwellenländern, sowie Aktivitäten wie der Aufbau von IRENA deuten darauf hin, dass das Nachziehen bei den Erneuerbaren Energien bereits begonnen hat.

Für das Realisieren von First-Mover-Vorteilen müssen des Weiteren die inländischen Anbieter international wettbewerbsfähig sein, damit einerseits die durch die inländische Vorreiterrolle induzierte Nachfrage von ihnen und nicht von ausländischen Anbietern gedeckt wird, und sie andererseits von der Nachfrage in den nachziehenden Ländern überhaupt profitieren können (Ekins/Speck 1998; Taistra 2001). In diesem Zusammenhang spielen die Bedingungen für die Etablierung so genannter Vorreitermärkte (lead markets) eine wichtige Rolle. Unter den Bedingungen der Globalisierung sind entscheidende Voraussetzungen für den Erfolg eines nationalen Innovationssystems die Etablierung schwer transferierbarer Leistungsverbände, die aus Kombinationen von technologischer Leistungsfähigkeit auf der Angebotsseite mit einer gegenüber Innovationen aufgeschlossenen und frühzeitige Lerneffekte begünstigenden Nachfrage sowie ihrer Integration in ausdifferenzierte Produktionsstrukturen bestehen (Gerybadze et al. 1997, Meyer-Krahmer 2004). Folgende Faktoren sind relevant für die Etablierung derartiger Vorreitermärkte:

- Technologiebezogene Faktoren auf der Angebotsseite,

- Marktkontext-Faktoren auf der Nachfrageseite,
- Regulierungsbedingte Faktoren, sowie
- Ausprägung der produktions- und wissensbezogenen Verlagerungsfaktoren.

Diese Faktoren, die die Herausbildung von Vorreitermärkten begünstigen, werden im Folgenden diskutiert. Gegenüber einer Berücksichtigung lediglich der nachfragebezogenen Marktkontextfaktoren, die als "Lead-Market-Faktoren im engeren Sinne" vor allem in den Arbeiten von Beise (2004) in den Vordergrund gestellt werden, verdichtet sich in der jüngsten Diskussion der Eindruck, dass auch Faktoren hinsichtlich der technologischen Wettbewerbsfähigkeit auf der Angebotsseite berücksichtigt werden müssen (vgl. auch Jacob et al. 2005). Damit der Vorreitermarkt-Vorteil auch zu Exportvorteilen im Sinne eines positiven Beitrags für die heimische Wirtschaft führt, muss zudem die Produktion der Technologien für den Auslandsmarkt zumindest für eine gewisse Zeit im Inland verbleiben und nicht ins Ausland transferiert werden. Damit werden auch Faktoren relevant, die einen derartigen Transfer der Produktion erschweren.

### **2.3.2 Technologiebezogene Faktoren auf der Angebotsseite**

Bedingt durch die Diskussion um das Leontief-Paradoxon<sup>2</sup> wurden in den 1960er Jahren zwei Ansätze entwickelt, die explizit auf die Rolle technologiebezogener Faktoren bei der Erklärung des Außenhandels eingehen (vgl. Wakelin 1997, Fagerberg 1994,,: Die Technology Gap Theorie (z. B. Posner 1961) und die Product Cycle Theorie (z. B. Vernon 1966) gehen davon aus, dass vor allem die fortgeschrittenen Länder neue Produkte einführen. Beide postulieren eine kurzfristige Innovationsrente für diese Länder, die im Zeitablauf abnimmt. Hierbei unterscheiden sich beide Theoriestränge in der Begründung:

- Bei der Technology Gap Theory ist die zur Imitation notwendige Lernzeit und ein Reaktionslag für die temporäre Aufrechterhaltung der Innovationsrente verantwortlich. Letztendlich kann dies auf unterschiedliche technologische Fähigkeiten zurückgeführt werden (technology gap). Mit zunehmender Diffusion des Produktes erfolgt dann aber die Erosion der Innovationsrente.
- Bei der Product Cycle Theorie wird die Innovationsrente durch hohe Know-how-Anforderungen in der Anfangsphase des Produktzyklus begründet. Mit zunehmender Standardisierung der Produktion erhöht sich die Bedeutung der Arbeitskosten gegenüber den Know-how-Vorteilen, so dass die Produktion an Standorte mit geringen Arbeitskosten verlagert wird. Letztendlich ist es also eine mit zunehmender

---

<sup>2</sup> Das Leontief-Paradoxon beschreibt die Erkenntnis, dass die USA – entgegen dem Faktorproportionentheorem – in der Zeit nach dem 2. Weltkrieg v. a. arbeitsintensive Güter exportierte.

Produktdauer abnehmende Bedeutung technologischer Faktoren, die die Erosion der Innovationsrenten bewirkt.

Die zunehmende Bedeutung multinationaler Unternehmen und die zunehmenden Schwierigkeiten in der räumlichen Zuordnung einzelner Schritte der Produktentwicklung- und -vermarktung stellt auch die Product-Cycle-Theorie in Frage. Insbesondere in international verflochtenen Großunternehmen besteht die Tendenz, Entwicklungs- und Produktionsschritte dort durchzuführen, wo die jeweils erforderlichen Rahmenbedingungen optimal sind. Der aus Sicht der 1960er Jahre noch gültige idealtypische Produktzyklus dürfte sich vor dem Hintergrund der starken Präsenz multinationaler Unternehmen auf den Weltmärkten gewandelt hat. Des Weiteren hebt die an der Produktzyklushypothese vorgebrachte Kritik immer wieder hervor, dass eine Verlagerung des Produktionsstandortes nicht automatisch erfolgt: Produkte sind in ihrem Lebenszyklus einem ständigen Wandel unterworfen. Learning by using führt über Nutzerrückkopplungen zu ständigen Verbesserungen und Weiterentwicklungen (inkrementale Innovationen), so dass nicht nur die Prozesse für eine kostengünstigere Produkterstellung verändert werden, sondern auch Produktinnovationen selbst über den gesamten Lebenszyklus charakteristisch sind. Damit wird deutlich, dass aus der Produktzyklushypothese kein automatisches Abschwächen der technologiebezogenen Faktoren mehr abgeleitet werden kann.

Da Außenhandelserfolge bei technologieintensiven Gütern durch die technologischen Fähigkeiten mit verursacht werden (vgl. Dosi/Soete 1988; Fagerberg 1988), kommt Indikatoren, die diese technologiespezifisch und zugleich ländervergleichend messen, auch erhebliche Bedeutung für die Erklärung von Außenhandelserfolgen zu. Empirische Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Außenhandel und technologiebezogenen Indikatoren zeigen eine hohe Bedeutung der Indikatoren FuE-Ausgaben und Patente auf (vgl. Amable/Verspagen 1995; Greenhalgh et al. 1996; Wakelin 1997; und 1998; Blind 2001; Sanyal 2004; Lachenmeier/Wößmann 2006; Andersson/Ejerme 2008). Zusätzlich wurden als Kontrollvariablen häufig auch noch die Bedeutung des Preises, Investitionen sowie die Marktgröße herangezogen (vgl. Wakelin 1997, Fagerberg 1995a, Fagerberg/Godinho 2005).

Letztendlich kommen die empirischen Studien zum Ergebnis, dass die gewählten Technikindikatoren eine wichtige Rolle bei der Erklärung des Außenhandels spielen. Allerdings deuten die Ergebnisse auch auf beträchtliche Unterschiede zwischen den Ländern und zwischen den Branchen hin. Insbesondere für den Chemiebereich, den Maschinenbau und der Fahrzeugindustrie wird eine hohe Bedeutung der Technologieindikatoren ausgemacht. Aber auch für Metallprodukte und Lebensmittel, die traditionell nicht zu den High-Tech-Bereichen gezählt werden, ergibt sich ein beträchtlicher Ein-

fluss. Die Ergebnisse von Blind/Frietsch (2004), die im Rahmen der begleitenden Studien zur technologischen Leistungsfähigkeit durchgeführt wurden, zeigen auf, dass sich die traditionellen strukturellen Verbindungen zwischen den Innovationsindikatoren des FuE-Inputs- bzw. des intermediären Outputs (Patente) zum Außenhandelserfolg verändert haben. Danach deutet sich an, dass unter den technologiebezogenen Faktoren den Patentanmeldungen eine höhere Erklärungskraft zukommen dürfte als den FuE-Aufwendungen. Damit dürfte dem Indikator der Patentanmeldungen für die Beurteilung des Potenzials zur Bildung von Vorreitermärkten eine besondere Bedeutung zukommen. Dieses Ergebnis wird durch Madsen (2008) bestätigt, der insbesondere die Bedeutung transnationaler Patente hervorhebt.

### 2.3.3 Marktkontextfaktoren der Nachfrage

Eine der ersten Ansätze, der der Nachfrageseite Gewicht bei der Bestimmung der Außenhandelsstruktur zuweist, stammt von Linder (1961) (vgl. auch Blümle 1994, Fagerberg 1994, Fagerberg 1995a, Dosi et al. 1990). In seiner Argumentation wird von der Nachfrage ein neuer Bedarf artikuliert, den die bestehenden Produkte nicht abdecken können. Spätere Arbeiten im Zusammenhang mit den Bestimmungsgründen von Innovationen haben diesen Zusammenhang bestätigt und zu dem Begriff des „lead users“ geführt (vgl. von Hippel 1988). Lead-User zeichnen sich dadurch aus, dass sie (Morrison et al. 2004)

- sich einen hohen Nutzen von dem neuen Produkt erwarten,
- Vorreiter für einen kommerziellen Trend (d. h. breiteren Markt) bilden und
- auf lokale, innovationsrelevante Ressourcen zurückgreifen.

In der nachfragegetriebenen Innovationsentwicklung steht nicht die Technologie, sondern der Kundennutzen (Leistungsbündel) im Vordergrund. Im Unterschied zur Interaktion mit "normalen" Kundengruppen zeichnen sich Lead-User dadurch aus, dass sie selbst in den Innovationsprozess eingreifen und damit an der zunehmend als problematisch wahrgenommenen Schnittstelle der Marktumsetzung technischer Lösungen ansetzen. Gleichzeitig geben sie auch den Anstoß zur Entwicklung radikaler Innovationen. Auf Grund der Marktnähe, unterstützt durch kulturelle und sprachliche Faktoren, werden im heimischen Markt vertretene Anbieter diese neue Nachfrage zuerst wahrnehmen und entsprechende Produkte anbieten. Wenn sich diese als Erfolg herausstellen, werden sie auf den internationalen Markt vermarktet. In dieser Betrachtungsweise ist es also die Marktnähe zu neuen Bedürfnissen und die Interaktion mit den Lead-Usern, die einen "home advantage" ausmacht.

Eine Aufnahme dieses Gedankengangs findet sich auch bei Porter (1990). Er verbindet in seinem Konzept Nachfrage- und Angebotsfaktoren, indem er die Bedeutung anspruchsvoller Kunden und zudem die Rolle von Marktstruktur und von Economies of Scale thematisiert. Auf der Nachfrageseite geben anspruchsvolle Kunden dem innovierenden Unternehmen Informationen über ihre spezifischen Bedürfnisse und rückkoppeln die Passfähigkeit neuer Lösungen. Beim Einfluss der Marktstruktur auf die Innovationen wird davon ausgegangen, dass hart umkämpfte Märkte zu höheren Innovationsdruck führen, und damit bessere Voraussetzungen für den internationalen Wettbewerb schaffen. Dieser Gedankengang findet sich in einer Vielzahl von Veröffentlichungen auch aus der Innovationsforschung bzw. der Evolutionären Ökonomie (vgl. z. B. Dosi et al. 1990). Hierbei spielen mehrere Facetten eine Rolle: härter umkämpfte Märkte führen sowohl zu höheren Qualitätsanforderungen als auch dazu, dass mehr Innovationsdesigns im Markt getestet werden, unter denen sich dann die erfolgreichen herauschälen können (Beise/Cleff 2004).

Darüber hinaus wird von Porter (1990) auch die Bedeutung regulativer Rahmenbedingungen hervorgehoben, die zusammen mit den schon angesprochenen Faktoren sowie zusätzlich den angebotsbedingten Faktoren und der Bildung unterschiedlicher Branchencluster (auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird) Gegenstand seines Modells der internationalen Wettbewerbsfähigkeit bilden.

Überlegungen für eine Präzisierung der Marktkontextfaktoren wurden von Beise/Cleff (2004) durchgeführt. Sie sortieren die unterschiedlichen Begründungen in fünf unterschiedliche Typen von Lead-Market-Faktoren, die alle erklären sollen, warum die Marktbedingungen eines Landes dazu führen, dass in diesem Land sich eher ein globales Produktdesign herausbildet, das von den anderen Ländern übernommen wird. Sie führen folgende Faktoren an:

- Nachfragevorteil: Hierunter wird eine frühzeitige Antizipation globaler Trends verstanden, ähnlich wie sie Lead-User haben.
- Preisvorteil (Lernkurven, Skaleneffekte, Verbundvorteile): Unter diesem Punkt werden Größenvorteile des Marktes subsumiert.
- Marktstrukturvorteil: Hier wird die Wettbewerbsintensität auf den relevanten Märkten betrachtet.
- Transfervorteil: Hierunter fällt der Demonstrationseffekt, der die Unsicherheit für neue Konsumenten über die Funktionsfähigkeit der Innovation reduziert. Er spielt vor allem dann eine Rolle, wenn gute Kommunikationsbedingungen zwischen Ländern diese Kommunikation erleichtern.

- Exportvorteil: Hierunter werden Effekte wie die Repräsentativität der Präferenzen im heimischen Markt verglichen mit dem Weltmarkt oder die Sensibilität gegenüber Änderungen der Nachfragebedingungen auf dem Weltmarkt subsumiert.

Einige dieser Kriterien, z. B. die Wettbewerbsintensität, können mit Hilfe traditionell verwendeter Indikatoren wie einem Herfindahl-Index der Marktkonzentration operationalisiert werden. Andere Kriterien (z. B. der Exportvorteil) sind schwieriger zu hinterlegen und können nur auf Basis subjektiver Einschätzungen implementiert werden.

### 2.3.4 Regulierungsbedingte Faktoren

Zwar bietet die Systematik von Beise/Cleff (2004) einen Ausgangspunkt zur Quantifizierung der Marktkontextfaktoren. Allerdings ist die Bedeutung der Regulierung bei diesem Schema bisher unterbelichtet. Aus Sicht der Heuristik der Innovationssysteme, aber auch des Konzeptes von Porter, ist die Innovationsfreundlichkeit der Regulierung ein wichtiger Faktor, der bei der Beurteilung des Vorreiterpotenzials von Ländern nicht vernachlässigt werden darf.

In der bisherigen Literatur lassen sich unterschiedliche Ansätze verfolgen, mit denen die Effekte der Regulierung auf Innovationen und damit auch auf die Herausbildung von Vorreitermärkten untersucht werden. In der neoklassischen Volkswirtschaftslehre ist entscheidend, dass der Lösungsspielraum der Unternehmen möglichst wenig eingeschränkt wird. Weniger Regulierung wird hier oftmals per se als innovationsfreundlicher eingestuft. In dieser Forschungstradition werden insbesondere Studien zur Innovationsfreundlichkeit aggregierter nationaler Regulierungsregime durchgeführt. Das World Economic Forum und das International Institute for Management Development (IMD) führen z. B. jährliche Umfragen unter Industrieverbänden in mehr als 50 Ländern durch, in die auch einige wenige Fragen zu regulativen Rahmenbedingungen integriert sind. Die OECD hat im Jahr 1998 und 2003 Indikatoren für die Produktmarktregulierung auf Basis der Befragung der verantwortlichen Ministerien in den OECD-Ländern entwickelt (Bassini und Ernst 2002; Convey et al. 2005). Dieser Untersuchungsansatz entwickelt anhand von qualitativen Antworten quantitative Indikatoren für die Produktmarktregulierung, die sich vor allem auf die gesamte Volkswirtschaft beziehen. Diese Ansätze unterstellen implizit, dass mit einer geringeren bzw. liberaleren Produktmarktregulierung Innovationsaktivitäten stimuliert werden, wobei dieser Zusammenhang für die Gruppe der hoch entwickelten Länder nicht mehr so eindeutig ist. Weitere Untersuchungen auf Basis der Umfrageergebnisse in Blind et al. (2004) machen deutlich, dass regulative Rahmenbedingungen einen überdurchschnittlichen Einfluss für die Entscheidung von Unternehmen haben können, einen nationalen Markt für die erstmalige Einführung einer Innovation auszuwählen. Allerdings wird der von der neoklassischen

Theorie postulierte eindeutige Zusammenhang von Deregulierung und Innovationsfreundlichkeit nicht bestätigt. Insgesamt besteht bei der Analyse der Zusammenhänge zwischen allgemeinem Regulierungsregime und Innovationsfähigkeit einer Volkswirtschaft noch erheblicher Forschungsbedarf. Die umfassende Regulierungstaxonomie von Blind et al. (2004) bilden einen viel versprechenden Ansatz zur konzeptionellen Erweiterung der bisherigen empirischen Konzepte.

Neben dem allgemeinen nationalen Regulierungsregime spielen auch sektorspezifische Regulierungen eine wichtige Rolle. Die Zusammenhänge zwischen allgemeinem Regulierungsregime und Innovationstätigkeit können durch Unterschiede in den sektorspezifischen regulativen Rahmenbedingungen überlagert werden. Erste Hinweise aus bestehenden Fallstudien (Blind et al. 2004; Walz 2007) deuten auf einen erheblichen Einfluss der sektoralen ökonomischen Regulierung hin. Dieser Tatbestand wird an Bedeutung gewinnen, wenn sich die allgemeinen Regulierungsregime – wie es sich z. B. für die Mitgliedsländer der EU abzeichnet – aneinander annähern. Gerade Umwelt- und Nachhaltigkeitsinnovationen sind ganz zentral von der Regulierung betroffen:

- Zusätzlich zu den allgemeinen Regulierungsanforderungen aus technologiepolitischer Sicht (z. B. Eigentumsrechte an Innovationen) begründen hier zahlreiche externe Kosten der Umweltverschmutzung die Notwendigkeit von Umweltregulierungen, die den Markt ganz wesentlich beeinflussen bzw. ihn sogar erst konstituieren. Beise/Rennings (2005) sprechen in diesem Zusammenhang von der doppelten Externalität.
- Kernbereiche von Umwelt- und Nachhaltigkeitsinnovationen, nämlich große Bereiche der Energie-, Wasser- und Verkehrswirtschaft sind Sektoren mit monopolistischen Bottlenecks, d. h., sie sind durch hohe Anteile von „sunk costs“ und „economies of scale“ auf Grund von Netzgebundenheit charakterisiert. Auch nach einer (partiellen) Liberalisierung sind diese Sektoren durch eine beträchtliche ökonomische Regulierungsdichte geprägt. Das Lead-Markt Potenzial eines Landes wird durch den Effekt dieser Regulierung auf die Innovationsaktivitäten wesentlich mitgeprägt. Für diese Sektoren wird sogar eine "triple regulatory challenge" konstatiert (Walz 2007).

Diese erhöhte Bedeutung der sektorspezifischen Regulierung wirkt ganz im Sinne einer nachfrageorientierten Innovationspolitik bei Umwelt- und Nachhaltigkeitsinnovationen, verstärkt auf die nachfrageseitige Marktentwicklung. Damit kommt es zu einer Relativierung des Einflusses der Lead-User. Das Lead-Markt-Potenzial eines Landes im Bereich der Umwelttechnik hängt folglich aus Gründen nachfrageseitiger Marktkontextfaktoren ganz massiv von der Umweltregulierung und der sektorspezifischen ökonomischen Regulierung ab. Die Einführung von Politikinnovationen in der Regulierung wird damit zu einem ganz entscheidenden Lead-Markt Faktor. Dies setzt voraus, dass innovationsfreundliche sektorspezifische Regulierungsformen identifiziert werden müs-

sen. Neben dem bewussten Setzen einer neuen Regulierung, die die Entstehung erst ermöglicht bzw. erfordert, muss die Offenheit eines Regulierungssystems für Innovationen analysiert werden.

Auch aus Sicht der Heuristik der sektoralen Innovationssysteme ist die Regulierung ein wichtiger Faktor. In der jüngsten Literatur wird die Bedeutung von Erfolgsfaktoren für ein Innovationssystem hervorgehoben (vgl. Abschnitt 2.2). Hier könnte ein Ansatz darin bestehen, die Auswirkungen der Regulierung auf diese Erfolgsfaktoren zu untersuchen, um so die Verbindung zwischen Innovationswirkung und ökologischer und ökonomischer Sektorregulierung herzustellen (Walz 2007). Dabei gilt zu berücksichtigen, dass sich die Bedeutung der Erfolgsfaktoren im Allgemeinen verschiebt. Nach Nelson (1994) und Utterback (1994) lassen sich eine erste Experimentierphase mit zahlreichen Firmeneintritten und –austritten, hoher Technologiediversität und kleinen Nischenmärkten von einer zweiten Phase unterscheiden, die durch hohes Marktwachstum und Konsolidierung der Angebotsseite gekennzeichnet ist. In der Experimentierphase kommt der Generierung neuen Wissens und der Hilfestellung im Suchprozess gesteigerte Bedeutung zu. Die Regulierung kann hier die Legitimität neuer technischer Lösungen, die technologische Diversität und die Etablierung neuer Akteure und Netzwerke begünstigen. In der zweiten Phase gewinnt demgegenüber die Bereitstellung von Ressourcen zur Marktexpansion zunehmend an Bedeutung.

Die bisher in der Forschung erzielten Ergebnisse unterstreichen, dass für die Bestimmung von Vorreitermärkten neben einer Beurteilung der Innovationsfreundlichkeit des allgemeinen nationalen Regulierungsregimes eine Beurteilung der sektorspezifischen ökologischen und ökonomischen Regulierung notwendig ist. Zwar bestehen erste Ansatzpunkte und Konzepte für eine systematische Operationalisierung derartiger Beurteilungen, jedoch noch keine zufriedenstellenden Umsetzungen. In diesem Bereich ist noch erheblicher Forschungsbedarf zu konstatieren.

### **2.3.5 Faktoren für Wissensspillover**

Zur Beurteilung der Persistenz eines Vorreitermarktes in einer Region oder einem Land ist es wichtig zu wissen, ob davon auszugehen ist, dass die Produktion der Vorreiterleistung ganz oder in Teilen im Ausgangsraum verbleiben oder leicht in andere Regionen transferiert werden wird. Von Interesse sind hier insbesondere *Faktoren*, die eine Verlagerung von Teilen der Produktion ins Ausland begünstigen oder hemmen.

Bereits Kline/Rosenberg (1986) wiesen auf die Bedeutung von externen Wissensquellen für Innovationen der Firmen hin. Aspekte, die daher im Zusammenhang mit Standortfaktoren auch genannt werden, sind der Stellenwert nicht kodifizierten Wissens und

räumliche Nähe als Voraussetzung für Lernerfolge entlang der Wertschöpfungskette. Asheim/Gertler (2005) nennen zwei Bestimmungsgründe, die eine räumliche Zusammenballung der Produktion begünstigen:

- Tacit knowledge ist schwieriger über lange Distanzen zu kommunizieren, da es eben nicht kodifiziert ist und seine Bedeutungszusammenhänge sehr kontextbezogen sind. Es ist am Besten durch persönlichen Kontakt zu übertragen, sein Transfer erfordert einen Grundstock an gemeinsamem Grundvertrauen.
- Die Learning Economy Hypothese von Lundvall/Johnson (1994), die die Bedeutung von sozialen Interaktionen als Basis für die notwendigen Lernprozesse unterstreicht. Einen besonderen Stellenwert nehmen hierbei die User-Producer-Beziehungen ein. Wissen fließt nicht unidirektional von den Technologieherstellern zu den Anwendern, sondern auch von den Anwendern zu den Herstellern.

Maskell/Malmberg (1999) argumentieren, dass Agglomerationsvorteile sich weniger auf (statische Transaktions-) Kostenersparnisse beziehen, sondern eher unterschwelliger und institutioneller beziehungsweise soziokultureller Natur sind. Ein gemeinsamer Standort bietet Sprach- und kulturelle Ähnlichkeiten, die Kommunikation unterstützen und so die Verbreitungsgeschwindigkeit von Wissen erhöhen können. Dieser räumliche Kommunikations- und Interaktionskontext ist besonders vorteilhaft bei schlecht kodifizierbarem bzw. vermittelbarem Wissen, weil er eine gemeinsame Wissensbasis bereitstellt, auf der der Wissensaustausch aufsetzen kann (vgl. Lagendijk 2001). Der Vorteil einer sektoralen Konzentration von Unternehmen liegt zudem darin, dass auf Grund unterschiedlicher Wahrnehmungsfähigkeiten, Einsichten und Einstellungen eine ganze Bandbreite von Lösungen für ähnliche Probleme beobachten werden können. Das Beobachten, Vergleichen und Diskutieren dieser verschiedenen Herangehensweisen ermöglicht Unternehmen einen kontinuierlichen Lernprozess, der ihr Überleben sichern kann (vgl. Maskell 2001).

In der Literatur finden sich deutliche Hinweise, dass die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Sektoren sehr stark durch diejenige von produktionstechnisch eng verbundenen, komplementären Branchen mitbestimmt wird. Im Hinblick auf die Exportspezialisierung hat insbesondere Fagerberg (1995b) den Einfluss derartiger Beziehungen von User-Producer-Beziehungen auf den Außenhandel empirisch analysiert. Hierzu untersucht er ökonometrisch die Beziehung zwischen Außenhandelserfolg der Producer- und der zugehörigen User-Branche. Seine Ergebnisse sprechen dafür, die Exportfähigkeit von Produkten auch nach den Exporterfolgen produktionstechnisch eng damit verbundener Branchen zu beurteilen. Demnach ist die Produktion erfolgreicher Innovationen im Bereich Erneuerbarer Energietechnologien vor allem dann vor schnellen Verlagerungen ins Ausland geschützt, wenn das Land auf dem Weltmarkt auch in den komplementären

ren Sektoren wie dem Maschinenbau oder der Elektrotechnik überproportional erfolgreich ist.

Seit der zentralen Veröffentlichung von Grossman/Helpman (1991) ist auch die Bedeutung internationaler Wissensspillover auf den Außenhandel unbestritten. Griliches (1991) und Archibugi/Pietrobelli (2004) haben die unterschiedlichen Arten internationaler Wissensspillover weiter ausdifferenziert: Das den Patenten zu Grunde liegende Wissen wird durch die Offenlegung teilweise kodifiziert und damit zugänglich. Der Export von Technologien macht das in die Technologie eingeflossene Wissen den Nutzern zumindest teilweise verfügbar (z. B. durch reverse engineering). Räumliche Nähe der (importierten) Technologie mit heimischen Anbietern eröffnet Anknüpfungspunkte für eine mittelbare user-producer Interaktion auch in den importierenden Ländern. Empirische Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Zufluss an Direktinvestitionen auch zu Wissensspillovern hin zu den Empfängerländern führt (Pain/Wakelin 2004; Greenaway et al. 2004). Allerdings ist die Wirkungsrichtung hier nicht unidirektional, da es auch zu gegengerichteten Wissensspillovern aus den Empfängerländern hin zu den liefernden Ländern kommen kann (Wagner 2007; Wei Yingqui et al. 2008). Die Veröffentlichung von Coe/Helpman (1995) hat einige empirische Untersuchungen über die Bedeutung der unterschiedlichen Kanäle eines internationalen Wissensspillovers angeregt (Eaton/Kortum 1996; Keller 1998; Branstetter 2001; Navaretti/Tarr 2002; Saggi 2002). Zugleich wird aber deutlich, dass es auch zahlreiche Einflussgrößen gibt, mit denen die Rate internationaler Wissensspillovers beeinflusst werden kann (Mauerseith/Verspagen 2002). Damit wird diese Größe zu einem Gegenstand sowohl der Politikgestaltung als auch der unterschiedlichsten Schutzstrategien der beteiligten Unternehmen. Wenn in den Empfängerländern ein Aufbau absorptiver Kapazitäten stattfindet und sich eine heimische Anbieterindustrie herausbildet, können die internationalen Wissensspillover zur Erosion der technologischen Führungsrolle der Technologiegeberländer führen. Diese Erosionsprozesse werden noch beschleunigt, wenn die importierenden Länder ebenfalls in der Lage sind, weitere Erfolgsfaktoren für First Mover-Vorteile wie eine gezielte nachfrageseitige Innovationspolitik und eine innovationsfreundliche Regulierung umzusetzen.

Festzuhalten ist, dass die Bedingungen für die Aufrechterhaltung einer einmal erreichten Vorreitermarktstellung zum Teil technologieinhärent sind: wichtige Eigenschaften, die eine Leadmarktfähigkeit von Technologien begünstigen, sind eine hohe Wissensintensität, ein hoher Anteil impliziten Wissens sowie ein erhebliches noch nicht ausgereiztes Lernpotenzial der betrachteten Technologien. Zum anderen wird die Verlagerung gehemmt, wenn die international wettbewerbsfähigen Branchen eines Landes einen hohen Bezug zu den betrachteten Technologien aufweisen. Die Fähigkeit zur Herausbildung und Persistenz von Vorreitermärkten in einem Land hängt damit auch

von den vorhandenen Sektorstrukturen und der erreichten Außenhandelsspezialisierung ab.

### **2.3.6 Ansätze für die empirische Modellierung**

Das Vorliegen von First-Mover-Vorteilen ist ein wesentlicher Bestimmungsgrund für die Auswirkungen einer forcierten Einführung erneuerbarer Energien auf Volkswirtschaft und Beschäftigung (Walz 2006). Auf Grund des Fehlens einer belastbaren Modellierung konnten diese Effekte in den entsprechenden makroökonomischen Modellierungen bisher nur unzureichend abgebildet werden: ZSW et al. (2006) verwendeten Expertenabschätzungen über eine künftige Entwicklung der deutschen Exportanteile, die in unterschiedliche Exportszenarien gebündelt wurden. In ihrer Abschätzung der Auswirkungen der europäischen Politiken auf die Beschäftigung benutzten Ragwitz et al. (2009) ebenfalls Exportszenarien, die zwar analog in den vorigen Abschnitten skizzierten Bestimmungsgründen zu konsistenten Szenarien gebündelt wurden, aber keine explizite Modellierung auswiesen und bezüglich des Niveaus der Exporte ebenfalls durch Experteneinschätzungen ergänzt wurden. Aus der Behandlung dieser Aspekte in diesen – im Unterschied zu anderen Studien bereits die „scientific frontier“ darstellenden – Untersuchungen wird der Handlungsbedarf deutlich, die Ableitung der Exportanteile auf eine belastbare und avancierte Modellierungsbasis zu stellen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein erster Modellierungsansatz entwickelt und als Prototyp für das Fallbeispiel Windkrafttechnologien implementiert (vgl. Walz et al. 2009).

Die oben skizzierten Lead-Market-Faktoren beeinflussen sich gegenseitig, und stehen in ständigem Wechselspiel mit den Faktoren, die das Funktionieren des Innovationsystems für erneuerbare Energietechnologien beeinflussen. Gleichzeitig ist die Qualität der Daten, die zur Beschreibung der Faktoren zur Verfügung steht, sehr unterschiedliche. Daraus resultieren folgende Anforderungen für den Modellierungsansatz:

- Berücksichtigung der unterschiedlichen Rückkopplungsschleifen,
- Abbildung der zeitlichen Dynamik, und
- hohe Flexibilität und Möglichkeit, unterschiedlich ausgeprägte Daten miteinander zu verknüpfen (z. B. statistisch-ökonomisch validierte Zusammenhänge mit qualitativen Einschätzungen).

Aus diesem Grund wurde System Dynamics als grundlegender Modellierungsansatz herangezogen. System Dynamics dient zur Analyse komplexer Systeme im Zeitablauf und ist auf die numerische Analyse von nichtlinearen Systemzusammenhängen inklusive von Rückkopplungsschleifen ausgerichtet. Es können sowohl exogene und endogene Faktoren miteinander kombiniert, als auch quantitative und stärker qualitative

Zusammenhänge modelliert werden (vgl. z. B. Bossel 2004). Mit der System Dynamics Methode können komplexe Systemzusammenhänge numerisch simuliert und Veränderungen im Systemzustand einschließlich auftretender positiver oder negativer Rückkopplungsschleifen bestimmt werden.

Wichtiger Schritt der Modellierung mit System Dynamics ist die Erstellung des Wirkungsgraphen und der Systembeziehungen. Um die Faktoren für die Etablierung eines Lead-Marktes abzubilden, werden sie in folgende Blöcke gruppiert:

- Die Exportanteile von Land A werden durch das Modell erklärt.
- Die Nachfragefaktoren (market factors) umfassen Nachfrage- und Preisvorteil, Marktstruktur, Transfer- und Exportvorteil.
- Der relative Patentanteil (patent advantage) steht für die technologische Leistungsfähigkeit.
- Unter Regulierung (regulation) werden die Faktoren zusammen gefasst, die direkt durch Politikmaßnahmen beeinflusst werden können, z. B. FuE-Subventionen, Maßnahmen zur Steigerung der Diffusion der Technologien, aber auch weiche Kontextfaktoren wie der Politikstil und die Zuverlässigkeit und Fristigkeit der Politikmaßnahmen.
- Die Wettbewerbsfähigkeit von Sektoren, die hohe Komplementarität zu den betrachteten Technologien aufweisen.
- Die Verzögerungsfaktoren einer internationalen Reallokation der Standorte (obstacles to international relocation) reflektieren die Verlagerungsfaktoren und die technologieinhärenten Charakteristika einer Technologie, die sie überhaupt als Gegenstand einer Lead-Market-Strategie in Frage kommen lassen. Hinzu kommen Faktoren wie die Attraktivität von Standortfaktoren, z. B. die Verfügbarkeit von erforderlichen Produktionsfaktoren (z. B. qualifizierte Arbeitskräfte).
- Wissensspillover-Effekte beziehen sich auf internationale Spillovers zwischen Ländern, die zur Erosion einer einmal erreichten Lead-Market-Position führen.

Die Exportanteile eines Landes A bestimmen sich durch die relative Güte bzw. dem relativen Vorteil der Exportfaktoren im Land A im Vergleich zu den konkurrierenden Ländern. Der relative Vorteil wird damit nicht nur durch Veränderungen im Land A selbst, sondern auch durch die Veränderungen in allen anderen Ländern beeinflusst.

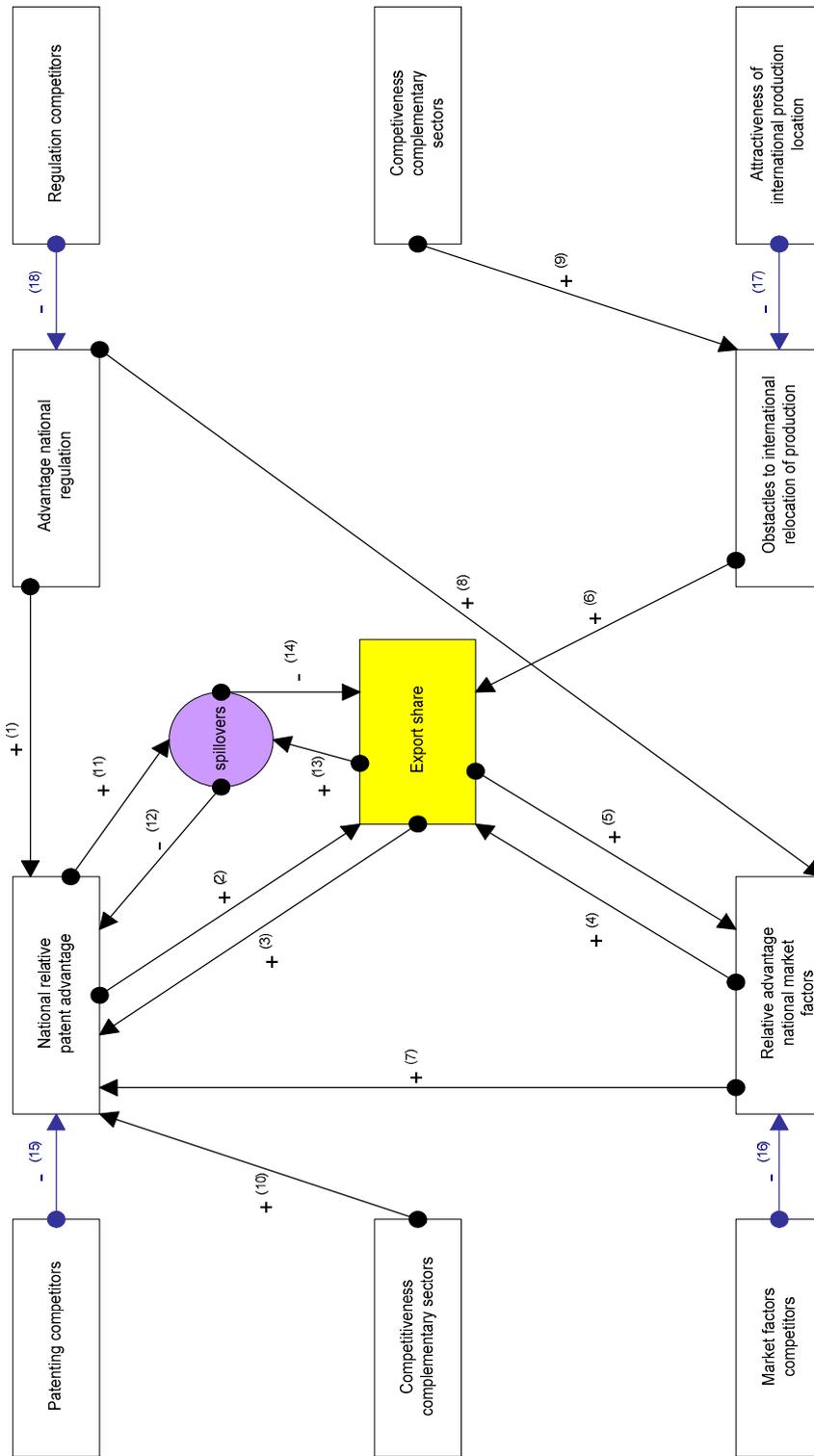
In Abbildung 2-4 werden die Systembestandteile und die unter ihnen bestehenden Systemzusammenhänge in Form eines Wirkungsgraphen dargestellt. Die Abbildung fasst das Modellierungskonzept in formalisierter Form zusammen, und verschafft einen Überblick über die Wirkungsrichtung der Wirkungszusammenhänge. Dabei zeigt das Plus- bzw. Minuszeichen jeweils an, ob die beeinflusste Variable durch den wirkungs-

Zusammenhang positiv (Pluszeichen) oder negativ (Minuszeichen) verändert wird. Folgende Wirkungsbeziehungen sind erfasst:

1. Advantage in national regulation -> National relative patent advantage (+): Hierdurch wird verdeutlicht, dass ein steigender relativer Vorteil von Land A bei der Ausgestaltung der Regulierung auch den Patentvorteil steigert.
2. National relative patent advantage -> Export shares (+): Eine relativ steigende technologische Leistungsfähigkeit im Land A steigert auch den Exportanteil von Land A.
3. Export shares -> National relative patent advantage (+): Steigende Exportanteile wirken positiv auf die Patententwicklung im exportierenden Land zurück und steigern dessen technologische Leistungsfähigkeit.
4. Relative advantage due to national market factors -> Export shares (+): Eine Steigerung der Qualität der Nachfragefaktoren des Landes A führt zur Erhöhung der Exportanteile.
5. Export shares -> Relative advantage due to national market factors (+): Eine Erhöhung der Exportanteile führt zur positiven Rückkopplung auf die Marktfaktoren.
6. Obstacles to international relocation of production -> Export shares (+): Eine Steigerung der Güte der Verzögerungsfaktoren zur Standortverlagerung führt zu einer Steigerung der Exportanteile.
7. Relative advantage due to national market factors -> National relative patent advantage (+): Eine Steigerung der Nachfragefaktoren des Landes A führt über user-producer-Beziehungen auch zu Lernerfolgen und einer steigenden technologischen Leistungsfähigkeit in Land A, die mit den Patenten gemessen wird.
8. Advantage in national regulation -> Relative advantage due to national market factors (+): Eine relative Verbesserung der Regulierung in Land A steigert die relative Vorteilhaftigkeit bei den Nachfragefaktoren.
9. Competitiveness of complementary sectors -> Obstacles to international relocation of production (+): Die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von komplementären Sektoren erhöht die Attraktivität des Standorts und damit die Verzögerungsfaktoren für Produktionsverlagerungen.
10. Competitiveness of complementary sectors -> National relative patent advantage (+): Die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von komplementären Sektoren erhöht die technologische Wettbewerbsfähigkeit bei den betrachteten Technologien (Begünstigung sektoraler Wissensspillover).
11. National relative patent advantage -> Spillovers (+): Eine Steigerung der technologischen Leistungsfähigkeit in Land A erhöht die Differenz im Niveau zu allen anderen Ländern, wodurch das Niveau von internationalen Spillovern von Land A in das Ausland zunimmt (Spillover of knowledge codified in patents).

12. Spillovers -> National relative patent advantage (-): Internationale Wissensspillovereffekte führen zu einer Reduktion der relativen nationalen technologischen Leistungsfähigkeit (negative Rückkopplung).
13. Export shares -> Spillovers (+): Durch Steigerung der Exportanteile kommt es zu einer Steigerung der internationalen Wissensspillover-Effekte (Spillover von capital embodied knowledge).
14. Spillovers -> Export shares (-): Durch steigende internationale Wissensspillovereffekte nehmen die Exportanteile ab (negative Rückkopplung).
15. Patenting competitors -> National relative patent advantage (-): Eine Steigerung der Patentaktivitäten im Ausland vermindert die relative technologische Leistungsfähigkeit von Land A.
16. Market factors competitors -> Relative advantage due to national market factors (-): Eine Steigerung der Nachfragefaktoren im Ausland vermindert die relative Güte der Nachfragefaktoren in Land A.
17. Attractiveness of international production location -> Obstacles to international relocation of production (-): Eine Steigerung der Attraktivität der Standortfaktoren im Ausland vermindert die Verzögerung von Produktionsverlagerungen.
18. Regulation competitors -> Advantage in national regulation (-): Eine Steigerung der Innovationsfreundlichkeit der Regulierung im Ausland vermindert den relative Vorteil im Bereich der Regulierung in Land A.

Abbildung 2-4: Wirkungsgraph der Systembeziehungen im Lead-Market Modell zur Bestimmung der Exportanteile erneuerbarer Energietechnologien

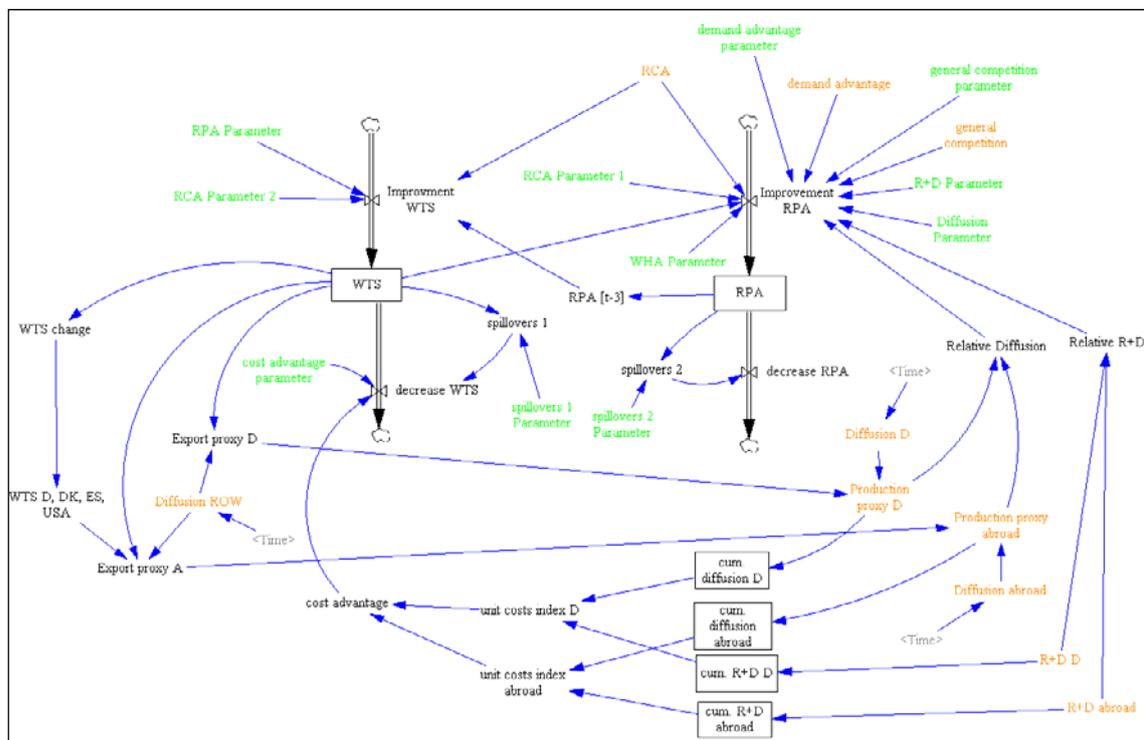


Die oben beschriebenen Lead-Market-Faktoren müssen im System Dynamics Modell mit messbaren Indikatoren hinterlegt werden. Um den Modellierungsaufwand zu beschränken, wurden im hier beschriebenen Prototyp lediglich die Exportanteile von Deutschland modelliert. Da aber die relative Position von Deutschland in die Modellierung eingeht, war es jeweils auch erforderlich, Indikatoren über den Rest der Welt einzubeziehen. Allerdings wurde hier aus Gründen der Komplexitätsreduktion bisher davon abgesehen, unterschiedliche Länder zu unterscheiden. Des Weiteren sind auch einige der Einflussfaktoren als exogene Variable modelliert, um den Komplexitätsgrad des Modells nicht zu groß werden zu lassen. Hierzu gehören die Innovationsfreundlichkeit der Regulierung, die Wettbewerbsfähigkeit des komplementären Maschinenbausektors, und die Ausprägung der Indikatorenwerte für die Lead-Market-Faktoren im Ausland. Damit ergibt sich folgende Systemstruktur des Modells:

- Die Kostenentwicklung, die den Nachfragefaktor "Preisvorteil" beeinflusst, wurde entsprechend der kumulierten installierten Kapazität in den jeweiligen Ländern modelliert.
- Die FuE-Ausgaben stehen für die Regulierung auf der Angebotsseite (supply push), die Diffusion der Windkrafttechnologien für die Politiken auf der Nachfrageseite (demand pull). Für die Charakterisierung der Innovationsfreundlichkeit der Regulierung wurden die Indikatorenwerte des Politikindex herangezogen, der von Walz et al. 2008c abgeleitet wurde.
- Der Nachfragevorteil basiert auf den Ausgaben für Umweltschutz aus den OECD-Statistiken sowie aus den Angaben über die generelle Wettbewerbsfähigkeit aus dem Global Competitiveness Report des World Economic Forum.
- Die technologische Leistungsfähigkeit wird durch die relativen Patentanteile (RPA) der einzelnen Länder für das Technologiefeld Windkraftturbinen abgebildet.
- Die Wettbewerbsfähigkeit des komplementären Maschinenbausektors wird durch den Revealed Comparative Advantage (RCA) abgebildet (vgl. Kapitel 3 zur Herleitung und Datenbasis für den RPA und RCA).
- Die internationalen Wissensspillover werden als Funktion der Exportanteile und die relativen Patentanteile modelliert.

Das in Abbildung 2-5 abgebildete Modell wurde mit Hilfe der Software VENSIM programmiert. Die mathematischen Relationen zwischen den Variablen und die Parameter wurden für den Kalibrationszeitraum 1991-2004 kalibriert.

Abbildung 2-5: Modellstruktur des systemdynamischen Lead-Market-Modells



Quelle: Walz et al. 2009

Für die Modellsimulationen wurden drei unterschiedliche Szenarien gebildet, die jeweils unterschiedliche exogene Parameterausprägungen variieren. Zeithorizont für die Simulation der drei Szenarien war jeweils das Jahr 2020:

- Szenario A steht für einen Referenzverlauf, wie er in der bisherigen Entwicklung angelegt ist: Die Diffusion der Windkraftanlagen erfolgt entsprechend dem im EU-Projekt "OPTRES" entwickelten Szenario "improved policy" (Ragwitz et al. 2007). Des Weiteren werden eine konstante FuE-Förderung in Deutschland sowie leicht abnehmende relative Vorteile bei den Nachfragefaktoren angenommen, da mehr und mehr Länder dem Vorbild Deutschlands folgen und ebenfalls den Ausbau der Windkraft forcieren werden.
- Szenario B bildet einen optimistischen Zukunftsentwurf ab: es wird eine gegenüber dem Szenario A um 20 % erhöhte Diffusion der Windkraft in Deutschland angenommen, die eine schnellere Erschließung des offshore-Potenzials widerspiegelt. Die FuE-Förderung R&D steigt um jährlich 2,5 %; die anderen exogenen relativen Nachfragefaktoren werden als konstant angenommen.
- Szenario C beschreibt eine pessimistische Sicht für die Windkraftentwicklung in Deutschland: gegenüber Szenario A wird eine um 50 % verminderte Diffusion der Windkraft angenommen. Die FuE-Förderung wird bis 2020 ebenfalls halbiert, und die Verringerung der komparativen Position Deutschlands beim Preisvorteil und der technologischen Leistungsfähigkeit fällt stärker aus als in Szenario A.

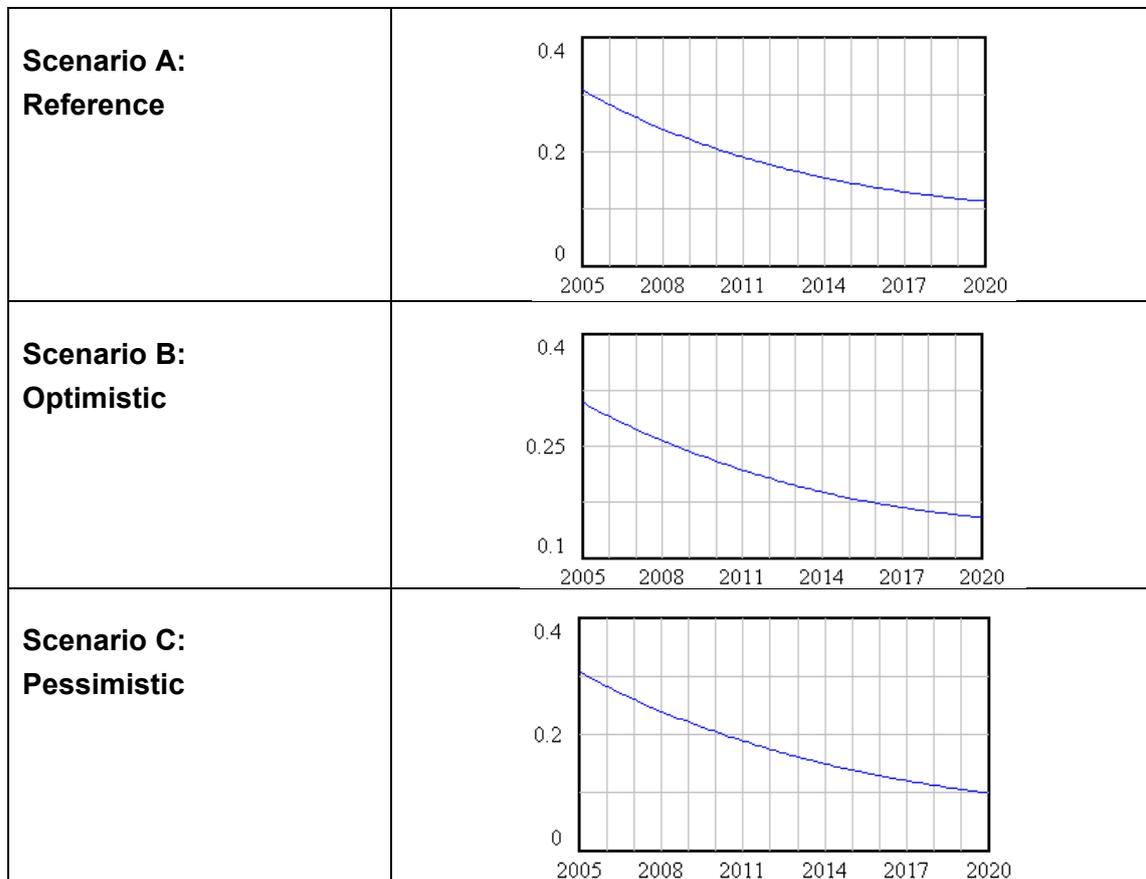
In allen betrachteten Szenarien sinken die Welthandelsanteile Deutschlands (Abbildung 2-6). Die zunehmende Diffusion der Windkraft in anderen Ländern verstärkt die internationalen Wissens-Spillovereffekte und trägt zum Aufbau von technologischen Kompetenzen im Ausland bei. Die relative Position Deutschlands beim Preisvorteil und der technologischen Leistungsfähigkeit verschlechtert sich. Die positiven Rückkopplungseffekte sind nicht stark genug, um die internationalen Wissensspillovereffekte überkompensieren zu können. Im Ergebnis sinken die Exportanteile Deutschlands auf

- 11 % in Szenario A,
- 15 % in Szenario B und
- 9 % in Szenario C.

Allerdings darf bei der Interpretation dieser Zahlen nicht vergessen werden, dass der Weltmarkt im gleichen Zeitraum sehr stark anwachsen wird. Die sinkenden Anteile verdecken, dass dadurch das absolute Niveau der Exporte ansteigt. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass bei zunehmender Globalisierung und weiterer Aufholprozesse in den schnellwachsenden Ökonomien mit einem Absinken der deutschen Welthandelsanteile im Allgemeinen gerechnet werden muss. Ein Anteil wie in Szenario B würde also noch immer eine sehr starke positive Außenhandelsspezialisierung bei Windkrafttechnologien bedeuten.

Die Differenzen in den Ergebnissen entsprechen den Erwartungen über die Wirkungsrichtung der in den Szenarien variierten Annahmen. Das Niveau der simulierten Exportanteile liegt in einer ähnlichen Größenordnung, wie sie sich als Ergebnis von Expertenbefragungen ergeben hat (ZSW et al. 2006). Insgesamt ist der Prototyp also in der Lage, die Exportdynamik abzubilden.

Abbildung 2-6: Überblick über die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für die Exportanteile Deutschlands bei Windkraftanlagen



Quelle: Walz et al. 2009

Dennoch dürfen die Ergebnisse nicht als präzise Projektion der Ergebnisse interpretiert werden. Zwei Einschränkungen sind festzuhalten: Erstens könnte der Einfluss der internationalen Wissensspillover-Effekte überzeichnet sein. Zweitens könnte der Kalibrierungszeitraum durch Sondereffekte charakterisiert sein, die die Berechnung der Parameter verzerren. Beide Probleme hängen eng zusammen: Die internationale Wissensspillover-Variable treibt die Erosion der Lead-Market-Position Deutschlands voran. Wenn während des Kalibrationszeitraums die Lead-Market-Faktoren zwar eine hohe positive Ausprägung aufweisen, aber gleichzeitig die Exportanteile gering bleiben, schlägt sich dies in der Kalibrierung in einer hohen Bedeutung der Wissensspillover-Variablen nieder. Nun kann das Auseinanderfallen von Lead-Markt-Faktoren und Exportanteilen auch durch Sondereffekte bedingt sein. Amable und Verspagen (1995) führen Kapazitätsrestriktionen an, die einen Anstieg der Exporte kurzfristig verhindern können. Während des Kalibrierungszeitraums war in Deutschland eine massive Zunahme der Diffusion von Windkraftanlagen zu beobachten. Das Wachstum der Nach-

frage war so stark, dass der Aufbau neuer Produktionskapazitäten nicht statthalten konnte. Die deutschen Hersteller konzentrierten sich auf den lukrativen und einfacher erschließbaren Inlandsmarkt, so dass die Exporte vergleichsweise gering ausfielen. Gleichzeitig kam es zu einem Importsog, da das Wachstum der inländischen Kapazitäten selbst für die Inlandsexpansion der Nachfrage nicht ausreichte. Erst gegen Ende des Kalibrierungszeitraums kam es zu einer nachlassenden Inlandsexpansion und einer Ausweitung der Inlandskapazitäten, was zu einem sprunghaften Ansteigen der deutschen Exporte führte. Durch die Logik des Modells bedingt, wird die im Kalibrationszeitraum durch die Kapazitätsbeschränkungen bewirkte schwache Exportperformanz allerdings durch einen hohen Parameterwert für die internationale Wissensspillover-Variable nachgezeichnet, der die Bedeutung dieser Variable überbetont. In künftigen Kalibrationszeiträumen wird sich dieses Problem abmildern, gleichzeitig sollte erwogen werden, Kapazitätsrestriktionen als weitere Variable ins Modell einzubauen.

Insgesamt zeigen die Erfahrungen auf, dass mit Hilfe eines System Dynamics Modells die relevanten Einflussparameter modelliert werden können. Die empirischen Ergebnisse zeigen die erwartete Wirkungsrichtung und unterstreichen die Bedeutung der Rückkopplungsschleifen. Eine kritische Methodenreflektion kommt dabei zu folgenden Vorschlägen für künftige Modellverbesserungen:

- Ein verlängerter Kalibrationszeitraum wird die Modellspezifikation und die Nachbildung der realen Daten verbessern.
- Das Problem der Kapazitätsbeschränkungen sollte angegangen werden, evtl. durch explizite Modellierung als zusätzlicher Faktor.
- Der Prototyp konzentrierte sich auf Deutschland, und modellierte die Wettbewerber als ein Aggregat. Ein verbessertes Modell sollte die wichtigsten Wettbewerber ebenfalls explizit modellieren.
- Durch den Aufbau gleichartiger Modelle für weitere Technologien könnte herausgearbeitet werden, inwieweit die Ergebnisse technologiespezifisch sind, und welche Erkenntnisse technologieübergreifend verallgemeinert werden können.

## **2.4 Zusammenfassung der konzeptionellen Ergebnisse**

Für eine innovationsfördernde Ausgestaltung der Politik ist die Kenntnis der Bestimmungsgünde für Innovationen bei Erneuerbaren Energietechnologien eine zentrale Voraussetzung. In der Wissenschaft werden hier die unterschiedlichsten Faktoren diskutiert und – in Abhängigkeit des jeweiligen theoretischen Ansatzes – in den Vordergrund gerückt. Folgende Faktoren können unterschieden werden:

- unternehmensinterne Faktoren wie die Fähigkeiten zum Innovationsmanagement aber auch die Unternehmensgröße,
- branchenbezogene Größen wie die Wettbewerbsintensität und die Marktkonzentration,
- Veränderungen in den relativen Preisen von Produktionsfaktoren, die Innovationsanstrengungen zur Substitution des teurer werdenden durch den kostengünstigeren Faktor nach sich ziehen,
- neue Bedürfnisse und staatlich induzierte Nachfrageänderungen, die über einen Nachfragesog (demand pull) zu neuen Produkten und Innovationen führen, sowie
- regulatorische Bestimmungsfaktoren, insbesondere die Wahl der Regulierungsinstrumente und unterschiedlich ausgeprägte Politikstile.

In der Gesamtschau wird deutlich, dass sich die Bestimmungsgründe von Innovationen bei erneuerbaren Energietechnologien aus verschiedenen Gründen von den Bestimmungsgründen „normaler“ Innovationen unterscheiden. Festzuhalten ist insbesondere der bedeutende Einfluss regulatorischer Aspekte. Innovationen bei erneuerbaren Energietechnologien, die den Herausforderungen der Nachhaltigkeit gerecht werden wollen, werden in Zukunft Systeminnovationen, Regimewechsel, Umstieg auf neue Trajektorien oder Wandel des Innovationssystems erforderlich machen. Damit stehen die mit diesen Konzepten in Verbindung stehenden Bestimmungsfaktoren - also die, die aus der Analyse ko-evolutorischer Prozesse und der Funktionen und Dynamik von (technologiespezifischen) Innovationssystemen abgeleitet werden - besonders im Vordergrund. Methodisch bedeutet dies, dass dem Gedankengut der evolutorischen Ökonomik und der anwendungsorientierten Heuristik technologischer und sektoraler Innovationssysteme besonders hohe Priorität bei der Analyse einer innovationsorientierten Förderpolitik erneuerbarer Energietechnologien zukommen wird.

Fragen wie die Bedeutung Erneuerbarer Energien als Wirtschaftsfaktor bestimmen zunehmend auch die strategische Umweltpolitik. Die Integration der Göteborg-Ziele in die Lissabon-Strategie oder Politikstrategien wie die "Lead-Market-Initiative der EU" beruhen alle auf der Logik von „first mover advantages“: Eine forcierte (nationale) Strategie im Umweltbereich führt nach dieser Argumentation dazu, dass sich die Vorreiterländer frühzeitig auf die Bereitstellung der hierzu erforderlichen Güter spezialisieren. Bei einer nachfolgenden Ausweitung der internationalen Nachfrage nach diesen Gütern sind diese Länder dann auf Grund ihrer frühzeitigen Spezialisierung und des erreichten Innovationsvorsprungs in der Lage, sich im internationalen Wettbewerb durchzusetzen.

Für die Realisierung derartiger „first mover advantages“ ist es erforderlich, dass die heimischen Anbieter dauerhafte Wettbewerbsvorteile bei den Erneuerbaren Energie-

technologien aufweisen. Hier spielen die Bedingungen für die Etablierung so genannter Vorreitermärkte (lead markets) eine wichtige Rolle. Unter den Bedingungen der Globalisierung sind entscheidende Voraussetzungen für den Erfolg eines nationalen Innovationssystems die Etablierung schwer transferierbarer Leistungsverbünde, die aus Kombinationen von technologischer Leistungsfähigkeit mit einer gegenüber Innovationen aufgeschlossenen und frühzeitige Lerneffekte begünstigenden Nachfrage und ihrer Integration in ausdifferenzierte Produktionsstrukturen bestehen. Folgende Faktoren müssen bei der Beurteilung des Potenzials eines Landes für die Etablierung von Vorreiter-Märkten berücksichtigt werden:

- Nicht alle Güter und Technologien eignen sich für die Etablierung von dauerhaften Vorreiter-Märkten. Eine wichtige Voraussetzung besteht darin, dass der Wettbewerb verstärkt über die Qualität und weniger den Preis stattfindet. Wichtige Eigenschaften, die die Vorreitermarktfähigkeit von Technologien begünstigen, sind eine hohe Wissensintensität, ein hoher Anteil impliziten Wissens sowie ein erhebliches noch nicht ausgereiztes Lernpotenzial der betrachteten Technologien.
- Das Vorliegen einer zur betrachteten Technologie komplementären Wissensbasis erhöht das Vorreitermarkt-Potenzial des betreffenden Landes. Neben den Anforderungen an das Humankapital und die technologische Leistungsfähigkeit der betrachteten Technologien selbst spielt auch die Einbindung der Umwelttechnologien in wettbewerbsstarke Branchencluster eine Rolle.
- Ein Marktkontextfaktor, der eine gegenüber Innovationen aufgeschlossene und frühzeitige Lerneffekte begünstigende Nachfrage anzeigt, ist eine auf eine hohe Wettbewerbsintensität hindeutende Marktstruktur. Darüber hinaus werden eine frühzeitige Antizipation globaler Trends (Nachfragevorteil), Größenvorteile des Marktes (Preisvorteil) sowie die Reputation und die Sensibilität gegenüber Änderungen auf dem Weltmarkt (Transfer- und Exportvorteil) angeführt.
- Insbesondere bei Erneuerbaren Energietechnologien kommt der Regulierung eine ganz zentrale Bedeutung zu (triple regulatory challenge). Die bisher in der Forschung erzielten Ergebnisse unterstreichen, dass eine Beurteilung der Innovationsfreundlichkeit der sektorspezifischen ökologischen und ökonomischen Regulierung besonders notwendig ist. Die bestehenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass Langfristorientierung, Verlässlichkeit, feste Einspeisevergütungen sowie Diversität der geförderten Technologien wichtige Bestimmungsgründe für eine innovationsfreundliche Ausgestaltung der Regulierung sind.
- Die technologische Leistungsfähigkeit der einzelnen Länder ist ein wichtiger Faktor auf der Angebotsseite, der den Erfolg eines Landes im Außenhandel wesentlich mitbestimmt.
- Internationale Wissensspillover wirken im Zeitablauf in Richtung einer Erosion der technologischen Vorteile. Eine Aufrechterhaltung der Vorteile erfordert also eine kontinuierliche Anstrengung. Das Ausmaß der internationalen Wissensspillover

hängt aber von technologischen Faktoren und der Gestaltung des Schutzes geistigen Eigentums ab und kann durch Strategien der beteiligten Unternehmen beeinflusst werden.

- Die modellgestützte Simulation von First-Mover-Vorteilen stellt eine wichtige Herausforderung dar. Erste Ansätze mit einem systemdynamischen Ansatz sind vielversprechend und sollten weiter verfolgt werden.



### **3 Technologische Leistungsfähigkeit bei erneuerbaren Energietechnologien**

#### **3.1 Methodik und Indikatoren**

Die Analyse der Wettbewerbsfähigkeit geht von der Erkenntnis aus, dass der Wettbewerb im Bereich der höherwertigen Güter oder bei Spitzentechnologien wie Erneuerbaren Energietechnologien sehr stark durch Qualitätsmerkmale bedingt ist. Damit wird die Wissensbasis einer Volkswirtschaft, aber auch ihre Fähigkeit, Wissen in Produkte umzusetzen und diese international zu vermarkten, zu wichtigen Voraussetzungen des künftigen wirtschaftlichen Erfolgs. Diese Fähigkeiten sind allerdings nicht direkt messbar. Damit wird es erforderlich, Indikatoren zu finden, die sie zumindest annäherungsweise beschreiben. Im Rahmen der Innovationsforschung hat sich eine Systematik durchgesetzt, die Indikatoren aus den verschiedenen Teilbereichen des Innovationsprozesses herausgreift (vgl. Grupp 1997; Smith 2005; Freeman/Soete 2009). In Anlehnung an diese Vorgehensweise werden in diesem Bericht einmal Patente als FuE-Ertrags- oder intermediäre Indikatoren herangezogen. Sie gelten zugleich als Frühindikator für die zukünftige technische Entwicklung. Zum anderen werden Publikationen verwendet, die ebenfalls zu den FuE-Ertrags- oder intermediären Indikatoren gehören und den Aufbau von – stärker akademisch geprägten – Wissenskompetenzen anzeigen. Schließlich werden außenhandelsbezogene Indikatoren erstellt, die zu den Fortschritts- oder Output-Indikatoren gehören. Sie zielen stärker auf die Anwendung und die Diffusion der Technologien auf FuE-intensiven Gütermärkten ab.

Im Unterschied zu den traditionellen Umwelttechnologien hat sich für die hier im Vordergrund stehenden Erneuerbaren Energietechnologien noch keine international vergleichbare Konvention herausgebildet, mit Hilfe derer die Technologien abgegrenzt und in den Publikations-, Patent- und Wirtschaftsstatistiken klassifiziert werden könnten. Daher war es jeweils erforderlich, eine speziell auf die Datenlage zugeschnittene Abgrenzung zu finden. Teilweise konnte hier an Vorarbeiten im Rahmen der Studie „Zukunftsmärkte Umwelt“ (Walz et al. 2008b) angeknüpft werden. Methodisch wird an einen produktionswirtschaftlichen Ansatz angeknüpft, bei dem die Erneuerbaren Energietechnologien die Produktgruppen und Technologielinien umfassen, die ihrer Art nach der Nutzung erneuerbaren Energien dienen könnten bzw. sich auf ein ähnlich gelagertes technologisches Wissen beziehen. Bei diesem Potenzialansatz steht also nicht die (bereits) tatsächlich realisierte Anwendung für die erneuerbaren Energienutzung im Vordergrund, sondern die technologische Leistungsfähigkeit, die ihrer Art nach dafür mobilisiert werden könnte.

Die Verwendung des Potenzialansatzes enthebt nun gerade nicht von der Notwendigkeit, die statistische Abgrenzung der betrachteten Technologielinien sehr sorgfältig durchzuführen. Diese Abgrenzungsarbeiten erfordern erhebliches ingenieurwissenschaftliches Know-how. Zunächst müssen die zentralen Produktgruppen innerhalb jedes Handlungsfeldes abgegrenzt und die wichtigsten Technologielinien innerhalb jeder Produktgruppe identifiziert werden. In einem zweiten Schritt müssen die jeweiligen technischen Hauptkomponenten der Technologielinien herausgearbeitet werden, die die Entwicklung in den Technologielinien determinieren. In einem dritten Schritt müssen diese Technikkomponenten dann in die Patent- bzw. Außenhandelssystematik übersetzt werden. Dies hat in einem iterativen Prozess mit mehreren Durchläufen zu erfolgen, bei dem die ersten Klassifikationsversuche empirisch umgesetzt und die daraus resultierenden Ergebnisse dann überprüft werden. Wenn sich dann herausstellt, dass die Abgrenzung zu weit gefasst wurde (also z. B. zahlreiche Patente beinhalten, die keinen Bezug zu erneuerbaren Energien aufweisen), oder zu eng gewählt wurde (z. B. weil bestimmte Technikkomponenten ganz fehlen), muss die Such- und Klassifikationsstrategie angepasst werden. Diese Prüfung ist sehr zeitaufwändig, da sie nicht an Hand abstrakter Kurzinformationen wie den Patenttiteln durchgeführt werden kann, sondern auf Basis der detaillierten Abstracts erfolgen muss. Da bei den Patentrecherchen jedoch mehr Flexibilität in der Gestaltung der Suchstrategie besteht, kann prinzipiell davon ausgegangen werden, dass die Patentabgrenzungen zielgenauer sind als die Außenhandelsklassifikationen.

In empirischen Untersuchungen besteht immer das Problem, die für das Erkenntnisinteresse geeigneten Datenbasen auszuwählen. Zentrales Erkenntnisinteresse der vorliegenden Studie ist ein internationaler Vergleich der technologischen Leistungsfähigkeit bei Erneuerbaren Energietechnologien. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass sich Markt und Wettbewerber auch bei diesen Zukunftsmärkten zunehmend globalisieren. Damit wird deutlich, dass der Fokus derartiger Analysen nicht mehr auf Regionen oder Ländergruppierungen wie der OECD liegen, sondern stärker transnational erfolgen sollte. Mit diesen Anforderungen ergeben sich auch Unterschiede in den herangezogenen Datenbasen gegenüber Legler et al. (2006), bei denen stärker auf Anmeldungen beim Europäischen Patentamt bzw. auf den Außenhandel der OECD-Länder abgehoben wurde.

Folgende Vorgehensweise liegt den hier vorgelegten Ergebnissen zu Grunde:

- Die Literaturanalysen beziehen sich auf die in der Datenbank SCOPUS ausgewerteten Zeitschriften. Hierunter wurden durch ein mit Stichworten hinterlegtes Suchprofil die für erneuerbare-Energie-Technologien relevanten Artikel herausgefiltert. Eine disaggregierte Auswertung für die einzelnen Erneuerbaren-Energien-Technologien konnte im Rahmen dieses Vorhabens allerdings nicht erfolgen.

- Die Patentrecherchen knüpfen vorrangig bei den Patentanmeldungen über das PCT-Verfahren<sup>3</sup> an, mit dem Anmeldungen bei der WIPO (World Intellectual Property Organisation) hinterlegt werden können. Da dieses Anmeldeverfahren erst in jüngerer Zeit an Beliebtheit gewonnen hat und da es auch weitere Möglichkeiten für internationale Anmeldungen von Patenten gibt, werden zusätzlich Patentanmeldungen am Europäischen Patentamt hinzugerechnet, wobei Doppelzählungen von identischen Erfindungsmeldungen ausgeschlossen werden. Damit wird eine Methode zur Abbildung der internationalen Patente herangezogen, die nicht auf einzelne Märkte wie Europa abzielt, sondern einen stärker transnationalen Charakter aufweist (vgl. Frietsch/Schmoch 2010). Die Anmeldungen wurden entsprechend dem Wohnort der Erfinder den Ländern zugeordnet, was erfahrungsgemäß die Verzerrungen minimiert. Als Beobachtungszeitraum wurde die Entwicklung seit 1991 betrachtet. Das letzte Jahr, für das belastbare Beobachtungen vorliegen, ist 2007.
- Bei den Außenhandelsdaten wird die Datenbank „UN-COMTRADE“ herangezogen, die nicht auf den Handel mit OECD-Ländern beschränkt ist, sondern den gesamten Welthandel erfasst. Zudem wurde die Klassifikation der Technologien entsprechend dem „Harmonized System“ (HS) 2002 aufgebaut. Diese Daten beziehen sich auf 2007. Gegenüber den bei Legler et al. 2006 und 2007 verwendeten, bei früheren internationalen Vergleichen üblichen Klassifikationen (Standard International Trade Classification (SITC)) erlaubt diese Vorgehensweise eine tiefere und daher zielgenauere Disaggregation. Dennoch sind auch bei dieser Außenhandelsklassifikation zahlreiche Limitationen in der Technologieschärfe zu beachten. Zur Interpretation der Daten sollte berücksichtigt werden, dass mit den Daten nur der Welthandel, nicht das Weltmarktvolumen abgebildet wird. Erneuerbare Technologien, die im Inland produziert und im Inland genutzt werden, werden durch den Welthandel nicht erfasst.

Die zeitliche Entwicklung der Patentaktivitäten in den betrachteten Handlungsfeldern mit den zugehörigen Produktgruppen und der Vergleich mit der allgemeinen Patentdynamik erlaubt eine Einschätzung über die Entwicklung der Innovationsdynamik des betrachteten Handlungsfeldes. Für den internationalen Ländervergleich werden sowohl für die Publikations- und Patentanmeldungen als auch den Außenhandel die Anteile der betrachteten Länder an der weltweiten Aktivität verwendet:

---

<sup>3</sup> PCT = Patent Cooperation Treaty. Dies ist ein internationaler Vertrag, wonach Anmelder über ein vereinfachtes Verfahren einen Anmeldeprozess starten können, der (im Allgemeinen) auf mehrere ausländische Patentämter und damit internationale Märkte ausgerichtet ist. Für nähere Informationen siehe bspw. <http://www.wipo.int/treaties/en/registration/pct/>.

- Es werden die internationalen Publikations- und Patentanmeldungen recherchiert und die Anteile Deutschlands, der wichtigsten Wettbewerber und dem Rest der Welt hieran berechnet. Für jedes Land  $i$  und jedes Kompetenzfeld  $j$  (d. h. Handlungsfeld, Produktgruppe oder Technologielinie) ergeben sich die Publikations- bzw. Patentanteile in Prozent nach folgender Formel:  $PA_{ij} = 100 * (p_{ij} / \sum_i p_{ij})$
- Im Bereich des Außenhandels werden die Welthandelsanteile gebildet, d. h. die Anteile der Ausfuhren ( $a$ ) der jeweiligen Länder am Welthandel. Analog zum Patentanteil ergeben sich hier die prozentualen Anteile der einzelnen Länder  $i$  am Welthandel entsprechend der Formel:  $WHA_{ij} = 100 * (a_{ij} / \sum_i a_{ij})$

Sowohl die Publikations- bzw. Patentanteile als auch die Welthandelsanteile werden durch die Größe und das allgemeine Entwicklungsmuster des Landes beeinflusst. Zusätzlich ist es daher üblich, Spezialisierungskennziffern zu bilden. Sie geben an, welchen Stellenwert die besonders interessierenden Technologien und Waren im Verhältnis zum Durchschnitt aller Technologien und Waren innerhalb des betrachteten Landes aufweisen. Positive Spezialisierungskennziffern zeigen an, dass die Kompetenzen des Landes in diesem Bereich relativ zum Durchschnitt aller Technologien und Güter überdurchschnittlich gut sind. Diese Spezialisierungskennziffern werden sowohl für die Patente als auch den Außenhandel gebildet. Sie werden jeweils so genormt, dass die Indikatoren zwischen -100 (extrem ungünstige Spezialisierung) und + 100 (extrem hohe Spezialisierung) liegen, wobei ein Wert von 0 einer durchschnittlichen Spezialisierung entspricht. Dadurch wird eine Beurteilung der Aktivitäten verschiedener Länder und insbesondere in verschiedenen Handlungsfeldern möglich, die unabhängig von Größeneffekten ist:<sup>4</sup>

- Bei den Patenten wird der relative Patentanteil (RPA) berechnet, indem der Patentanteil des betrachteten Landes beim jeweiligen Kompetenzfeld in Relation zu den Patentanteilen des Landes bei allen Feldern gesetzt wird. Für jedes Land  $i$  und jedes Kompetenzfeld  $j$  wird der RPA nach folgender Formel berechnet:

$$RPA_{ij} = 100 * \tanh \ln [(p_{ij} / \sum_i p_{ij}) / (\sum_j p_{ij} / \sum_{ij} p_{ij})]$$

<sup>4</sup> Die Normierung zwischen -100 und +100 wird durch Verwendung des tangens hyperbolicus und anschließender Multiplikation mit dem Faktor 100 erreicht.

Zur Analyse der Spezialisierung bei den Publikationen wird der Relative Literaturanteil (RLA) analog dem RPA berechnet. Ist der Literatur- bzw. Patentanteil für das Kompetenzfeld überdurchschnittlich hoch, dann nehmen der RLA und RPA einen positiven Wert an. Dies bedeutet, dass innerhalb des betreffenden Landes überproportional viel im Kompetenzfeld publiziert bzw. patentiert wird und daher – verglichen mit den anderen Feldern – überdurchschnittliche nationale Kenntnisse bestehen. Das jeweilige Kompetenzfeld nimmt also in dem Profil des Landes eine herausgehobene Stellung ein – und zwar gemessen an den weltweiten Aktivitäten.

- Der Relative Welthandelsanteil (RWA) entspricht von der Logik her dem RPA und wird analog für jedes Land  $i$  und jede Produktgruppe  $j$  nach folgender Formel berechnet:

$$RWA_{ij} = 100 * \tanh \ln [(a_{ij} / \sum_i a_{ij}) / (\sum_j a_{ij} / \sum_{ij} a_{ij})]$$

- Beim Außenhandel wird zusätzlich der „Revealed Comparative Advantage“ (RCA) gebildet, der neben den Ausfuhren ( $a$ ) auch die Einfuhren ( $e$ ) mitberücksichtigt und insofern als umfassender Indikator der Außenhandelsposition gilt. Er gibt an, inwieweit die Ausfuhr-Einfuhr-Relation eines Landes beim betrachteten Kompetenzfeld von der Ausfuhr-Einfuhr-Relation des Landes bei allen Industriewaren abweicht. Für jedes Land  $i$  und jedes Kompetenzfeld  $j$  wird der RCA nach folgender Formel berechnet:

$$RCA_{ij} = 100 * \tanh \ln [(a_{ij}/e_{ij}) / (\sum_j a_{ij} / \sum_j e_{ij})]$$

Positive Vorzeichen weisen auf komparative Vorteile, also auf eine starke internationale Wettbewerbsposition der betrachteten Kompetenzfelder im jeweiligen Land hin. Der RCA ist allerdings dann schwierig zu interpretieren, wenn Sonderfaktoren auf die Einfuhren einwirken, die nicht die eigentliche Leistungsfähigkeit betreffen. Beispiele hierfür sind ein Importsog aufgrund eines plötzlichen, über die inländischen Kapazitäten hinausgehenden Nachfrageschubs oder extrem geringe Einfuhren aufgrund von Importrestriktionen. Daher wurde auch der relative Welthandelsanteil gebildet, der die Importseite vernachlässigt. Positive Werte zeigen hier an, dass der Welthandelsanteil des betrachteten Landes im betrachteten Kompetenzfeld über dem durchschnittlichen Welthandelsanteil des Landes liegt. In der Darstellung wird jeweils sowohl das Spezialisierungsprofil mit RWA als auch mit dem RCA dargestellt. Zu bedeutenden Abweichungen des RWA vom RCA kann es z. B. kommen, wenn ein Land bei insgesamt geringen Außenhandelsniveau kaum entsprechende Technologien importiert (positiver RVCA), aber trotzdem nur schwach auf dem Weltmarkt vertreten ist (negativer RWA), oder wenn ein Land trotz starker Präsenz bei den Importen noch mehr entsprechende Technologien einführt.

Ein weiteres, insbesondere in den Ingenieurwissenschaften verbreitetes Konzept zur Abbildung der Innovationsdynamik sind Lernkurven. In den späten 1960er Jahren wurde dieses Konzept von der Boston Consulting Group unter dem Schlagwort der Erfahrungskurve eingesetzt. Erfahrungskurven sind ein breit einsetzbares Instrumentarium für die Abschätzung von Kostenreduktionen. Sie beschreiben, wie sich die Kosten für eine Technologie oder ein Produkt in Abhängigkeit der kumulierten Ausbringungsmenge entwickeln. Üblicherweise werden hierbei Preise als Indikator für die Produktkosten verwendet, da sie einfacher verfügbar sind (Wene 2000). Kernelement des Konzepts der Erfahrungs- oder Lernkurven ist die Lernrate: Sie gibt an, wie sich die Kosten für die Technologie bei einer Verdopplung der kumulierten Ausbringungsmenge entwickeln. Typischerweise werden Lernraten in der Größenordnung zwischen 10 - 30 % angenommen (McDonald/Schrattenholzer 2001; Grübler et al. 1999). Sie wurden für zahlreiche Technologien, darunter auch Erneuerbare Energietechnologien empirisch festgestellt (McDonald/Schrattenholzer 2001; Neij 1999; Berglund/Söderholm 2006; Uyterlinde et al. 2007). Durch Extrapolation der Lernkurve wird eine künftige Kostenentwicklung abgeleitet. Die Gründe für derartige Kostenreduktionen können sehr vielfältig sein, und reichen der Vornahme von Prozessinnovationen oder Skaleneffekten bei der Produktion über Veränderungen im Produkt selbst bis hin zu Veränderungen in den Inputpreisen oder Skaleneffekten im Vertrieb. (Neij et al. 2003; Berglund/Söderholm 2006).

Die Kritik am Konzept der Erfahrungskurven setzt an ihrer mangelnden theoretischen Fundierung an. Letztendlich können sie die Entwicklung der Kosten und die Stabilität der Lernrate nicht begründen. Ein zweites Problem bezieht sich auf eine verkürzte Interpretation der Lernrate und einem unreflektierten Einsatz für Kostenprojektionen. Variationen in den Rahmenbedingungen, unterschiedliche FuE-Politiken, verschiedene Anreiz- oder Kommunikationsstrukturen werden alle vernachlässigt, wenn die aus empirischen Untersuchungen abgeleitete Lernkurve als quasi autonome Kenngröße der Kostendegression in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge interpretiert wird. Ein dritter Kritikpunkt bezieht sich darauf, dass Erfahrungskurven nicht zwischen den Effekten von Preisänderungen und technischem Wandel unterscheiden können und insbesondere für langfristige Kostenschätzungen nur sehr unsichere Abschätzungen liefern können (Pan/Köhler 2007).

### 3.2 Empirische Ergebnisse zur Innovationsdynamik von Erneuerbaren Energietechnologien

Eine hohe Innovationsdynamik vergrößert das Potenzial zur Kostenreduktion. Eine Analyse der vorliegenden Abschätzungen zeigt auf, dass sich in den durchgeführten Studien ein breites Intervall von abgeschätzten Lernraten ergibt (vgl. Folz 2008). Hierbei spielen sicherlich auch die Differenzen in den Studien zu Grunde liegenden Zeitperioden und Regionen eine Rolle. Am zahlreichsten sind die Untersuchungen hinsichtlich von Erfahrungskurven für Windkrafttechnologien und die PV. Insofern können die Ergebnisse für diese beiden Technologien als belastbarer gelten. Bei den Zahlen fällt auf, dass die Lernraten hinsichtlich des auf die Bereitstellung von Elektrizität bezogenen Systemoutputs höher liegen als bei den technologisch definierten Systemteilen und den Investitionskosten für die Kraftwerke. Es bleibt allerdings unklar, ob dies auf Skaleneffekte, Learning by doing-Effekten gekoppelt mit organisatorischen Innovationen oder auf Veränderungen in den Preisstrukturen der Inputs zurückgeführt werden kann.

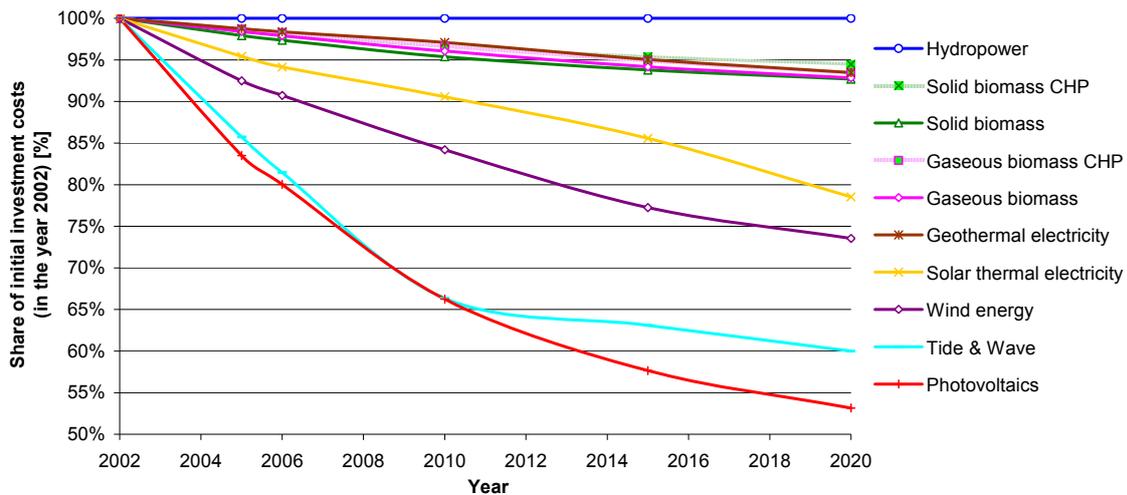
Tabelle 3-1: Typischerweise in Studien zu erneuerbaren Energietechnologien berichtete Lernraten

Technologie	Lernrate für Technikbestandteil bzw. Kraftwerk	Lernrate für Elektrizitätsbereitstellung
Biomasse	5 - 12.5	8 - 15
Geothermie	5 - 11	
Wasserkraft	1.4 - 5	
Gezeitenkraftwerk	5 - 10	
Wellenkraftwerk	10 - 18	
PV	15 - 28	35
Solarthermische Stromerzeugung	12 - 22.5	
Windkraftturbinen	6 - 9	10 - 32

In Zusammenhang mit Szenarienanalysen über die Diffusion von erneuerbaren Energietechnologien werden Erfahrungskurven auch dazu genutzt, um die sich in Zukunft einstellende Kostenreduktion bei erneuerbaren Technologien abzuschätzen. Abbildung 3-1 zeigt ein entsprechendes Ergebnis. Insbesondere für die Photovoltaik werden dabei ganz erhebliche Kostenreduktion projiziert, bedingt durch die hohen Lernraten und die starke Diffusion, die sich aus den Szenarien ergibt. Andererseits fällt auf, dass für

etablierte Technologien wie die Wasserkraft gar keine Kostendegression angesetzt wird. Hier wird aus konzeptioneller Sicht kritisch angemerkt, dass sich mit dem Konzept der Erfahrungskurven die Innovationen bei etablierten Technologien unterschätzt werden (Pan/Köhler 2007; Jamasb/Köhler 2008).

Abbildung 3-1: Künftige Kosten-Degression bei Erneuerbaren Energietechnologien auf Basis von Erfahrungskurven



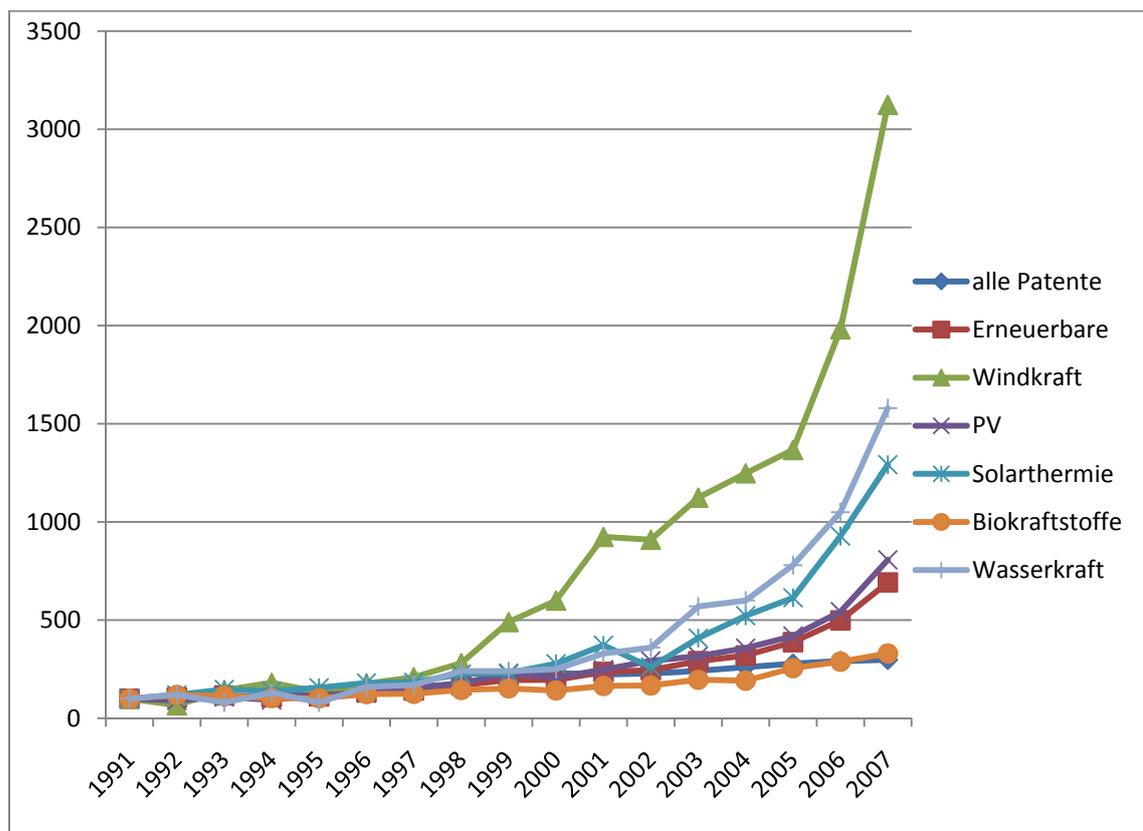
Quelle: Ragwitz 2005

Eine Schwierigkeit der Verwendung von Erfahrungskurven zur Abschätzung künftiger Kostendegressionen besteht in der Fortschreibung der Lernraten in die Zukunft. Eine Untermauerung dieser Fortschreibung kann durch einen Blick auf die Patentdynamik in den jeweiligen Technologiefeldern liefern. Patente gelten als Frühindikator für technisches Wissen (Grupp 1997). Eine hohe Patentdynamik in der Gegenwart zeigt an, dass die Wissensbasis, aus der neue Innovationen entwickelt werden können, ebenfalls schnell wächst. Eine steigende Patentdynamik deutet damit *ceteris paribus* auf eine eher hohe Lernrate hin und *vice versa*.

Die Entwicklung der Patentdynamik bei erneuerbaren Energietechnologien ist in Abbildung 3-2 wiedergegeben. Eine Aufteilung auf die einzelnen Erneuerbaren Energietechnologien verdeutlicht, dass insbesondere Windkrafttechnologien einen Schub in der Innovationsdynamik durchmachten. Aber auch der Bereich der Solartechnologien (Solarthermie und PV), und in den letzten Jahren auch die Wasserkraft haben ganz erhebliche Wachstumsraten in den Patenten. Damit ist zu erwarten, dass auch bei den Wasserkrafttechnologien in Zukunft noch weitere technische Verbesserungen realisiert werden können. Die Biokraftstoffe weisen eine Dynamik auf, die im Wesentlichen der des Durchschnitts aller Patente entspricht. Für den Durchschnitt der erneuerbaren Energietechnologien – der zu einem Drittel durch die Entwicklung bei der PV bestimmt

wird – bleibt festzuhalten, dass sich die Patentdynamik deutlich beschleunigt hat und auch deutlich über der Dynamik bei allen Patenten liegt. Erneuerbare Energietechnologien gehören also ganz eindeutig zu den innovationsstarken Technologiebereichen. Insgesamt zeichnet also die Patententwicklung ein Bild der Innovationsdynamik, das durchaus konsistent mit der Annahme deutlicher künftiger Kostendegressionen ist.

Abbildung 3-2: Entwicklung der Patentdynamik bei Erneuerbaren Energietechnologien (1991 = 100)

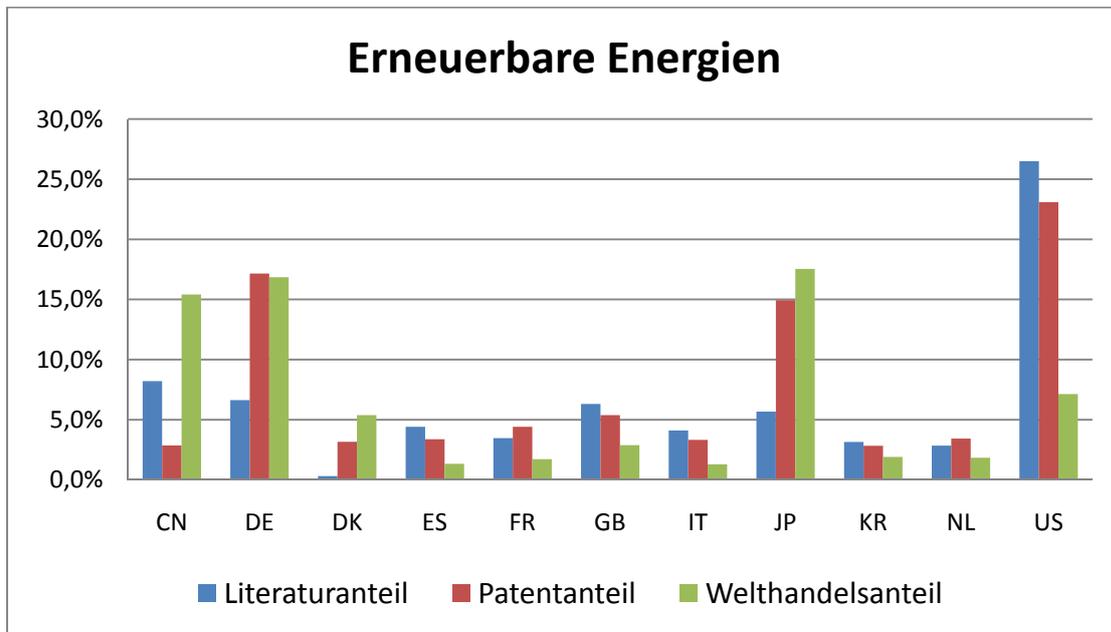


### 3.3 Technologische Leistungsfähigkeit einzelner Länder bei Erneuerbaren Energietechnologien

Erneuerbare Energien bilden das Rückgrat einer nachhaltigen Energieerzeugung. Einen wichtigen Indikator für das technische Entwicklungspotenzial Deutschlands im internationalen Vergleich in dieser Produktgruppe geben die in Abbildung 3-3 dargestellten Anteile verschiedener relevanter Länder an den Publikationen, Patenten und den Exporten wieder. Bei den Exporten liegen Deutschland und Japan vorne; die USA liegt noch hinter China auf Rang 4. Deutschland liegt mit 16 % der Patentanmeldungen hinter den USA aber noch vor Japan. Bei den Veröffentlichungen weist die USA mit Ab-

stand den höchsten Anteil auf. Der Anteil von Deutschland ist hier deutlich geringer als bei den Patenten oder Exporten.

Abbildung 3-3: Literatur-, Patent- und Welthandelsanteil bei Erneuerbaren-Energie-Technologien im Jahr 2007



Die Entwicklung der Patentanteile zeigt auf, dass die führenden OECD-Länder (USA, Deutschland, Japan) hier seit Anfang der 1990er Jahre Anteile verloren haben. Allerdings deutet die Entwicklung der letzten Jahre darauf hin, dass Deutschland und die USA ihre Anteile stabilisieren könnten. Anteilsgewinne konnten OECD-Länder wie Spanien und Italien realisieren, vor allem aber auch Schwellenländer wie China, die als neuer Wettbewerber bei Erneuerbaren Energietechnologien auch in Zukunft an Bedeutung gewinnen dürften.

Da die Länder unterschiedlich groß sind, können sie nur schwer miteinander verglichen werden. Um die Größenunterschiede analytisch auszublenden, werden üblicherweise spezifische Werte gebildet, für die eine weitere Ländergröße zur Normalisierung herangezogen wird. Abbildung 3-5 zeigt mit dem Bruttoinlandsprodukt des jeweiligen Landes normalisierte Patentintensität (Patente pro Billion Bruttoinlandsprodukt). Dänemark weist mit Abstand die höchste Patentintensität auf. Dies rührt vor allem aus der – im Vergleich zur Größe der Wirtschaft ganz exorbitant ausgeprägten – Anzahl der Patente bei Windkrafttechnologien. Dahinter folgt bereits Deutschland, gefolgt von den Niederlanden und Süd-Korea.

Abbildung 3-4: Entwicklung des Patentanteils bei Erneuerbaren-Energie-Technologien für ausgewählte Länder

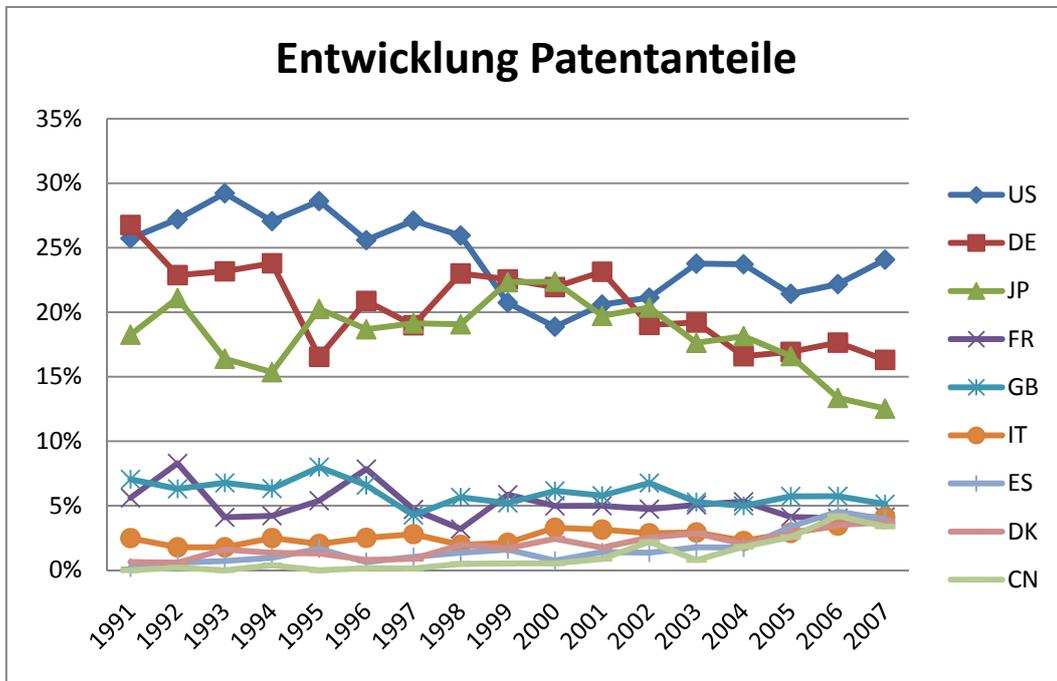
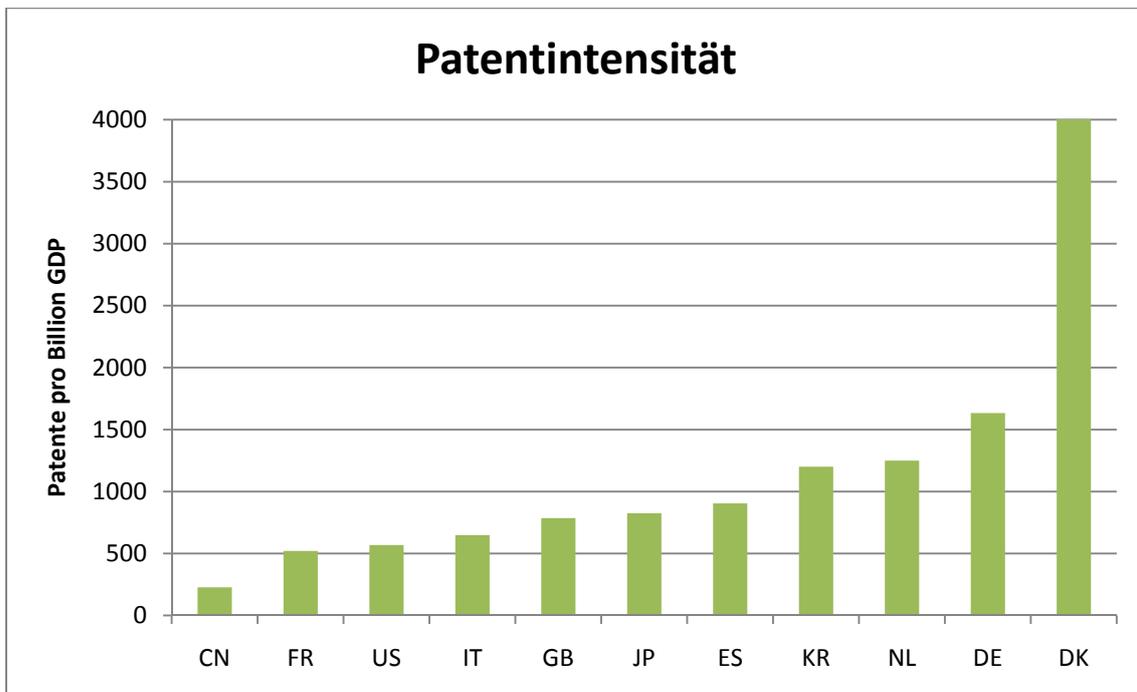
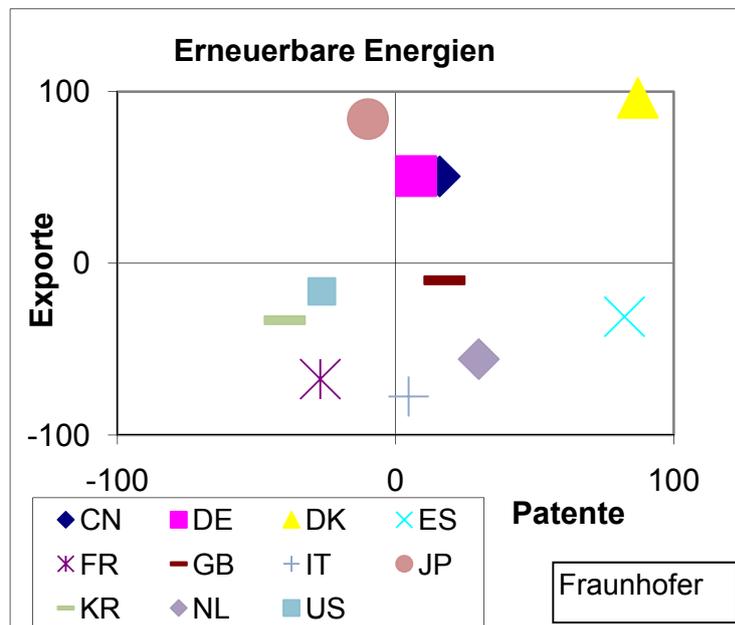


Abbildung 3-5: Patentintensität bei Erneuerbaren-Energie-Technologien für ausgewählte Länder



Beim Spezialisierungsprofil schneidet Deutschland sowohl bei den Patenten als auch beim Außenhandel positiv ab. Weniger deutlich ausgeprägt, aber noch immer positiv ist auch die Spezialisierung bei den Publikationen zu erneuerbaren Energietechnologien. Erneuerbare Energietechnologien erweisen sich also als eine entlang des Innovationszyklus konsistent auftretende Stärke Deutschlands, was auch auf eine hohe Wettbewerbsfähigkeit in der Zukunft schließen lässt. Japan besitzt ein ähnliches, aber bei den Patenten nicht ganz so positives Spezialisierungsprofil, während die USA ihre Stärken eher in anderen Technologiefeldern aufgebaut hat. Die Spezialisierung von Dänemark im Bereich der Windkraft fällt so stark aus, dass sich auch bei den Werten für alle Erneuerbaren Energietechnologien eine extreme Spezialisierung ergibt. Hervorzuheben ist schließlich auch das Spezialisierungsprofil von China: Es wird deutlich, dass die Fundierung der Außenhandelserfolge durch eine eigenständige technologische Wissensbasis im Bereich der Erneuerbaren Energietechnologien überproportional erfolgreich gewesen ist, so dass sich eine Spezialisierung sowohl bei den Patenten als auch im Außenhandel ergibt.

Abbildung 3-6: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Erneuerbaren-Energie-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA



Die technologische Leistungsfähigkeit und Wettbewerbssituation ist allerdings bei den einzelnen Erneuerbaren Energietechnologien unterschiedlich ausgeprägt (vgl. die entsprechenden Auswertungen für die einzelnen Technologiefelder im Anhang). Dies zeigt sich auch für Deutschland, wenn auch in weniger ausgeprägten Ausmaß als in anderen Ländern:

- Deutschland ist sehr stark im Bereich der Windkraft, und hat sich hier hervorragendes Ausgangsbedingungen für außenwirtschaftliche Erfolge erarbeitet, die es in der nächsten Zeit weiter zu nutzen gilt. Es ist gelungen, nach einem zwischenzeitlichen Importsog während des rasanten Aufbaus der installierten Leistung in Deutschland zu Beginn des Jahrzehnts nun verstärkt auf Exportmärkten erfolgreich zu werden. Entsprechend hat sich das Spezialisierungsprofil nicht nur bei den Exporten (RWA), sondern auch beim Verhältnis von Exporten zu Importen (RCA) sehr positiv entwickelt. Andererseits hat das Ausland bei der Patententwicklung, bei der Deutschland Anfang der 2000er weit vorne lag, in den letzten Jahren wieder aufgeholt (vgl. Abbildungen im Anhang), und die Konkurrenzsituation gerade aus Ländern wie China dürfte sich in der Zukunft noch verstärken.
- Die Solarthermie gehört ebenfalls zu den Stärken Deutschlands, obwohl hier der Zusammenhang zur Inlandsdiffusion nicht so gegeben ist wie bei der Windkraft. Sowohl bei den Welthandelsanteilen als auch den Patenten liegt Deutschland an der Weltspitze. Allerdings zeichnet sich auch hier ein Nachziehen des Auslandes ab. Aus deutscher Sicht wird es in Zukunft darauf ankommen, sich verstärkt in schlagkräftige Konsortien einzubringen, die die Umsetzung solarthermischer Anlagen in den dafür klimatisch geeigneten Ländern voranbringen.
- Die Situation ist eher verhalten im Bereich der Biokraftstoffe. Der Anteil Deutschlands an den Patenten ist hier von etwa 25 % Anfang der 1990er Jahre auf nur noch etwa 10 % abgesunken. Hier wird es darauf ankommen, gerade in den Bereichen der zweiten und dritten Generation von Biotreibstoffen weitere Forschungserfolge zu erzielen und diese in marktgängige Produkte umzusetzen.
- Für die Wasserkraft ergibt sich eine Sondersituation: Hier hat das in der Vergangenheit aufgehäufte technologische Know-how dazu geführt, dass sich Deutschland eine Spitzenposition bei den Exporten erarbeiten konnte. Allerdings hat Deutschland an der enormen Steigerung der Patentaktivitäten in den letzten 15 Jahren deutlich weniger partizipiert als bei den anderen Erneuerbaren Energietechnologien. Der Aufbau neuen Know-hows hat also sehr stark auch in anderen Ländern stattgefunden. Es bleibt abzuwarten, in welchem Ausmaß diese Entwicklung auch zu einer verstärkten Konkurrenz im Außenhandel führen wird.
- Die Spezialisierung bei der PV ist neutral bei den Patenten, und leicht positiv bei den Exporten; betrachtet man aber zusätzlich auch die Importe, zeigt sich, dass Deutschland hier eine negative Spezialisierung aufweist, da in den letzten Jahren ganz erhebliche Steigerungen bei den Importen zu verzeichnen waren. Hier stellt sich die Frage, ob dies ein Übergangsphänomen ähnlich wie bei der Windkraft ist, oder ob sich hier eine andere Situation abzeichnet, die auch andere strategische Ausrichtungen erfordert.

Abbildung 3-7: Entwicklung der Patentanteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien

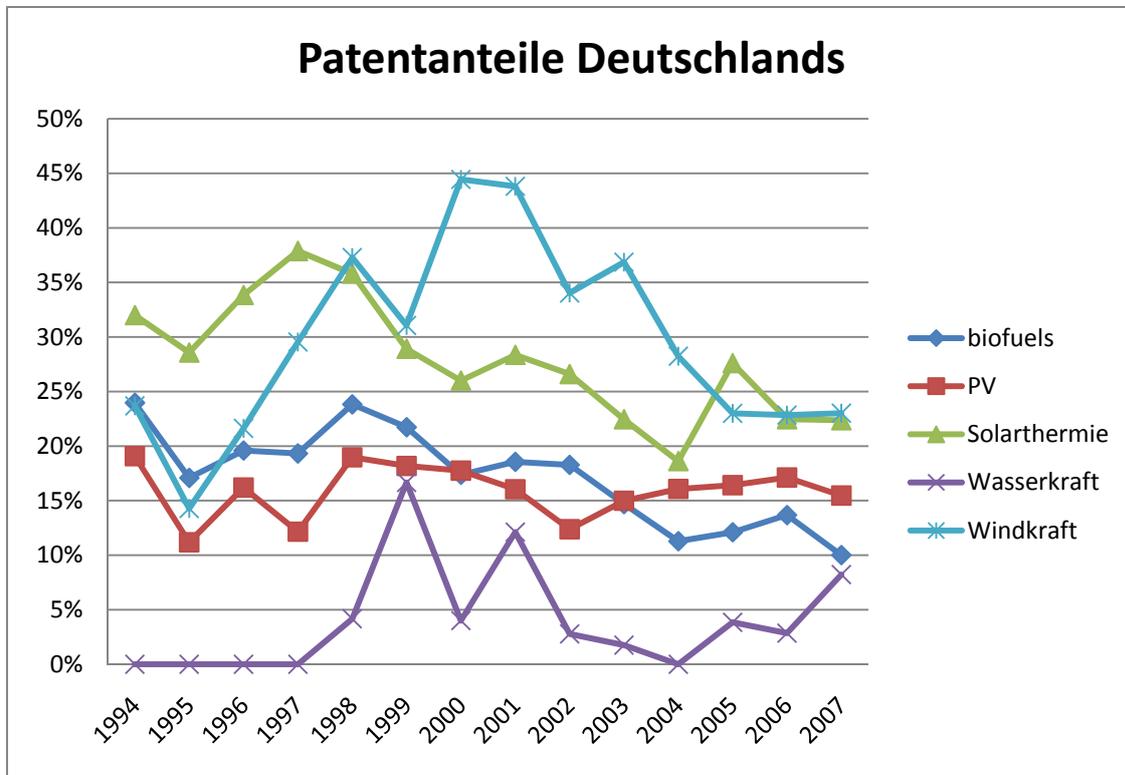
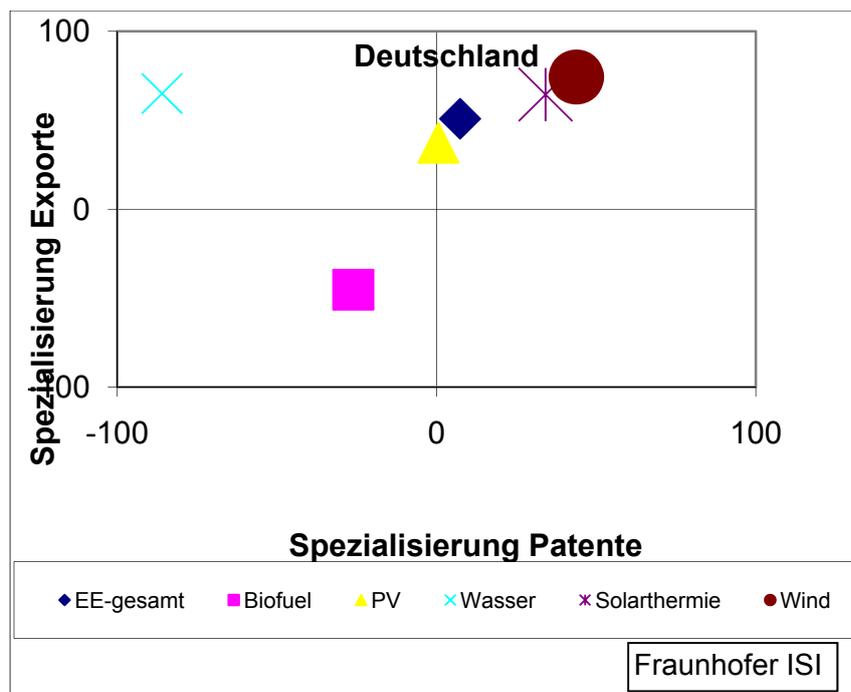


Abbildung 3-8: Spezialisierung von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbar-Energien-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA



## 4 Ableitung von Hinweisen für eine innovationsorientierte Gestaltung der Förderpolitik

Aus den Ergebnissen der konzeptionellen und empirischen Analysen lassen sich eine Reihe von Schlussfolgerungen für eine zielgerichtete „Innovationspolitik Erneuerbare Energietechnologien“ ableiten. Anknüpfend an den ganzheitlichen Ansatz der „Systems of Innovations“ in ihrer Anwendung auf Erneuerbare Energietechnologien beziehen sie sich insbesondere auf folgende Faktoren:

- Bedeutung und Entwicklung der FuE-Ausgaben,
- Bedeutung und Ausgestaltung nachfrageorientierter Maßnahmen,
- Politikstil,
- akteursspezifische Ausprägungen der Verknüpfungen der Akteure im Innovationssystem, sowie
- technologiespezifische Herausforderungen.

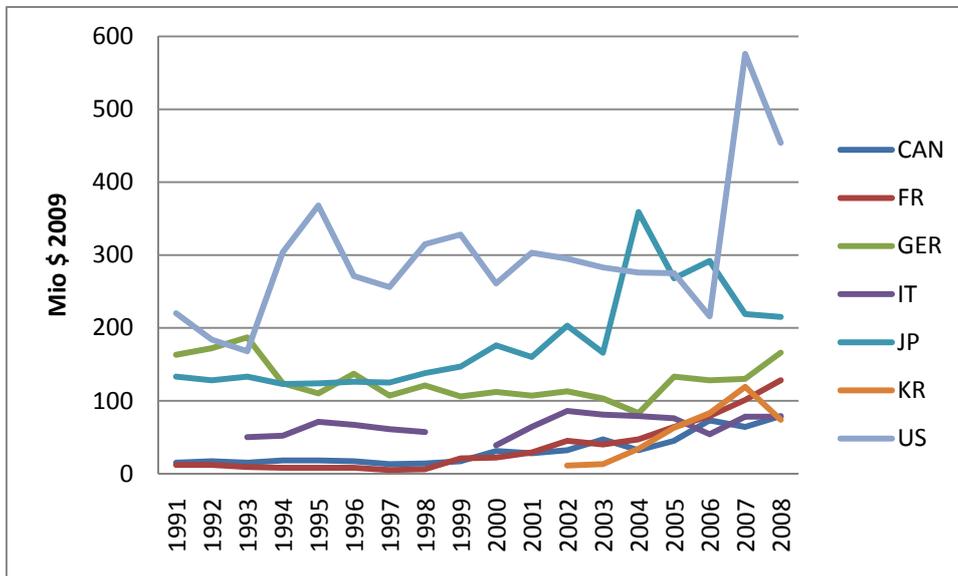
Bei der Beurteilung der Position Deutschlands ist auch der Vergleich mit den öffentlichen FuE-Aufwendungen für die Erneuerbaren Energietechnologien interessant. Diese sind in Euro<sub>2009</sub><sup>5</sup> für einige wichtige Länder im zeitlichen Verlauf von 1991 bis 2008 dargestellt. Zwar stellen die öffentlichen FuE-Ausgaben nur einen Teil der gesamten FuE-Ausgaben dar, allerdings waren sie in den letzten zwanzig Jahren ein wesentlicher Einflussfaktor. Erst in jüngerer Zeit hat bei Technologien wie der Windenergie die private FuE zugenommen.

Aus dem zeitlichen Verlauf der FuE-Ausgaben können folgende Kernaussagen gewonnen werden: Nach der großen Welle der erneuerbaren Förderung in der ersten Hälfte der achtziger Jahre (USA in der Spitze über 1100 Millionen Euro), ebte die Förderung in den 1990er Jahren ab, um dann erst wieder zwischen 1995 und 2000 verstärkt einzusetzen. Zu Beginn der 1990er Jahre lagen Deutschland, die USA und Japan in etwa gleich auf, im 1993 überholte Deutschland sogar die USA. Danach öffnete sich dann aber eine Schere: Während Deutschland zurückfiel, steigerten die USA und Japan ihre Ausgaben. Aber auch in Frankreich und Korea nahm die Förderung für die Erneuerbaren Energietechnologien in den letzten Jahren stärker zu. Die bisher für 2009 verfügbaren Daten zeigen einen weiteren Anstieg vor allem in den USA, die damit eine klare Spitzenposition im quantitativen Ausmaß der FuE-Förderung von erneuerbaren Energietechnologien aufweisen.

---

<sup>5</sup> Die Benutzung von Wechselkursen zur Umrechnung auf Euro bringt wegen der Wechselkursschwankungen, speziell zwischen Dollar und Euro, eine gewisse Verzerrung mit sich.

Abbildung 4-1: Öffentliche FuE-Aufwendungen für Erneuerbare Energien in IEA-Ländern



Quelle: Daten der IEA

Die Gesamtentwicklung bei den FuE-Ausgaben für Erneuerbare Energietechnologien spiegelt sich in den einzelnen Technologielinien mit individuellen Ausprägungen wider. Dieses Bild zeigt, dass Deutschland bei den öffentlichen FuE-Ausgaben für erneuerbare Energien gegenüber einzelnen Konkurrenten doch teilweise auch deutlich verloren hat. Auch im Hinblick auf die Bedeutung, die der öffentlichen FuE-Förderung in den ökonomischen Untersuchungen über die Bestimmungsgründe des Wissenszuwachses zugesprochen wird, sollte damit auch in Zukunft eine Erhöhung der Fördermittel für FuE anvisiert werden.

Die mit Fallstudien durchgeführten Innovationssystemanalysen sowie die ökonomische Analyse hat die Bedeutung einer nachfrageorientierten Innovationspolitik aufgezeigt. Eine Erprobung im Markt ist bereits in frühen Phasen der Innovation erforderlich, damit es zu den erforderlichen Lernprozessen kommen kann. FuE-Förderung und Markterschließung sind damit keine sequenziell strikt getrennten Phasen, sondern müssen sich gegenseitig unterstützen.

Aus innovationsorientierter Sicht ist eine Diversität von Technologieansätzen erforderlich. Eine Förderpolitik, die sich zu früh auf eine bestimmte Technologie festlegt, läuft die Gefahr des „picking losers“. Ein Instrumentarium wie eine einheitliche Quote für alle erneuerbaren Energietechnologien läuft Gefahr, dass lediglich die momentan kostengünstigsten Technologien in den Genuss von Lerneffekten im Markt kommen. Durch eine derartige Strategie wäre eine erhebliche Pfadabhängigkeit in der Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien angelegt, da andere Technologien von user-producer-

Interaktionen ausgeschlossen und damit in ihrer Entwicklung behindert würden. Aus dieser Argumentation lässt sich ableiten, dass eine technologiespezifische Förderung – z. B. durch Variation der Einspeisevergütungen in Abhängigkeit von Technik oder Größe – durchaus im Einklang mit einer innovationsfreundlichen Politik steht.

Für eine hohe Innovationsdynamik ist auch ein intensiver Wettbewerb hilfreich. Bezüglich der Marktstruktur im Energiebereich ist hier darauf zu achten, dass auch Marktneulingen die Möglichkeit eröffnet wird, in den Markt einzutreten. In vielen Fällen vollzieht sich dieser Prozess durch die Etablierung neuer, kleiner und mittelgroßer Unternehmen. Die Erfolgsbedingungen dieser neu etablierten KMU hängen nun aber auch vom gewählten Instrumentarium der Nachfragepolitik ab. Im Hinblick auf die Attrahierung von Kapital sind diese Unternehmen besonders darauf angewiesen, dass ihre künftigen Erträge vorausschaubar sind. Dies gilt sowohl für potenzielle Investoren (Eigenkapital) als auch für Refinanzierungen durch die Finanzinstitutionen und die dabei geforderten Konditionen bezüglich von Risikozuschlägen auf das zur Verfügung gestellte Fremdkapital. Nicht zuletzt damit lässt sich begründen, warum es auch aus Sicht von Venture Capitalists eine klare Präferenz für feste Einspeisevergütungen gibt (Bürer/Wüstenhagen 2008). Gerade in den Phasen der Herausbildung neuer Akteure im Innovationssystem dürfte festen Einspeisevergütungen eine erhebliche Bedeutung für die Vergrößerung der Anbietervielfalt bei Technologien zur Stromerzeugung und damit mittelbar auch für die Erhöhung des Wettbewerbs zukommen.

Die Ergebnisse der Innovationssystemanalysen betonen die Bedeutung weicher Kontextfaktoren und hier insbesondere von der Stabilität der Rahmenbedingungen und Verlässlichkeit der Politik. Wenn politische Maßnahmen als Signal für eine Verzögerung des Ausbaus erneuerbarer Energien interpretiert werden, führt dies zu Verunsicherung der Investoren. Dieses Signal wird im Innovationssystem auch an die Innovatoren weitergeleitet. Nach dem Konzept von Dosi über den Wechsel technologischer Paradigmen und das damit begründbare Auftreten von Pfadabhängigkeiten (vgl. Abschnitt 2) ermöglicht die Notwendigkeit der Ko-Evolution technologischer und institutioneller Systeme auch strategische Maßnahmen, die die bestehenden technologischen Paradigmen unterstützen und daher als Hemmnis für den Übergang zu einem neuen Paradigma interpretiert werden. Aus dieser Sichtweise ist z. B. einer Verlängerung der Laufzeiten von Kraftwerken (traditionelles technologisches Paradigma), mit deren Auslaufen bereits gerechnet wurde, eine negative Auswirkung auf die Innovationen innerhalb des neuen technologischen Paradigmas (den erneuerbaren Energien) zuzusprechen, da sie als Signal einer verstärkten Pfadabhängigkeit interpretiert werden kann. In der Konsequenz wird damit die Legitimität des neuen Paradigmas vermindert, so dass diese Funktion eines Innovationssystems schwächer erfüllt wird. Umgekehrt wird die Dynamik erhöht, wenn es zu einem breiten Konsens einer Energiewende kommt, die

aus der Kernkraft aussteigt und die Bedeutung erneuerbarer Energien unterstreicht. Es ist eine Hauptaufgabe der Politik, ihre Auswirkungen auf die weichen Kontextfaktoren so zu steuern, dass eine Verunsicherung der Innovatoren und daraus folgender Investitionsattentismus vermieden wird und langfristiges Vertrauen in die Politikziele für erneuerbare Energien aufgebaut wird.

Eine zentrale Erkenntnis aus den Analysen zum Innovationssystem erneuerbarer Energien ist die Notwendigkeit einer Integration verschiedener Politikfelder und die Verbesserung der Vernetzung der Akteure. Die Integration von angebotsseitiger FuE-Förderung und nachfrageseitiger Innovationspolitik durch Steigerung der Diffusion erneuerbarer Energien stellt in vielen Ländern eine gravierende Herausforderung dar. In vielen Fällen muss eine Abstimmung über Ressortgrenzen hinweg erfolgen, was die Integration – trotz des Einsatzes entsprechender Abstimmungsmechanismen – dennoch erschwert. Insofern ist eine Kompetenzregelung, bei der die Verantwortlichkeit über angebots- und nachfrageseitige Instrumente in einem Ressort vereint wird, aus innovationspolitischer Sicht als positiv zu beurteilen.

Ein weiteres Politikfeld, das der Integration bedarf, betrifft die Kommunikation der Hersteller erneuerbarer Energietechnologien mit dem Hochschulbereich. Für die weitere Entwicklung bei erneuerbaren Energietechnologien wird es auch erforderlich sein, neue grundlagenorientierte Forschungsergebnisse zu erzielen, die bei der Weiterentwicklung erneuerbarer Energietechnologien zum Einsatz kommen. Dies betrifft z. B. Felder wie neue Materialien oder neue Steuerungskonzepte (fuzzy control). Dies macht es notwendig, die Kommunikation zwischen grundlagenorientierter Forschung und Anwendung gezielt auszubauen, damit entsprechende Forschungsfragen frühzeitig in die wissenschaftliche Community hineingetragen bzw. vorliegende Ergebnisse schnell an die entsprechenden Akteure in der angewandten Forschung und Entwicklung zurückgespult werden.

In der bisherigen Diskussion um erneuerbare Energietechnologien wurden die unternehmensinternen Faktoren bisher wenig betrachtet. Gerade in Zusammenhang mit dem demografischen Wandel dürfte sich dies ändern. Die weitere Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien wird sich in Zukunft auch verstärkt der Frage des Fachkräftemangels widmen müssen. Insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen wird es in Zukunft schwerer fallen, ihren Bedarf an hochqualifizierten Ingenieuren zu decken. Eine mögliche Strategie besteht darin, verstärkt die Kontakte in den Hochschulbereich zu etablieren, um frühzeitig Kontakt mit den künftigen Absolventen aufzubauen, um so ihre Aufmerksamkeit auf eine Tätigkeit im Feld erneuerbarer Energietechnologien zu lenken. Gleichzeitig würde es die Perspektive erneuerbarer Energietechnologien wesentlich verbessern, wenn in den Hochschulen verstärkt Studiengänge

etabliert werden, die speziell auf die Vermittlung des fachspezifischen Know-hows angelegt sind. Ähnliches gilt auch für berufliche Ausbildungsgänge. Dadurch würden auch die Transaktionskosten der Einarbeitung neuer Fachkräfte gesenkt werden. Letztendlich erfordert eine derartige Entwicklung aber eine Integration der Förderpolitik für Erneuerbare Energietechnologien in die Forschungs- und Bildungspolitik. Dabei tritt als zusätzliche Schwierigkeit auf, dass hierbei unterschiedliche Politikebenen (Bund und Länder) angesprochen sind, was die Notwendigkeit einer funktionierenden vertikalen Politikkoordination unterstreicht. Insgesamt sollte diesen neuen Herausforderungen aber verstärkte Aufmerksamkeit zukommen.

Daher wird angeregt, die Vernetzung der Akteure mit dem Hochschul- und Ausbildungsbereich für die verschiedenen Erneuerbaren-Energien-Technologien detailliert zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist auch an das in Kapitel 3.3 vorgestellte Ergebnis zu erinnern, dass der Anteil Deutschlands an den weltweiten Veröffentlichungen zu erneuerbaren Energietechnologien deutlich geringer ist als bei den Patenten oder Exporten. Insgesamt sollte die Frage geklärt werden, ob einzelne erneuerbare Energietechnologien besondere Nachteile hinsichtlich der Verankerung in und Vernetzung mit Hochschulen aufweisen, und welche Ansatzpunkte zur Verbesserung der Vernetzung getroffen werden sollten.

Die Analyse der technologischen Leistungsfähigkeit zeigt auf, dass die Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien sich verbreitern wird und weitere Länder in den Kreis wichtiger Wettbewerber aufschließen werden. Gleichzeitig ist eine Internationalisierung auch auf der Nachfrageseite zu erwarten. Beide Entwicklungen erfordern, dass die deutschen Hersteller ihren Fokus frühzeitig auf die immer stärker international geprägten globalen Wertschöpfungsketten richten. Damit entstehen zusätzliche Integrationsanforderungen an die Politik: So muss z. B. die Internationalisierungsstrategie im Bereich der Forschungspolitik, die zu Schwerpunktsetzungen z. B. auf die BRICS-Länder geführt hat und in Aktivitäten wie dem Dialogue for Sustainability umgesetzt wird, mit der nationalen Förderstrategie im Bereich erneuerbarer Energien abgestimmt werden. Auch im Rahmen der außenwirtschaftlichen Verhandlungen im Kontext von GATT und TRIPS sollten die spezifischen Interessen Deutschlands im Bereich erneuerbarer Energietechnologien beachtet werden. Dies setzt voraus, dass die technologiespezifischen Bedingungen für erfolgreiche Technologiekooperationen näher untersucht und die entsprechenden Anforderungen an die Gestaltung des internationalen Rechtsinstrumentariums formuliert werden.

Für erneuerbare Energietechnologien werden sich in Zukunft auch in anderen Bereichen noch völlig neue Herausforderungen stellen. So ist zu erwarten, dass die Entwicklung zahlreicher High-Tech-Produkte die Nachfrage nach strategisch wichtigen Roh-

stoffen deutlich erhöhen wird (vgl. Angerer et al. 2009). Hiervon sind auch erneuerbare Energietechnologien betroffen. Viele dieser strategischen Metalle spielen bei Spezialstählen und im Elektronikbereich und damit mittelbar bei Systemen erneuerbarer Energien eine wichtige Rolle. Aber auch direkt bei den Erneuerbaren Energietechnologien kommt es zum Einsatz von strategischen Rohstoffen. So kommt z. B. Gallium in der Photovoltaikindustrie zum Einsatz, aber auch Germanium wird als Substrat oder in Wafern als Siliziumersatz verwendet. Bei Dünnschichtzellen kommt auch Indium eine besondere Bedeutung zu. Schließlich spielen einige dieser Metalle auch bei Katalysatoren und bei Brennstoffzellen eine zentrale Rolle. Auf Grund der Konzentration der Förderung dieser Metalle in wenigen Ländern und der technischen Schwierigkeiten, Substitute zur Erfüllung ihrer spezifischen technischen Funktionen zu finden, wird ein Teil dieser strategischen Metalle als kritisch eingestuft (Ad-hoc Working Group 2010). Aus Sicht der Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien kommt es darauf an, sich dieser Problematik frühzeitig bewusst zu werden. In den entsprechenden Roadmapping-Prozessen zur Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien sollte daher die Problematik kritischer Rohstoffe explizit mit untersucht werden und Schlussfolgerungen für künftige R&D-Anforderungen – z. B. hinsichtlich der recyclingfreundlichen Gestaltung oder der anzustrebenden Materialsubstitutionen – herausgearbeitet werden.

Die Analyse zeigt auch auf, dass es jeweils technologiespezifische Aspekte gibt, die eine einfache Übertragung der in einem Technologiefeld gemachten Erfahrungen auf ein anderes erschwert. Dies zeigt sich z. B. an der Diskussion der Zukunft der PV-Industrie in Deutschland vor dem Lichte der Erfahrungen im Windbereich. First-Mover-Vorteile werden als Rechtfertigung der volkswirtschaftlichen Aufwendungen der Förderpolitik herangezogen, z. B. im Hinblick auf die unbestrittenen Erfolge bei der Windenergie. Gleichzeitig zeigen die bisherigen Erfolge klar die Notwendigkeit einer – innovationsfreundlich ausgestalteten - Förderpolitik auf. Die immer stärker internationalisierten Wertschöpfungsketten führen jedoch auch zu neuen Anforderungen hinsichtlich der Strategiebildung der betroffenen Unternehmen und damit auch für die innovationsfreundliche Ausrichtung der Förderstrategie. So könnte sich für die deutschen PV-Hersteller z. B. eine Strategie anbieten, die verstärkt auf eine Integration in die globalen Wertschöpfungsketten abzielt und gezielte strategische Allianzen im Ausland erfordert. Doch welche internationalen Kooperationsstrategien sind bei einer Internationalisierung der Märkte und der Wertschöpfungsketten angebracht? Welche Konsequenzen ergeben sich dann für die Förderpolitik? Müssen damit in Zukunft auch Projekte gefördert werden, in denen ausländische Verbundpartner zu den Förderempfängern gehören? Und führt dies dazu, dass auch second-mover/early-follower-Strategien für Deutschland im Bereich erneuerbarer Energietechnologien zunehmend attraktiv wer-

den? Diese Fragen verdeutlichen die Notwendigkeit, einen strategischen Dialog über die Zukunft der Förderpolitik im globalisierten Umfeld zu führen.

Mit zunehmendem Übergang von der Pilotphase in die kommerzielle Anwendung stellen sich auch für die deutschen Hersteller neue Herausforderungen. Dies trifft insbesondere für Bereiche wie die solarthermische Stromerzeugung zu, bei der es nur einen sehr begrenzten heimischen Markt gibt. Die Unterstützung bei der Gewinnung von Nutzererfahrungen und bei der Herausbildung schlagkräftiger Systemanbieter in diesen Bereichen stellen neue Herausforderungen auch für die Innovationspolitik dar.

Schließlich sind auch die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Förderung erneuerbarer Energien ein wichtiges Thema in der politischen Diskussion. Allerdings ist der Einbezug der Effekte, die von einer Innovationspolitik auf die Generierung von First-Mover-Vorteilen ausgehen kann, bisher nur ungenügend betrachtet worden. Hier ist es erforderlich, belastbare Methoden zu entwickeln, mit denen die Auswirkungen der Erneuerbare-Energien-Politik auf die Veränderung der Exporte und Importe quantifiziert werden kann. Das in Kapitel 2 skizzierte systemdynamische Modell stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, der in Zukunft weiterverfolgt werden sollte.



## **5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

### **Hintergrund und Zielsetzung**

Die Bedeutung erneuerbarer Energien für den Klimaschutz und die Ressourcenschonung sind genauso unbestritten wie die Notwendigkeit weiterer Innovationen in diesem Bereich. Bisher gibt es aber ein Defizit bei der Aufarbeitung und der Einbeziehung der Erkenntnisse der Innovationsforschung in die Politikdiskussion. Insbesondere haben sich in den letzten Jahren erhebliche Weiterentwicklungen in der Innovationsforschung ereignet, die aus Sicht des Klimaschutzes bisher zu wenig wahrgenommen werden, obwohl sie für die Begründung und das Verständnis gerade von Systeminnovationen wie den Umbau des Energiesystems hin in Richtung erneuerbarer Energien von zentraler Bedeutung sind.

In dieser Buchpublikation wird der Kenntnisstand zum Themenfeld "Innovation und erneuerbare Energien" aufgearbeitet. Die wichtigsten Ergebnisse sollen den zentralen deutschen Akteuren (Unternehmen, Verbände etc.) Hilfestellung für eine frühzeitige Orientierung in ihrer strategischen Positionierung ermöglichen. Es werden Innovationsindikatoren zu den erneuerbaren Energien erhoben und aktualisiert, ökonometrische Analysen über die Bestimmungsgründe der Innovationsaktivität bei erneuerbaren Energietechnologien durchgeführt sowie Ansätze für eine empirische Modellierung von First-Mover-Vorteilen und darauf basierenden Exporterfolgen erprobt.

### **Konzeptionelle Grundlagen**

Das Konzept der Lernkurven sowie die Analyse des Konzepts der Innovationssysteme stellen wichtige methodische Grundlagen für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Innovation und erneuerbaren Energietechnologien dar. Lernkurven sind ein erprobtes Tool im Ingenieurbereich, um die Veränderung der Kosten einer Technologie in Abhängigkeit der kumulierten Anlagen abzubilden. Wesentlicher Faktor bei den Lernkurven ist die Lernrate: Sie gibt an, um welchen Prozentsatz sich die Kosten einer Anlage reduzieren, wenn sich die kumulierte Anlagenzahl jeweils verdoppelt. Entsprechende statistische Zusammenhänge finden sich für eine Vielzahl von Technologiebereichen. Die für erneuerbare Energietechnologien herausgearbeiteten Lernraten liegen im Allgemeinen im oberen Bereich dessen, was sich an Erfahrungswerten für Technologien in anderen Bereichen feststellen lässt.

Lernkurven weisen den gravierenden Nachteil auf, dass sie die Kostenreduktion nicht erklären können. Insbesondere fehlen der Zusammenhang zu den spezifischen Bedin-

gungen für Innovationen in einzelnen Ländern und der Bezug zu einem variierenden Einsatz unterschiedlicher Politikinstrumente.

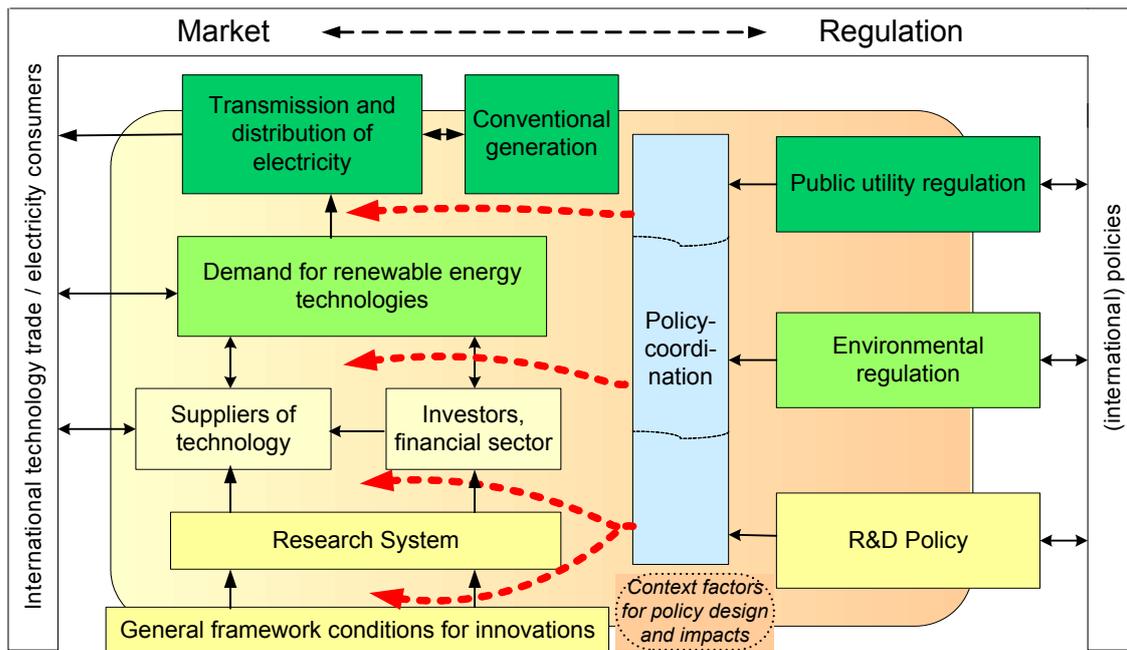
Die neuere Innovationsforschung hat zahlreiche Einsichten zu Tage gebracht, die die Bedeutung von Lernerfolgen im Markt sowie die Pfadabhängigkeit von technologischen Entwicklungen betonen: Die Entwicklung von Technologien verläuft nicht linear, sondern ist durch zahlreiche Rückkopplungen zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung geprägt. Daher ist eine frühzeitige Durchdringung im Markt eine Voraussetzung für die zielgerichtete Weiterentwicklung der Technologien. Auch braucht der Prozess der Herausbildung eines dominanten Designs Zeit. Gleichzeitig ist Diversität bei den Technologien erforderlich, die im Wettbewerb untereinander weiterentwickelt werden müssen. Eine Beschränkung der Förderung auf wenige Technologien wäre aus innovationspolitischer Sicht daher weniger geeignet.

Für erneuerbare Energietechnologien ganz zentral sind die Unterschiede in der Nachfragegenerierung, die zu "normalen" Innovationen bestehen. Da sich die externen Kosten der Umweltverschmutzung bisher nicht (oder nur unzureichend) in den Preisen widerspiegeln, muss die Politik die Gestaltung der Nachfrage nach erneuerbaren Energietechnologien in viel stärkerem Ausmaß organisieren. Ohne Umweltpolitik gäbe es kaum Nachfrage nach ökologisch fortschrittlichen Technologien. Nachfrageorientierte Innovationspolitik und die Zusammenhänge von Regulierung und Innovation werden damit zu zentralen Größen. Gleichzeitig hängen die erneuerbaren Energietechnologien eng mit der (leitungsgebundenen) Energiewirtschaft zusammen, die durch die Existenz monopolistischer Bottlenecks gekennzeichnet ist und daher früher oftmals als natürliche Monopole bezeichnet wurde. Auch nach den unterschiedlichen Liberalisierungsbemühungen verbleibt in diesen Sektoren ein erheblicher Bedarf an sektorspezifischer ökonomischer Regulierung. Die Ausgestaltung dieser Regulierung wirkt wiederum auf die Innovationsbedingungen und –tätigkeit der Akteure ein, und ist damit auch für die Innovationstätigkeit bei den erneuerbaren Energietechnologien von hoher Bedeutung. Neben der Regulierung der oben skizzierten allgemeinen Rahmenbedingungen für Innovationen und der Regulierung im Bereich der Umweltpolitik spielen damit auch ökonomische Regulierungen auf der Sektorebene eine Rolle. Daher wird für die hier anstehenden mehrfachen Regulierungsaufgaben auch der Begriff der "triple regulatory challenge" herangezogen.

Die neuere Innovationsforschung zieht zur Erklärung der Innovationstätigkeit die Heuristik des Innovationssystems heran. Zentrale Aussage dieser Konzeption ist, dass das Hervorbringen und die Diffusion neuer Lösungen wesentlich vom Zusammenspiel der unterschiedlichen Akteure des Innovationsprozesses abhängen. Neuere Ausprägungen des "Systems of Innovation Ansatzes" betonen eine disaggregierte Analyse auf

sektoraler oder technologischer Ebene. Damit kann diese Heuristik auch auf erneuerbare Energietechnologien angewendet werden. Im Rahmen dieser Heuristik können auch weiche Kontextfaktoren (z. B. situative Handlungsbedingungen für Politikdesign und -wirkungen) analysiert werden. Ihnen wird nach den Ergebnissen der Forschung eine erhöhte Bedeutung zugeschrieben.

Abbildung 5-1: Innovationssystem für Technologien für erneuerbare Energien



Quelle: Walz et al. 2008c

Ein gut funktionierendes Innovationssystem ist auch maßgeblich für Innovationen bei erneuerbaren Energien. Dabei bietet sich insbesondere eine disaggregierte Analyse auf sektoraler oder technologischer Ebene an (technologisches bzw. sektorales Innovationssystem). Insbesondere im Hinblick auf die Analyse der Entwicklung von Innovationssystemen sowie hinsichtlich einer vergleichenden Systematisierung zwischen den Ländern wird zunehmend eine Betrachtung der Funktionen eines Innovationssystems durchgeführt. Fasst man die vorliegenden Erkenntnisse zusammen, ergeben sich die folgenden stilisierten Ergebnisse:

- Regulierung auf der Angebotsseite, wie z. B. FuE-Subventionen, wirken nicht nur bezüglich der Funktionen "supply of resources" und "help in guiding search". Sie tragen außerdem zur Formung von Netzwerken bei und stärken damit die Funktion "knowledge diffusion". Erwartet wird damit ein signifikanter positiver Beitrag von FuE-Subventionen auf Innovationen.
- Da die externen Umweltkosten trotz vorliegender partieller Internalisierung (z. B. durch den Emissionshandel) insgesamt nur z. T. in die Kosten internalisiert sind, lie-

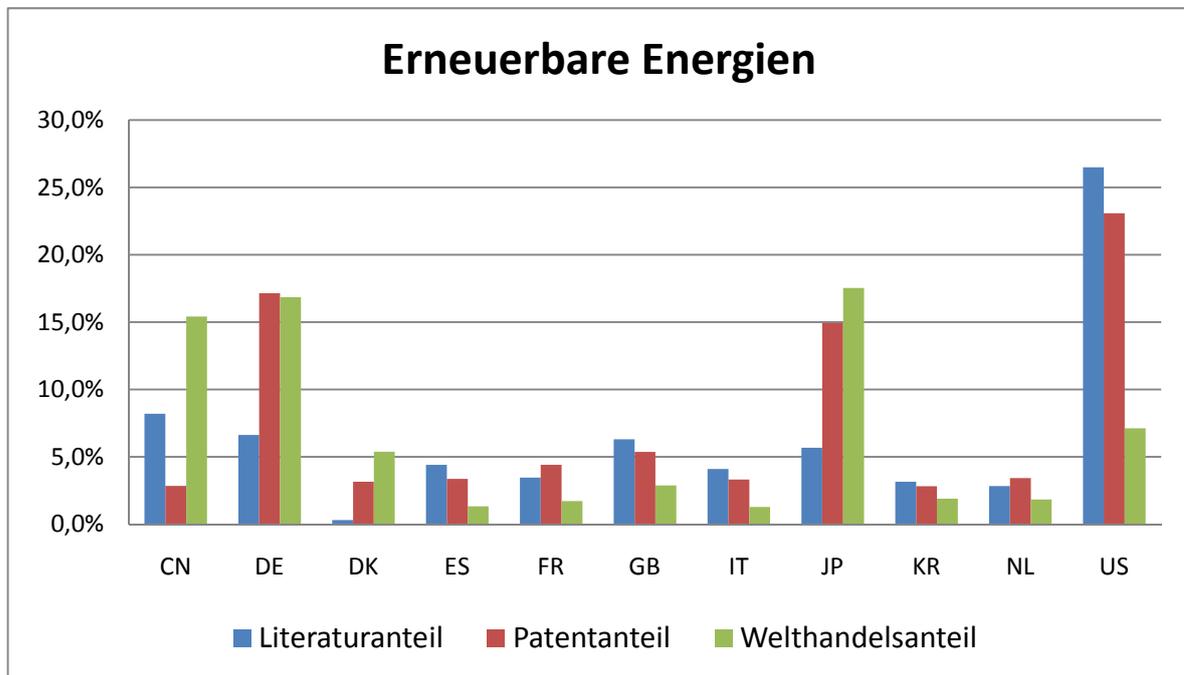
gen die entscheidungsrelevanten Kosten der erneuerbaren Energien in vielen Fällen noch immer über denjenigen alternativer Versorgungsoptionen. Regulierungen auf der Nachfrageseite (z. B. durch Einspeisevergütungen, Quotasysteme) sind erforderlich, um die Nachfrage herbeizuführen. Durch diese Regulierung werden die Funktionen "market formation", "supply of resources" und "exchange of information by user-producer interaction" ermöglicht.

- Die Stabilität bzw. Vorhersehbarkeit der Regulierung, sowie die Langfristorientierung der Zielbildung sind wichtige Variablen des Politikstils, die auf die Funktionen "legitimacy of technology" und "guidance of search" einwirken.
- Die Ausgestaltung der nachfrageseitigen Instrumente beeinflussen die Risikoperzeption und die Transaktionskosten und wirken auf die Funktionen "supply of resources" und "market formation" ein. Auf Grund der durchgeführten Fallstudien wird davon ausgegangen, dass feste Einspeisevergütungen bezüglich dieses Wirkungsmechanismus eine größere Wirkung aufweisen als alternative Instrumentarien.
- Die Diversität der Technologieoptionen ist ein zentraler Aspekt für das Wirksamwerden von Selektionsmechanismen. Daher ist die Ausgestaltung der Fördermechanismen auch bezüglich der Anzahl der Technologien, die zur Anwendung kommen, zentral. Je breiter die Förderung angelegt ist, desto mehr Technologien kommen zum Einsatz, wodurch das "Lernen im Markt" begünstigt wird.

### **Innovationsindikatorik**

Aus dem Systemcharakter des Innovationsprozesses folgt, dass unterschiedliche Aspekte die Innovationsaktivitäten mit beeinflussen. Der Aufbau einer technologischen Kompetenz ist ein zentraler Indikator für die Leistungsfähigkeit eines Innovationssystems. Hier signalisieren insbesondere wissenschaftliche Publikationen, internationale Patente und Erfolge im Außenhandel, inwieweit ein Land bei den internationalen Innovationsaktivitäten mithalten kann. Diese Indikatoren wurden im Projekt aufgestellt und zuletzt Ende 2009 für das letzte verfügbare Jahr (2007) nochmals aktualisiert.

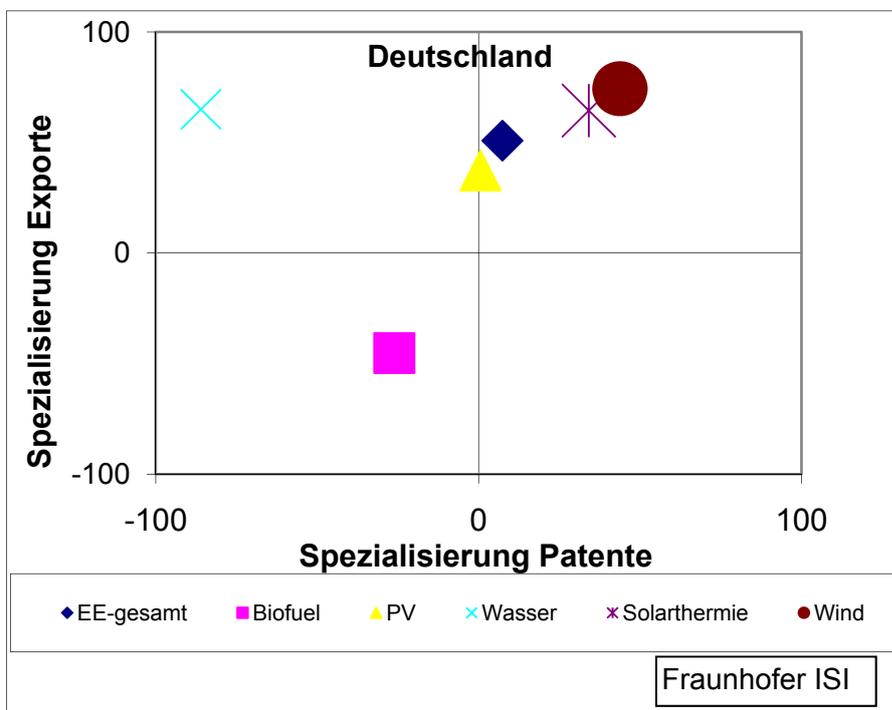
Abbildung 5-2: Innovationsindikatoren im Bereich von Technologien für erneuerbare Energien für ausgewählte Länder in 2007



Quelle: Fraunhofer ISI

Deutschland hat sich eine starke Position bei den erneuerbaren Energien erarbeitet. Die Ergebnisse verdeutlichen zugleich, dass die Analyse technologiespezifisch erfolgen muss. So ist die technologische Kompetenz in Japan bei den unterschiedlichen erneuerbaren Energietechnologien völlig unterschiedlich ausgeprägt. Deutschland ist hier vergleichsweise breit aufgestellt. Gleichzeitig müssen Größenunterschiede zwischen den Ländern berücksichtigt werden. Hierzu werden Spezialisierungsindikatoren wie relative Patentaktivitäten (RPA) oder relative Welthandelsanteile (RWA) gebildet. Es wird deutlich, dass sich Deutschland bereits auf erneuerbare Energietechnologien spezialisiert und in diesen Bereichen überdurchschnittliche Kompetenzen aufgebaut hat.

Abbildung 5-3: Spezialisierung Deutschlands im Bereich von Technologien für erneuerbare Energien im Jahr 2007



Positiver Wert: Überdurchschnittliche Patent- bzw. Exportspezialisierung

### Innovation, Politikinstrumente und Exporte

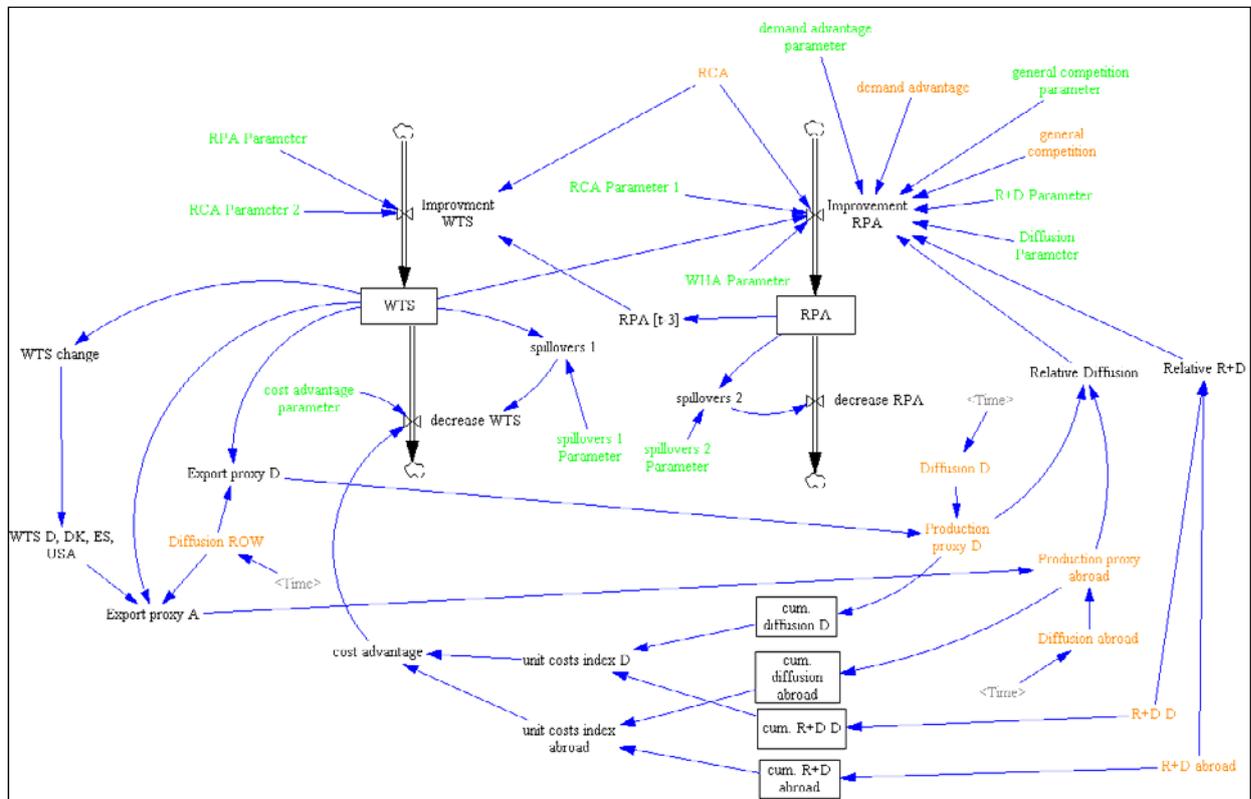
Die Maßnahmen zur Innovationsförderung bei den erneuerbaren Energien umfassen zahlreiche Politikbereiche. FuE-Förderung gehören hier ebenso dazu wie die Politikinstrumente der Nachfragegenerierung, also z. B. feste Einspeisevergütungen oder Quotensysteme. Aber auch weiche Kontextfaktoren, die die langfristige Verlässlichkeit und die Kommunikationsbeziehungen adressieren, sind wichtige Parameter.

Um die Zusammenhänge zwischen Innovation und Politik besser zu verstehen, können die oben angeführten Innovationsindikatoren mit Indikatoren abgeglichen werden, die die Politikmaßnahmen widerspiegeln. Die im Projekt durchgeführten ökonometrischen Analysen für 12 OECD-Länder bestätigen eindrucksvoll, dass die frühzeitige Diffusion und die FuE-Förderung, aber auch Stil und Ausgestaltung der Politiken wichtige Erfolgsfaktoren für eine hohe Innovationstätigkeit sind.

Eine hohe Innovationsdynamik ist auch eine Grundvoraussetzung für die Etablierung von Exporterfolgen bei den Technologien, bei denen nicht allein der Preis, sondern auch die Qualität ein wichtiger Wettbewerbsparameter ist. Bei der Windenergie ist es

Deutschland hier gelungen, ganz erhebliche Erfolge zu erzielen. Die Bedingungen für derartige "First-Mover-Vorteile" wurden systematisch untersucht und ein erster Modellierungsansatz zur empirischen Projektion von Vorreiter-Märkten entwickelt. Unter den Bedingungen der Globalisierung sind entscheidende Voraussetzungen für den Erfolg einer Vorreiter-Markt-Strategie die Etablierung schwer transferierbarer Leistungsverbünde, die aus Kombinationen von technologischer Leistungsfähigkeit mit einer gegenüber Innovationen aufgeschlossenen und frühzeitige Lerneffekte begünstigenden Nachfrage und ihrer Integration in ausdifferenzierte Produktionsstrukturen bestehen. In einem System Dynamics-Modell wurden im Rahmen des Projektes die Exportpotenziale von Windkraftanlagen modelliert. Es gehen sowohl nachfragebezogene Faktoren und die technologische Leistungsfähigkeit (z. B. in Form von Spezialisierungsindikatoren), aber auch politikgetriebene Variablen wie Erhöhung der Nachfrage, der FuE-Aufwendungen, aber die Ausgestaltung des Regulierungsregimes in das Modell ein. Eine Erosion von Vorreitervorteilen wird durch Wissens-Spillover modelliert. Zwischen diesen Faktoren bestehen zahlreiche Rückkopplungsmechanismen, die durch die System Dynamics Methode behandelt werden können. Der Kalibrierungszeitraum für das Modell umfasst den Zeitraum 1996-2004, es werden dabei Deutschland und der Rest der Welt unterschieden. Mit diesem Modell konnten Szenarien für die deutschen Exportanteile bei Windenergie berechnet werden, die Elemente der Diffusions- und Politikmuster variieren. Eindeutiges Ergebnis auch hier: Die Exportanteile Deutschlands bei Windkraftanlagen hängen maßgeblich von der inländischen Politik und der Innovationodynamik ab. Die Exportanteile liegen unter günstigen Szenarienbedingungen um etwa 50 % über dem Niveau, das sich bei weniger günstigen Bedingungen ergibt.

Abbildung 5-4: Systemdynamisches Modell zur Projektion der Exportanteile von Windkraftanlagen



Quelle: Walz et al. 2009

## Schlussfolgerungen für die Politikgestaltung und den Forschungsbedarf

Die mit Fallstudien durchgeführten Innovationssystemanalysen sowie die ökonometrische Analyse hat die Bedeutung einer nachfrageorientierten Innovationspolitik aufgezeigt. Folgende Aspekte sollten dabei beachtet werden:

- Eine Erprobung im Markt ist bereits in frühen Phasen der Innovation erforderlich, damit es zu den erforderlichen Lernprozessen kommen kann. FuE-Förderung und Markterschließung sind keine sequenziell strikt getrennten Phasen, sondern müssen sich gegenseitig unterstützen.
- Aus innovationsorientierter Sicht ist eine Diversität von Technologieansätzen erforderlich. Eine Förderpolitik, die sich auch implizit auf eine bestimmte Technologie konzentriert, läuft Gefahr, dass lediglich die momentan kostengünstigsten Technologien in den Genuss von Lerneffekten im Markt kommen. Durch eine derartige Strategie wird eine erhebliche Pfadabhängigkeit in der Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien angelegt, da andere Technologien von user-producer-Interaktionen ausgeschlossen und damit in ihrer Entwicklung behindert werden. Die

Ergebnisse deuten darauf hin, dass technologiespezifische Instrumente wie das in Deutschland eingesetzte Instrumentarium technologiespezifischer Einspeisevergütungen hier innovationsfreundlicher gewirkt haben.

- Für eine hohe Innovationsdynamik ist auch ein intensiver Wettbewerb hilfreich. Bezüglich der Marktstruktur ist hier darauf zu achten, dass auch Marktneulingen die Möglichkeit eröffnet wird, in den Markt einzutreten. In vielen Fällen vollzieht sich dieser Prozess durch die Etablierung neuer, kleiner und mittelgroßer Unternehmen. Gerade im hochregulierten Elektrizitätsbereich ist darauf zu achten, dass günstige Anfangsbedingungen für derartige Newcomer bestehen. Die Erfolgsbedingungen dieser neu etablierten KMU hängen nun aber auch vom gewählten Instrumentarium der Nachfragepolitik ab. Im Hinblick auf die Attrahierung von Kapital sind diese Unternehmen besonders darauf angewiesen, dass ihre künftigen Erträge vorausschaubar sind. Dies gilt sowohl für potenzielle Investoren (Eigenkapital) als auch für Refinanzierungen durch die Finanzinstitutionen und die dabei geforderten Konditionen bezüglich von Risikozuschlägen auf das zur Verfügung gestellte Fremdkapital. Nicht zuletzt damit lässt sich begründen, warum es selbst aus Sicht von Venture Capitalists eine klare Präferenz für feste Einspeisevergütungen gibt. Insofern wirken Einspeisevergütungen auf eine Erhöhung der Anbietervielfalt und damit mittelbar auf eine Intensivierung des Wettbewerbs hin. Hinzu kommt, dass die jährliche Absenkung der Vergütungssätze noch einen zusätzlichen Innovationsanreiz bewirkt.
- Die Ergebnisse betonen die Bedeutung weicher Kontextfaktoren und hier insbesondere von der Stabilität der Rahmenbedingungen und Verlässlichkeit der Politik. Wenn politische Maßnahmen als Signal für eine Verzögerung des Ausbaus erneuerbarer Energien interpretiert werden, führt dies zu Verunsicherung nicht nur bei den Investoren, sondern auch den Innovatoren.

Eine zentrale Erkenntnis aus den Analysen zum Innovationssystem erneuerbarer Energien ist die Notwendigkeit einer Integration verschiedener Politikfelder und die Verbesserung der Vernetzung der Akteure. Folgende Aspekte spielen hier eine Rolle:

- Die Integration von angebotsseitiger FuE-Förderung und nachfrageseitiger Innovationspolitik durch Steigerung der Diffusion erneuerbarer Energien stellt eine gravierende Herausforderung dar. In vielen Ländern muss eine Abstimmung über Ressortgrenzen hinweg erfolgen, was die Integration – trotz des Einsatzes entsprechender Abstimmungsmechanismen – dennoch erschwert. Hieraus resultiert ein wichtiges Argument, die entsprechenden Kompetenzen in einem Ressort zu bündeln.
- Die Notwendigkeit der Integration unterschiedlicher Politikfelder betrifft auch die Ankopplung der Hersteller an den Hochschulbereich. Für die weitere Entwicklung bei erneuerbaren Technologien wird es erforderlich sein, verstärkt grundlagenorientierte Forschungsergebnisse zu erzielen und auf die erneuerbaren Energien anzuwenden. Die Kommunikation zwischen grundlagenorientierter Forschung und Anwendung sollte gezielt ausgebaut werden, damit entsprechende Forschungsfragen

frühzeitig auch an die wissenschaftliche Community (z. B. in der Materialforschung) herangetragen bzw. vorliegende Ergebnisse schnell an die entsprechenden Akteure in der angewandten Forschung und Entwicklung zurückgespielt werden.

- Die weitere Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien wird sich in Zukunft auch verstärkt der Frage des Fachkräftemangels widmen müssen. Insbesondere kleineren und mittleren Unternehmen wird es in Zukunft schwerer fallen, ihren Bedarf an hochqualifizierten Ingenieuren zu decken. Zunehmend wird es erforderlich werden, frühzeitig Kontakt mit den künftigen Absolventen aufzubauen und sie für eine Tätigkeit im Feld erneuerbarer Energietechnologien zu interessieren. Gleichzeitig würde es die Perspektive erneuerbarer Energietechnologien wesentlich verbessern, wenn in den Hochschulen verstärkt Studiengänge etabliert werden, die speziell auf die Vermittlung des fachspezifischen Know-hows angelegt sind. Letztendlich erfordert dies eine Integration der Förderpolitik für erneuerbare Energietechnologien in die Forschungs- und Bildungspolitik. Dabei tritt als zusätzliche Schwierigkeit auf, dass hierbei unterschiedliche Politikebenen (Bund und Länder) angesprochen sind, was die Notwendigkeit einer funktionierenden vertikalen Politikkoordination unterstreicht. Daher sollte die Vernetzung der Akteure bei den verschiedenen Erneuerbaren-Energien-Technologien detailliert untersucht und die Frage geklärt werden, wie die Verankerung in und Vernetzung mit Hochschulen verstärkt werden könnte.
- Die Analyse der technologischen Leistungsfähigkeit zeigt auf, dass die Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien sich verbreitern wird und weitere Länder in den Kreis wichtiger Wettbewerber anschließen werden. Gleichzeitig ist auch eine Internationalisierung der Marktnachfrage zu erwarten. Beide Entwicklungen erfordern, dass die deutschen Hersteller ihren Fokus frühzeitig auf die immer stärker international geprägten globalen Wertschöpfungsketten richten. Damit entstehen zusätzliche Integrationsanforderungen an die Politik: So sollte die Internationalisierungsstrategie im Bereich der Forschungspolitik, die zu Schwerpunktsetzungen z. B. auf die BRICS-Länder geführt hat und in Aktivitäten wie dem Dialogue for Sustainability umgesetzt wird, mit der nationalen Förderstrategie im Bereich erneuerbarer Energien abgestimmt werden.
- Auch bei außenwirtschaftlichen Verhandlungen im Kontext von GATT und TRIPS müssen die spezifischen Interessen Deutschlands bei Kooperationen im Bereich erneuerbarer Energietechnologien formuliert werden. In diesem Kontext ist zu bedenken, dass sich auch für erneuerbare Energietechnologien neue Herausforderungen stellen. So ist zu erwarten, dass die Entwicklung zahlreicher High-Tech Produkte die Nachfrage nach strategisch wichtigen Rohstoffen deutlich erhöhen. Hiervon sind auch erneuerbare Energietechnologien betroffen. Auf Grund der Konzentration der Förderung dieser Metalle in wenigen Ländern und der technischen Schwierigkeiten, Substitute zur Erfüllung ihrer spezifischen technischen Funktionen zu finden, wird ein Teil dieser strategischen Metalle als kritisch eingestuft. Aus Sicht der Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien kommt es darauf an, sich dieser Problematik bewusst zu werden. In den entsprechenden Roadmapping-Prozessen

zur Entwicklung erneuerbarer Energietechnologien sollten daher die Problematik kritischer Rohstoffe explizit mit untersucht werden und Schlussfolgerungen für künftige R&D-Anforderungen – z. B. hinsichtlich der recyclingfreundlichen Gestaltung oder der anzustrebenden Materialsubstitutionen – herausgearbeitet werden.

Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Förderung erneuerbarer Energien sind ein wichtiges Thema in der politischen Diskussion. Allerdings ist der Einbezug der Effekte, die von einer Innovationspolitik auf die Generierung von First-Mover-Vorteilen ausgehen kann, bisher nur ungenügend betrachtet worden. Hier ist es erforderlich, belastbare Methoden zu entwickeln, mit denen die Auswirkungen der Erneuerbare-Energien-Politik auf die Veränderung der Exporte und Importe quantifiziert werden kann. Der in diesem Bericht vorgestellte Ansatz einer systemdynamischen Modellierung sollte daher ausgebaut und für weitere Technologiebereiche getestet werden. Gleichzeitig sollten im Hinblick auf die Internationalisierung der Wertschöpfungsketten folgende Fragen analysiert werden:

- Welche internationalen Kooperationsstrategien sind bei einer Internationalisierung der Märkte und der Wertschöpfungsketten angebracht? Können für Teilbereiche erneuerbarer Energietechnologien second mover/early follower Strategien sinnvoll sein?
- Welche Konsequenzen ergeben sich für die nationale Förderpolitik, wenn sich deutsche Hersteller verstärkt in internationale Wertschöpfungsketten einbringen und entsprechende Kooperationen eingehen müssen?
- Wie kann die Gewinnung von Nutzererfahrungen und die Herausbildung schlagkräftiger Systemanbieter gestützt werden, wenn es kaum einen heimischen Markt gibt (z. B. solarthermische Stromerzeugung)?

Festzuhalten ist: Die Politiken zur Förderung erneuerbarer Energien sind nicht nur für den Einsatz der jeweiligen Technologien zentral, sondern stellen auch ganz entscheidende Rahmenbedingungen für die Innovationsprozesse dar. Eine frühzeitige, unterschiedliche Technologien beinhaltende Marktdiffusion der erneuerbaren Energien ist damit eine ganz wesentliche Voraussetzung für die Etablierung der Innovationsprozesse in diesem Bereich. Energie- und Umweltpolitik sind damit zugleich Innovationspolitik. Ohne die in Deutschland durchgeführten Maßnahmen zur Entwicklung und Diffusion erneuerbarer Energien wäre der Wissens- und Kompetenzaufbau bei den erneuerbaren Energietechnologien so nicht möglich gewesen.



## A.1 Anhang

### A.1.1 Abbildungen zur technologischen Leistungsfähigkeit bei erneuerbaren Energietechnologien

Abbildung A-1: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Erneuerbaren-Energie-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA

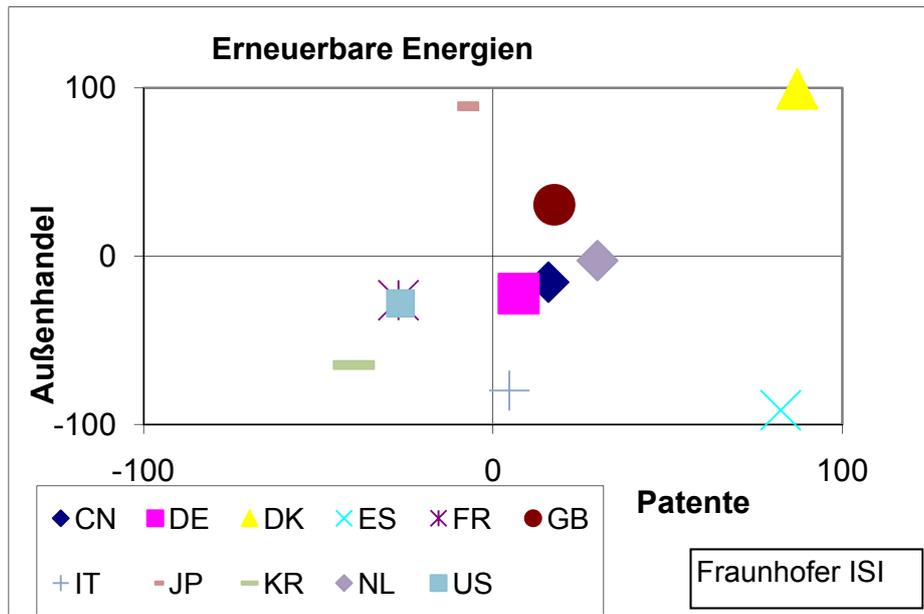


Abbildung A-2: Patent- und Welthandelsanteil bei Biokraftstoffen im Jahr 2007

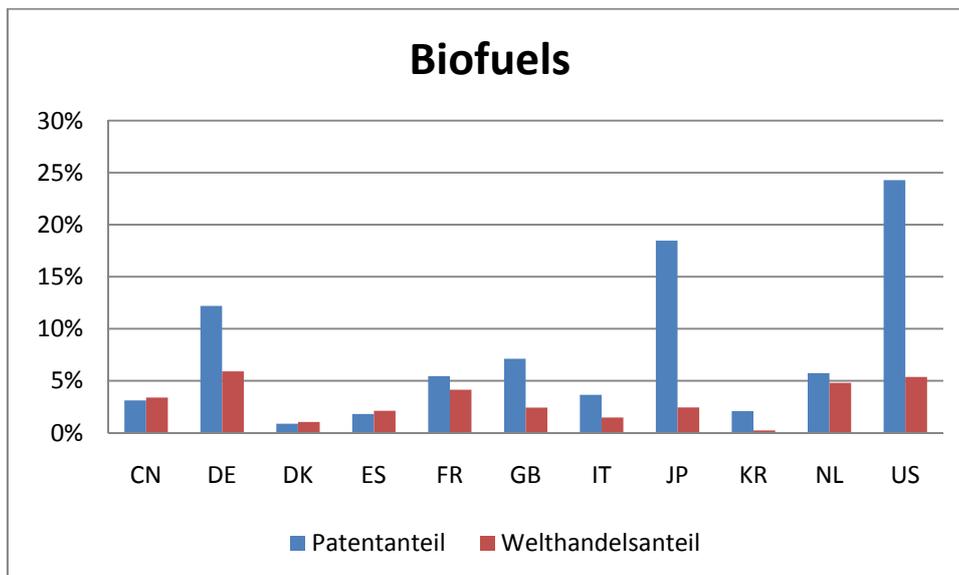


Abbildung A-3: Entwicklung des Patentanteils bei Biokraftstoffen für ausgewählte Länder

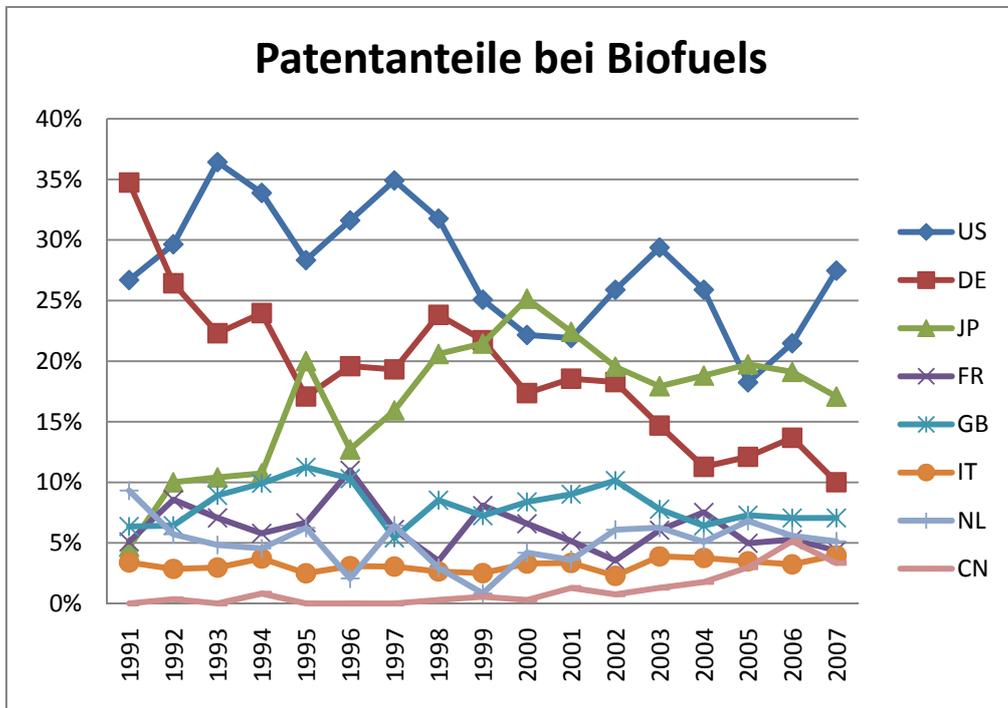


Abbildung A-4: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Biokraftstoffen mit Hilfe des RPA und RWA

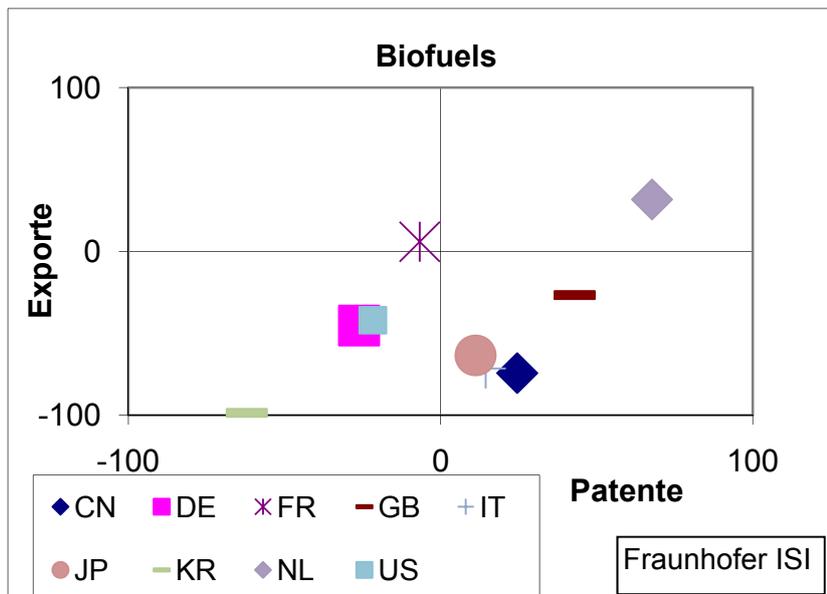


Abbildung A-5: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Biokraftstoffen mit Hilfe des RPA und RCA

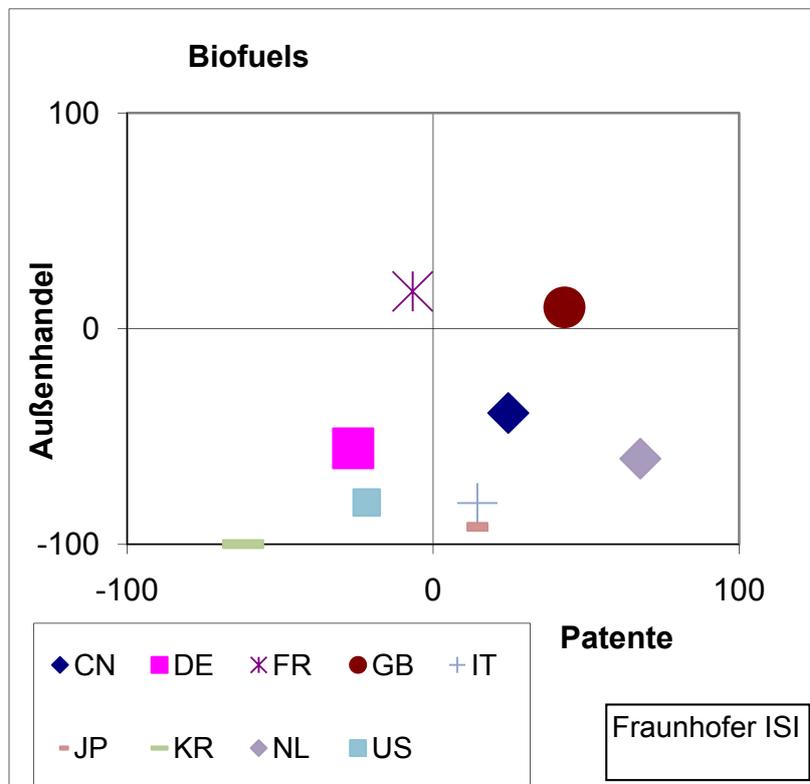


Abbildung A-6: Patent- und Welthandelsanteil bei Photovoltaik (PV) im Jahr 2007

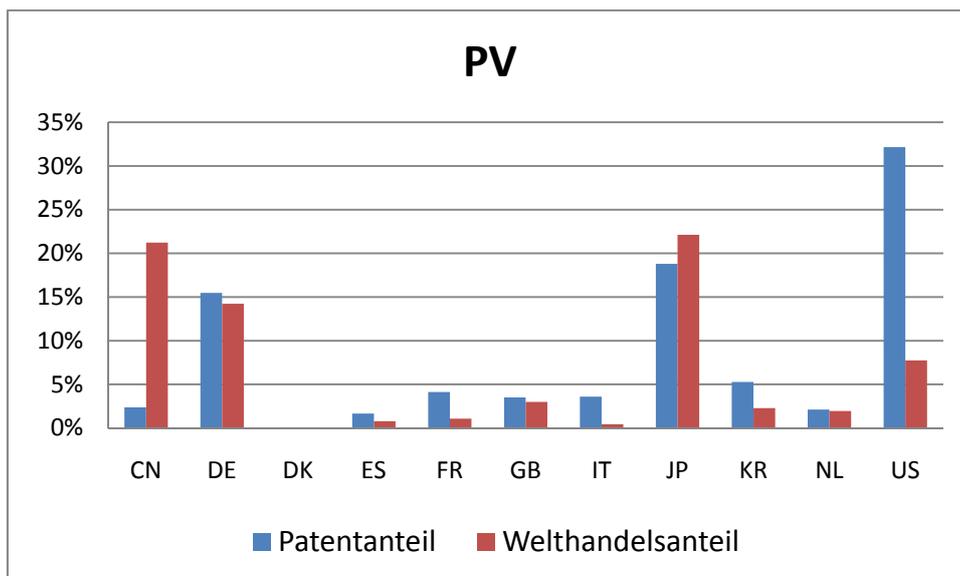


Abbildung A-7: Entwicklung des Patentanteils bei PV für ausgewählte Länder

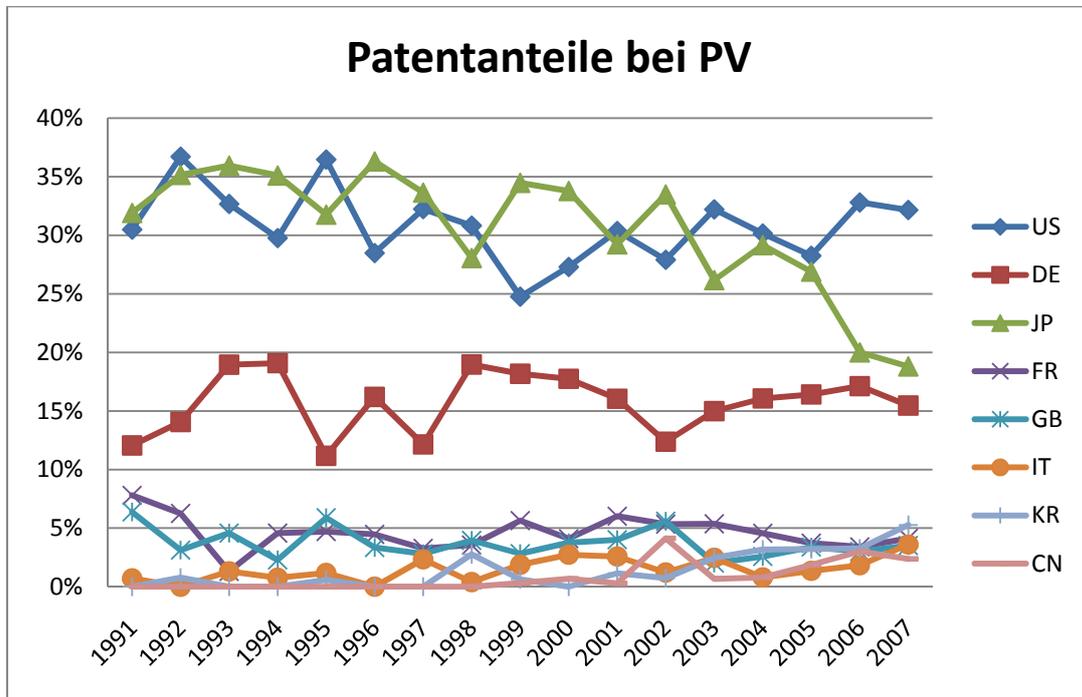


Abbildung A-8: Spezialisierung ausgewählter Länder bei PV mit Hilfe des RPA und RWA

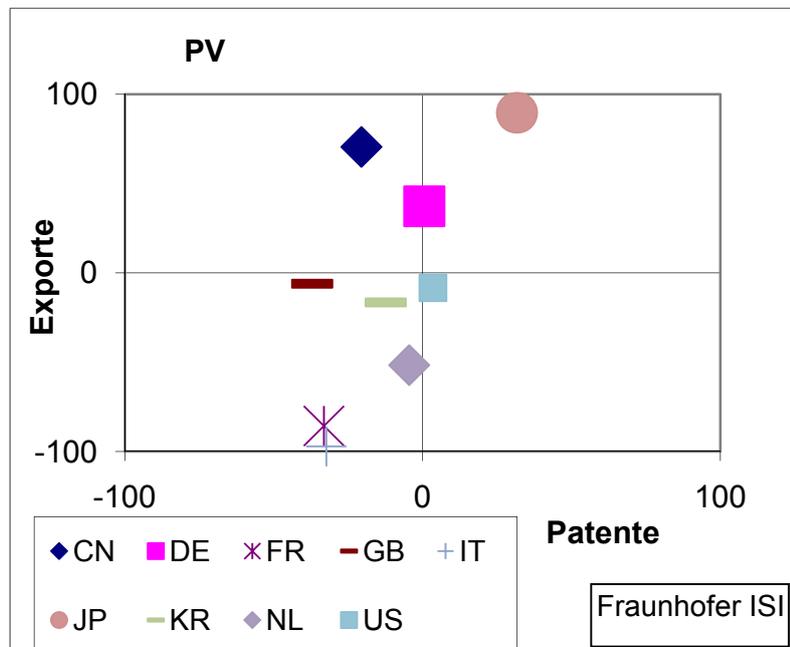


Abbildung A-9: Spezialisierung ausgewählter Länder bei PV mit Hilfe des RPA und RCA

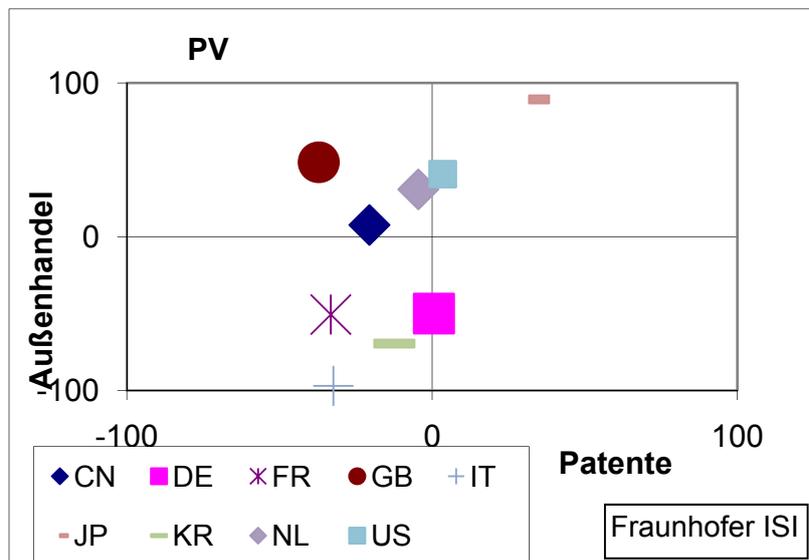


Abbildung A-10: Patent- und Welthandelsanteil bei Solarthermie im Jahr 2007

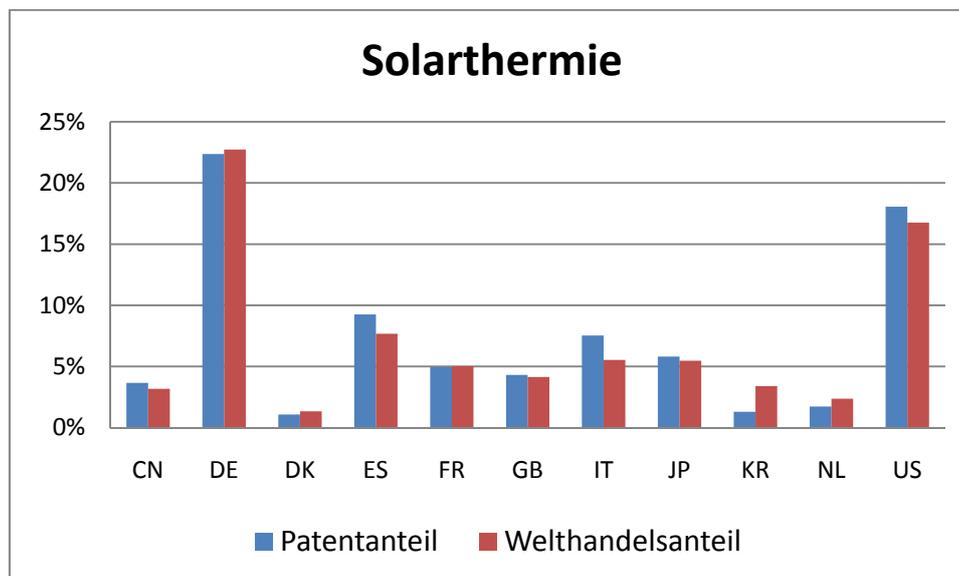


Abbildung A-11: Entwicklung des Patentanteils bei Solarthermie für ausgewählte Länder

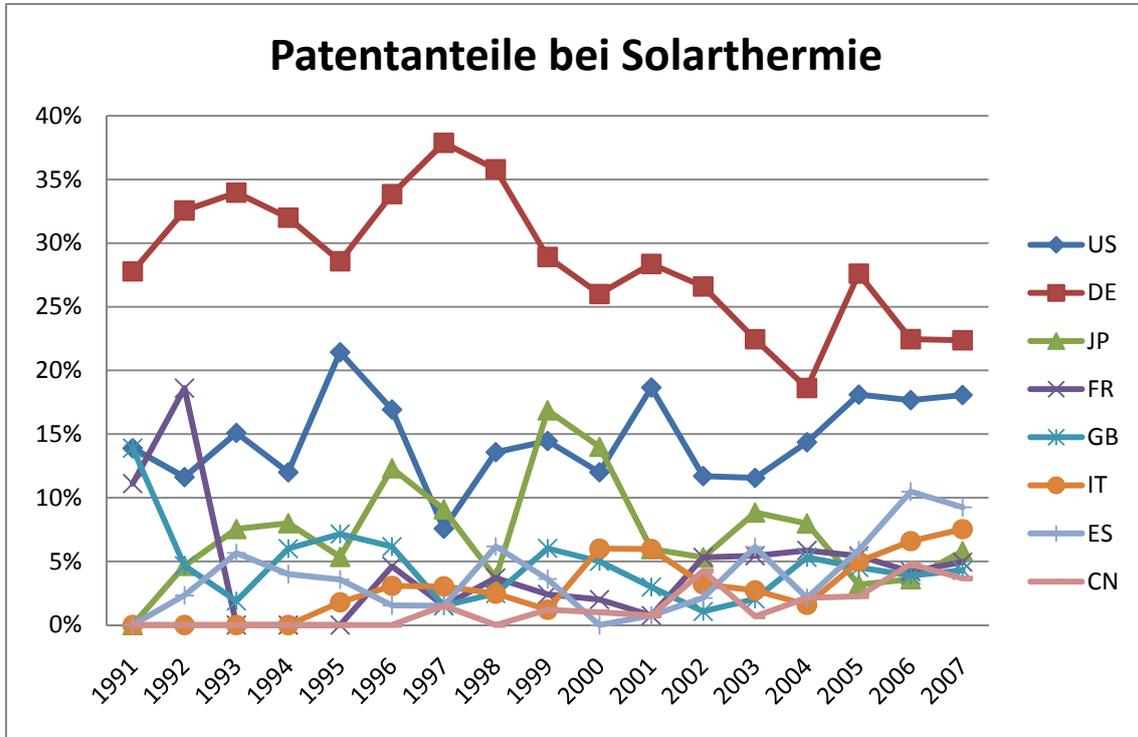


Abbildung A-12: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Solarthermie mit Hilfe des RPA und RWA

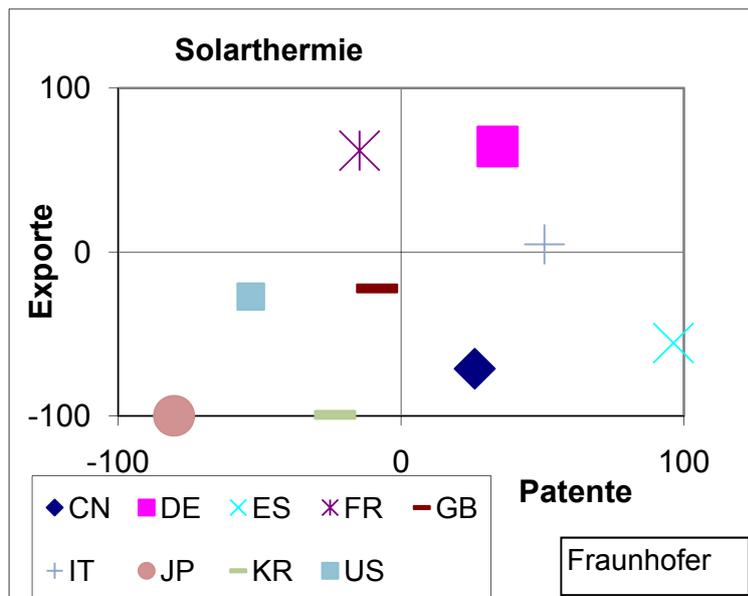


Abbildung A-13: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Solarthermie mit Hilfe des RPA und RCA

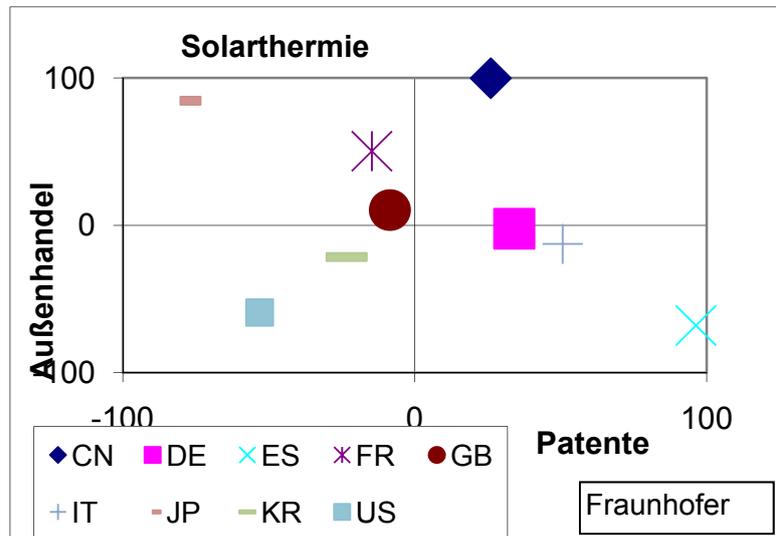


Abbildung A-14: Patent- und Welthandelsanteil bei Wasserkraft-Technologien im Jahr 2007

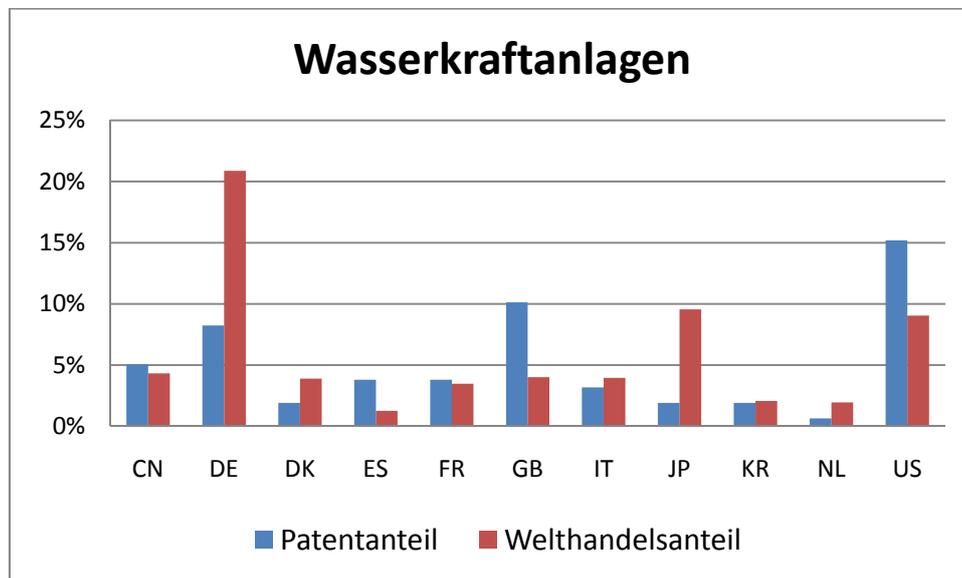


Abbildung A-15: Entwicklung des Patentanteils bei Wasserkraft-Technologien für ausgewählte Länder

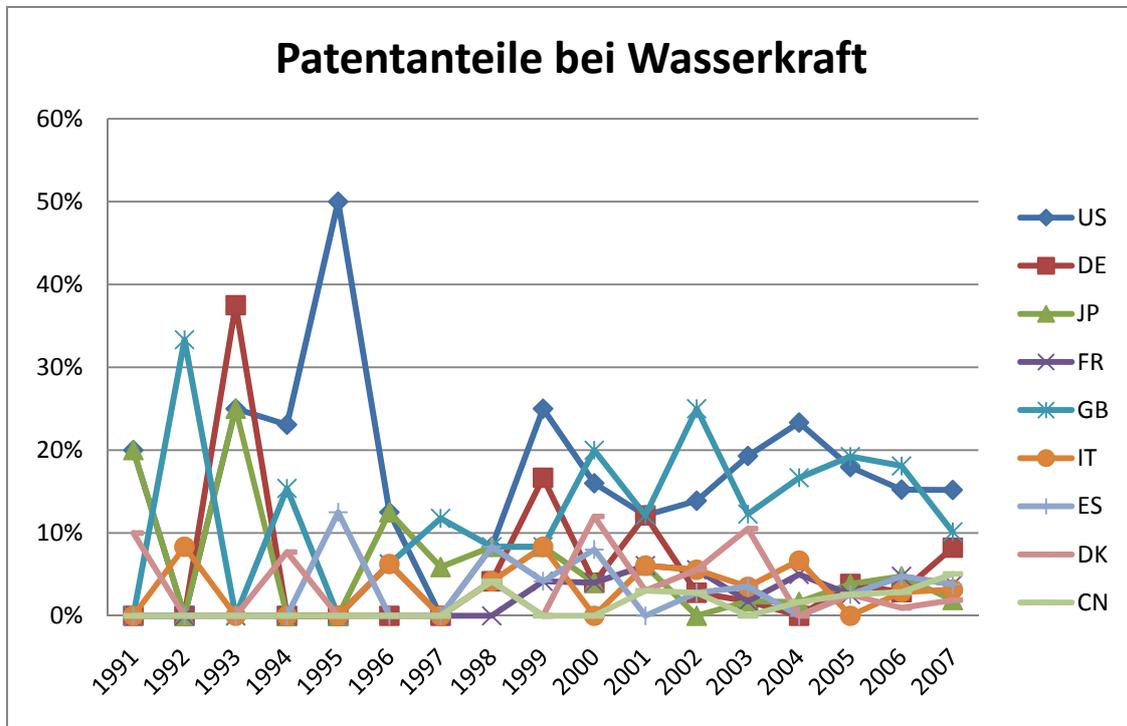


Abbildung A-16: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Wasserkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA

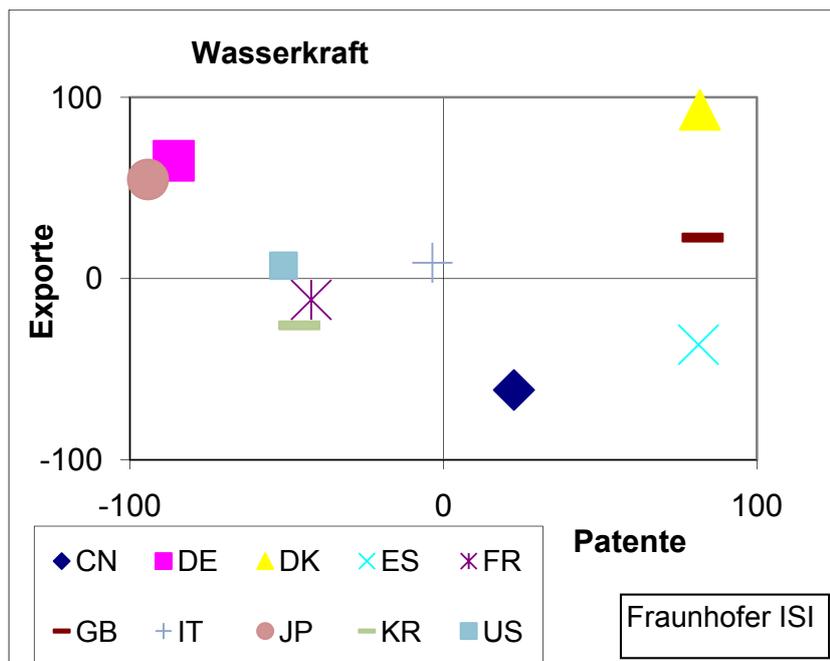


Abbildung A-17: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Wasserkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA

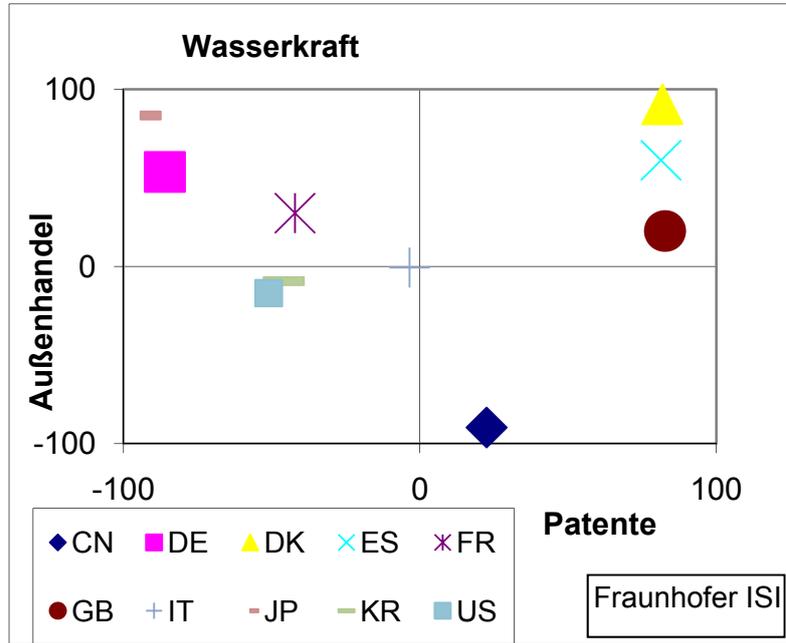


Abbildung A-18: Patent- und Welthandelsanteil bei Windkraft-Technologien im Jahr 2007

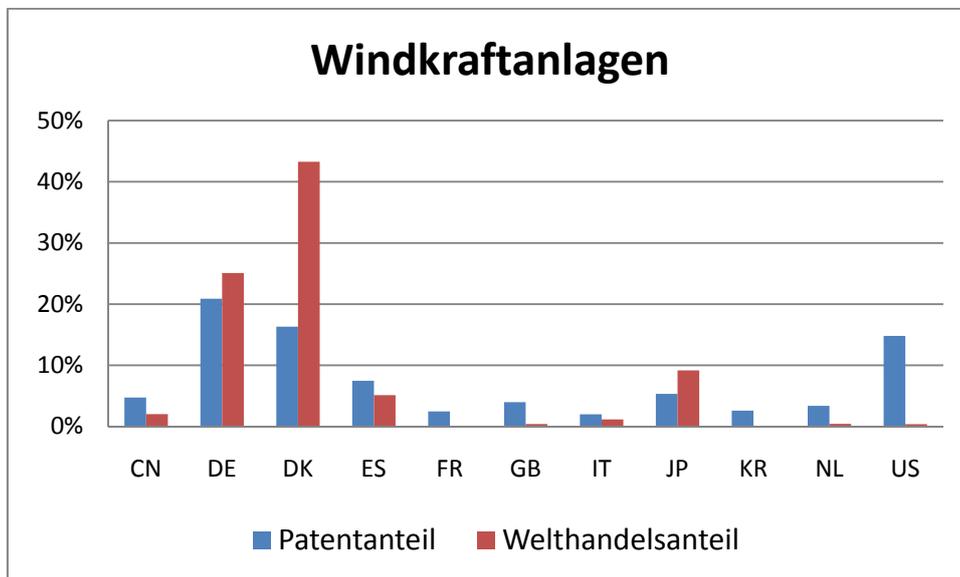


Abbildung A-19: Entwicklung des Patentanteils bei Windkraft-Technologien für ausgewählte Länder

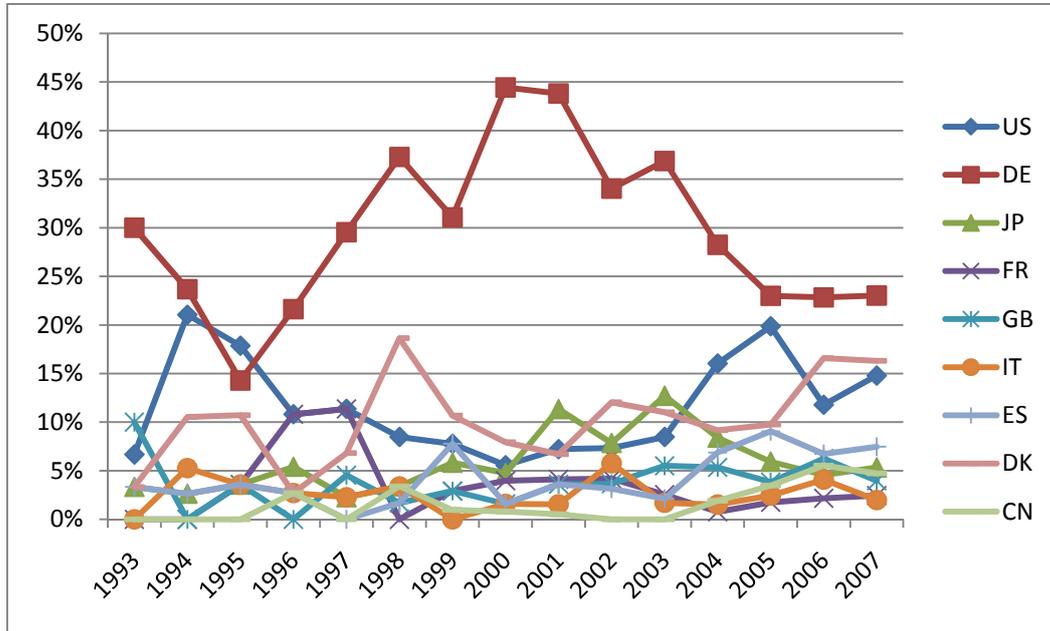


Abbildung A-20: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Windkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RWA

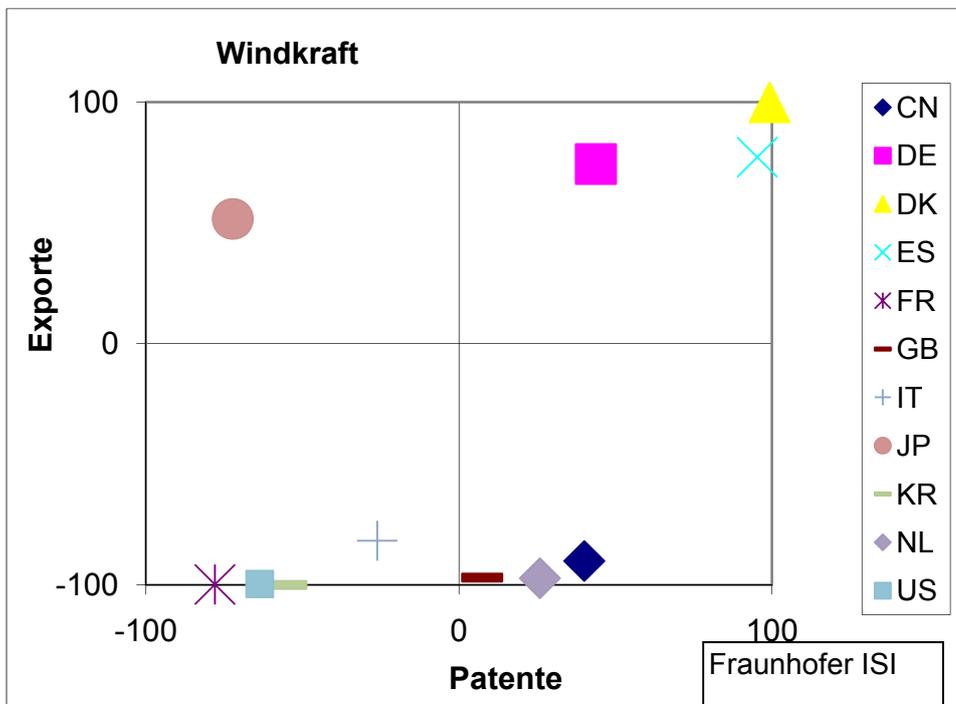


Abbildung A-21: Spezialisierung ausgewählter Länder bei Windkraft-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA

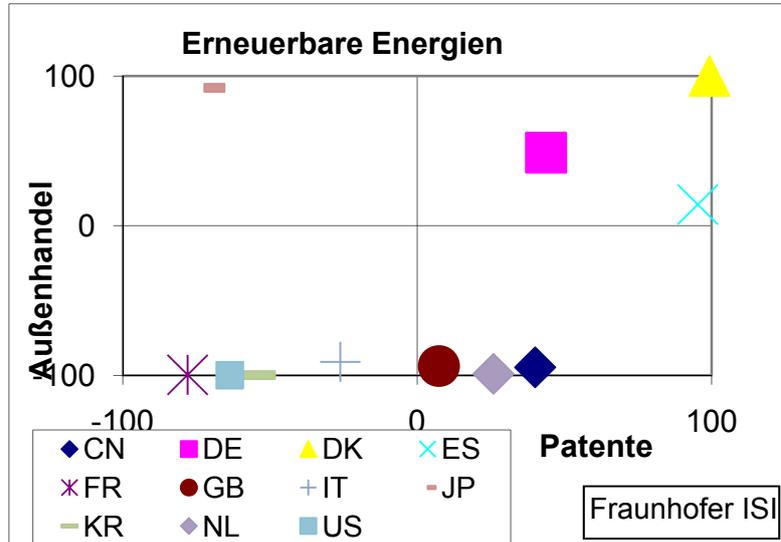


Abbildung A-22: Anteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien

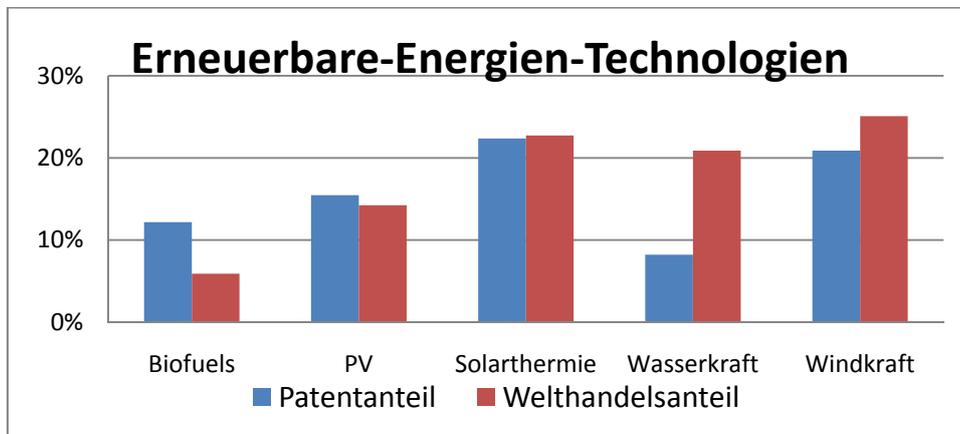


Abbildung A-23: Entwicklung der Patentanteile von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbaren Energie-Technologien

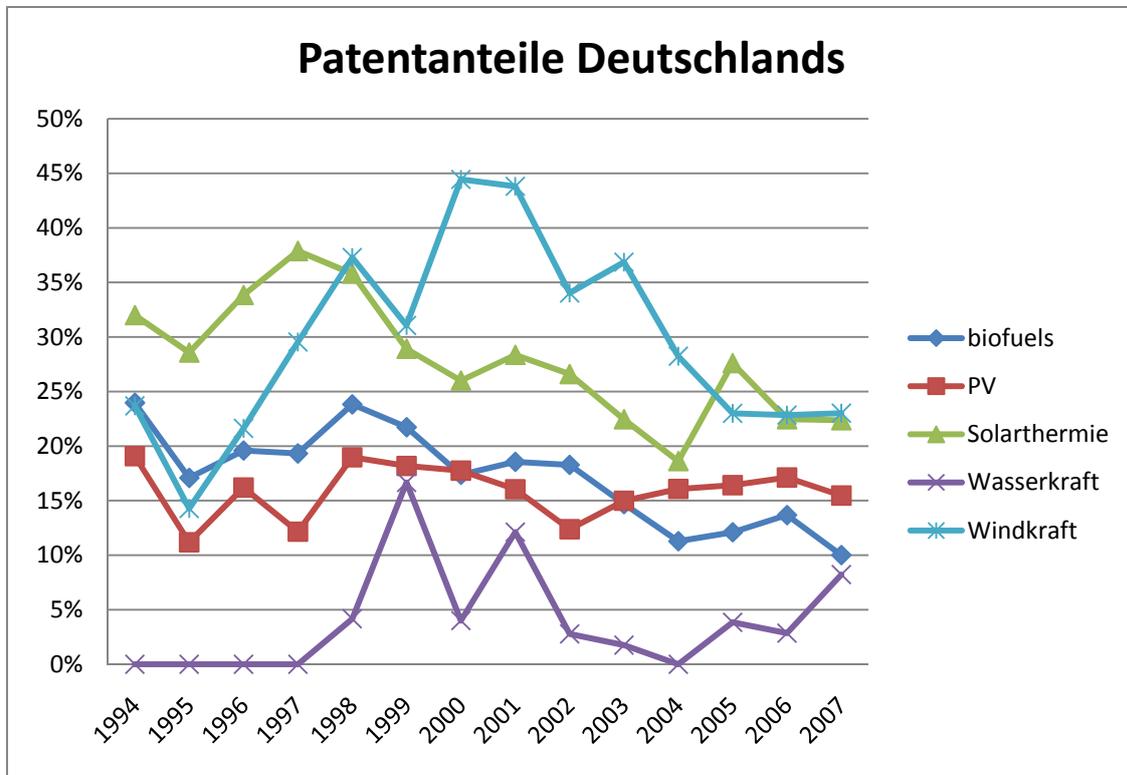
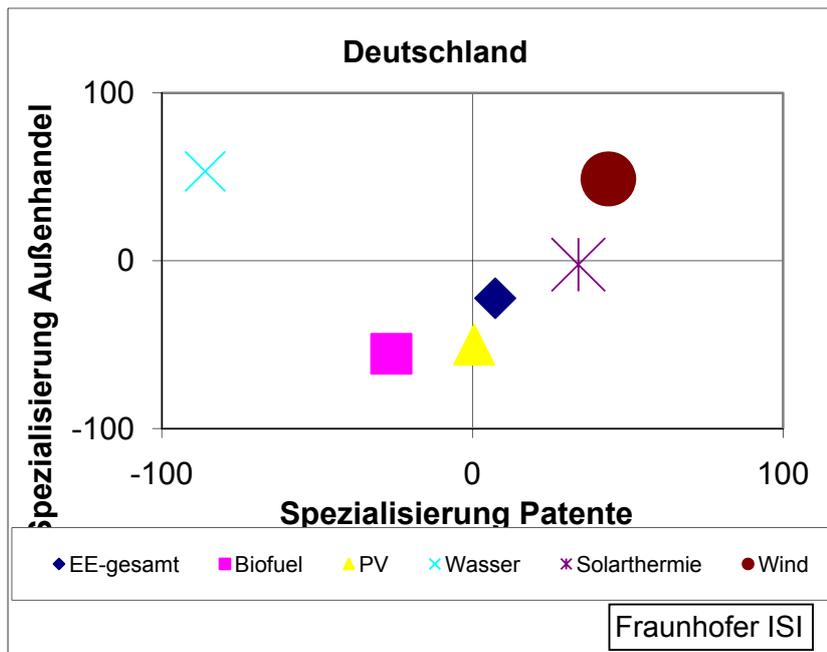


Abbildung A-24: Spezialisierung von Deutschland bei den einzelnen Erneuerbar-Energien-Technologien mit Hilfe des RPA und RCA



## A.1.2 Anhang 2: Tabellen zu den Ergebnissen von Lernraten

Tabelle A-1: Lernraten von Biomasse Technologien

Technology	Region/ country	Time pe- riod	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indicator	Experi- ence indicator	Reference/ data source
<b>biomass power plant</b>	World	up to 2030 (assumption, 80% of his- torical LR)	5	n.a.	capital cost (full cost) [US\$/W]	cum. cap. [MW]	Vattenfall (2007), p. 33f
<b>biomass integrated gasification/ combined cycle</b>	World	up to 2020 (assump- tion)	7/ 9 **	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	Uyterlinde et al. (2007), p. 4080
<b>solid bio- mass fuelled CHP</b>	Sweden	1990-2002	3-25	0.02 -	inv. cost	cum. inst. cap. [MW]	Junginger (2005), p. 139 and Junginger et al. (2006), p. 4039
			8-9	0.85 -	cost of elec- tricity		
<b>biomass/ biogas</b>	World	up to 2020 (assump- tion)	12.5 (until 2010) 10 (after 2010)	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [MW]	Ragwitz et al. (2007), p. 74. and Ragwitz et al. (2006), p. 33. (Green-X)
<b>biogas plants</b>	Denmark	1984-2002	12	0.69	inv. cost	cum. inst. cap. [MW]	Junginger (2005), p. 139 and Junginger et al. (2006), p. 4039
			0-15	0.97	biogas cost		
<b>electricity from bio- mass</b>	EU	1980-1995	15	n.a.	sp. cost [ECU/kWh]	cum. prod. [TWh]	IEA & OECD (2000), p. 21

n.a. = not available; sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity;  
inst. = installed; prod. = production; CHP = combined heat and power

biomass integrated gasification/combined cycle: biomass gasification with combustion of the biogas in a gas turbine and the recovery of waste heat in a boiler.

\* R<sup>2</sup> is a measure of the quality of the mathematical fit of the experience curve to the data. It should therefore, be interpreted carefully. For example if one had only two data points, R<sup>2</sup> would be 1. In the case of the experience curve, R<sup>2</sup> is a measure for the correlation of a straight line fit to the logarithms of the data. As linear regression minimizes the sum of error squares, this means that relative rather than absolute errors are minimized (cf. McDonald & Schrattenholzer (2001), p. 257).

Tabelle A-2: Lernraten von Geothermie- Technologien

Technology	Region/ country	Time pe- riod	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indica- tor	Experience indicator	Reference/ data source
geothermal power plants	World	up to 2020 (assump- tion)	8	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [MW]	Ragwitz et al. (2007), p. 74. and Ragwitz et al. (2006), p. 33 (Green-X)
	World	up to 2030 (assump- tion, 80% of historical LR)	11	n.a.	capital cost (full cost) [US\$/W]	cum. cap. [MW]	Vattenfall (2007), p. 33f
	n.a.	n.a.	5	n.a.	sp. cost	cum. cap. [MW]	Gumerman & Marnay (2004), p. 9f
n.a. = not available; sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity							

Tabelle A-3: Lernraten von Wasserkraft-Technologien

Technology	Region/ country	Time pe- riod	Learning rate [%]	R <sup>2</sup> *	Cost indi- cator	Experience indicator	Reference/ data source
Hydro- power plants	OECD	1975-1993	1.4	0.89	sp. inv. cost [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Kouvaritakis et al. (2000) (zitiert nach McDonald & Schrat- tenholzer (2001), p. 257)
Large hy- dro	n.a.	1980-2001	2.9	n.a.	Unit cost of cap. [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Jamasb (2006), pp. 10, 17
Small hy- dro	World	up to 2030 (assumption, 80% of historical LR)	5	n.a.	capital cost (full cost) [US\$/W]	cum. cap. [MW]	Vattenfall (2007), p. 33f
	n.a.	1988-2001	2.8	n.a.	Unit cost of cap. [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Jamasb (2007), pp. 10, 17
sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity; acc. = according *							

Tabelle A-4: Lernraten von Gezeiten-Technologien

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indi- cator	Experience indicator	Reference/ data source
<b>tidal stream energy</b>	n.a.	n.a.	5-10	n.a.	cost of energy [UKp/kWh]	cum. inst. cap.	The Carbon Trust (2006), p. 2, 19f.
<b>wave energy</b>	n.a.	n.a.	10-15	n.a.	cost of energy [UKp/kWh]	cum. inst. cap.	The Carbon Trust (2006), p. 2, 19f.
<b>wave power plant</b>	n.a.	n.a.	18	n.a.	cost of electricity [USct/kWh]	inst. cap. [MW]	Siddiqui & Bedard (2005), p. 2009
<b>Oscillating Wa- ter Column Wave Energy Converter</b>	n.a.	n.a.	13	n.a.	cost of energy [UKp/kWh]	cum. inst. cap.	The Carbon Trust (2006), p. 132
n.a. = not available; cum. = cumulative; inst. = installed; cap. = capacity; acc. = according							

Tabelle A-5: Lernraten von PV-Technologien

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indi- cator	Experience indicator	Reference/ data source
PV mod- ules	world	1979-2005	20	n.a.	sp. price [\$/W]	cum. cap. [MW]	Swanson (2004), p. 444.
		1976-2001	20	0.99	sp. price [€/W <sub>p</sub> ]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Schaeffer (ed.) (2004), p. 19 (SU data)
		1987-2001	23	0.93			
		1988-2001	26	n.a.	sp. price [€/W <sub>p</sub> ]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Schaeffer (ed.) (2004), p.20
		1989-2002	19.5	n.a.	sp. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. prod. [MW]	Poponi (2003), p. 333
		1976-2002	25				
		1981-2000	23	0.99	sp. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. prod. [MW]	Parente, Goldemberg & Zilles (2002), p. 572
		1968-1998	20	0.99	sp. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. cap. [MW]	Harmon (2000), pp. 9f. McDonald & Schratten- holzer (2001), p. 257)
	1976-1992	18	n.a.	sp. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. sales [MW]	IEA & OECD (2000), pp. 11f	
	USA	1979-2002	23	0.983	module price [\$/W]	cum. ship- ments [MW]	data by Sweeney & Weyant (2006), p. 28
USA	1959-1974	22	0.94	sp. inv. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. cap. [MW]	Maycock & Wakefield (1975), zitiert nach McDonald & Schratten- holzer (2001), p. 257)	
EU	up to 2050 (assumption)	18	n.a.	sp. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	de Feber et al. (2003), p. 22	
crystalline silicone PV modules	EU	1976-1996	16	n.a.	sp. price [\$/W <sub>p</sub> ]	cum. prod. [MW]	IEA & OECD (2000), pp. 38f
		1987-1996 (stability phase)	21				
PV power plant	world	n.a.	28	n.a.	n.a.	n.a.	MESSAGE (global mo- del),zitiert nach Rout (2007), p. 57
	world	n.a.	15	n.a.	n.a.	n.a.	ERIS (global model), acc. to Rout (2007), p. 57
	world	up to 2050 (assumption)	19	n.a.	investment cost [\$/kW]	cum. inst. cap.	MARKAL model, Rafaj & Kypreos (2007), p. 831
	World	up to 2030 (assumption, 80% of histori- cal LR)	18	n.a.	capital cost (full cost) [US\$/W]	cum. cap. [MW]	Vattenfall (2007), p. 33f

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indi- cator	Experience indicator	Reference/ data source
<b>PV inv.</b>	world	up to 2020 (assumption)	23/20 **	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	Uyterlinde et al. (2007), p. 4080
		up to 2010 (assumption)	20	n.a.		cum. cap. [MW]	Ragwitz et al. (2007), p. 74. and Ragwitz et al. (2006), p.33 (Green-X)
		2010-2020 (assumption)	12				
<b>PV system</b>	world	up to 2020 (assumption)	16/20/20**	n.a.	sp. price [€/Wp]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Krewitt et al. (2005), p. 51.
		2020-2030 (assumption)	12/15/20**				
		2030-2040 (assumption)	8/10/20**				
		2030-2050 (assumption)	4/5/20**				
	world	up to 2050 (assumption)	15/18/20**	n.a.	sp. inv. cost [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Gielen et al. (2004), p. 8
<b>PV elec- tricity</b>	EU	1985-1995	35	n.a.	sp. cost [ECU/kWh]	cum. prod. [TWh]	IEA & OECD (2000), p. 21
<b>BOS</b>	Europe	1992-2001	21	0.78	sp. price [€/Wp]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Schaeffer (ed.) (2004), p. 21
	Germany		18 ± 3 (un- weighted curve)	0.81	sp. cost [€/Wp]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Schaeffer (ed.) (2004), p. 15
			22 ± 1 (weighted curve)	0.88			
	Netherlands		19	0.93	sp. price [€/Wp]	cum. cap. [MW <sub>p</sub> ]	Schaeffer (ed.) (2004), p. 20
<p>n.a. = not available; sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity; prod. = production; acc. = according; SU = Strategies Unlimited; BOS = Balance of System</p> <p>** Depending on the chosen scenario.</p>							

Tabelle A-6: Lernraten von Solarthermie-Technologien

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indi- cator	Experience indicator	Reference/ data source
<b>Power plant inv.</b>	world	up to 2010 (assumption)	18	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [MW]	Ragwitz et al. (2007), p. 74. and Ragwitz et al. (2006), p.33 (Green-X)
		2010-2020 (assumption)	12				
<b>Solar ther- mal power</b>	n.a.	1985-2001	22.5	n.a.	unit cost of cap. [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Jamasb (2007), pp. 10, 17)

n.a. = not available; sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity

Tabelle A-7: Lernraten von Windkraft-Technologien

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indica- tor	Experience indicator	Reference/ data source	
	Denmark	1981-2000	9	0.94	sp. price [€/kW]	sp. price [€/kW]	Neij et al. (2003), pp. 28f	
	Germany	1987-2000	6	0.88				
	Danish manufacturers	1981-2000	8	0.84	sp. price [€/kW]	cum. prod. [MW]	Neij et al. (2003), p. 23	
	German manufacturers	1987-2000	6	0.74				
	Germany	1990-1998	8	0.95	sp. price [DM/kW]	cum. cap. [MW]	Durstewitz & Hoppe- Kilpper (2000), p. 133	
	Denmark	1982-1997	8	n.a.	sp. price [\$/kW]	cum. sales [MW]	Neij (1999), p. 380	
	Denmark (WTs produced by major manufacturers)		6					
	EU	up to 2050 (assumption)	10	n.a.	sp. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	de Feber et al. (2003), p. 22	
Wind tur- bines + total installation	Denmark	1981-2000	10	0.92	sp. inv. price [€/kW]	cum. cap. [MW]	Neij et al. (2003), pp. 29f	
	Spain	1984-2000	9	0.85			Neij et al. (2003), p. 30	
	Sweden	all	1994- 2000	4			0.32	Neij et al. (2003), pp. 30f
		>55kW	1995- 2000	12			0.54	Neij et al. (2003), p. 127
Wind tur- bine inv.	world	up to 2050 (assumption)	10	n.a.	inv. cost [\$/kW]	cum. inst. cap.	MARKAL model, nach Rafaj & Kypreos (2007), p. 831	
Wind power plants	Germany	1991-2005	5	n.a.	sp. plant price [€/kW]	cum. cap. [MW]	ISET (2006), p. 88	
	world	n.a.	15	n.a.	n.a.	n.a.	MESSAGE model, Rout (2007), p. 57	
			12				ERIS model, Rout (2007), p. 57	
	World	up to 2030 (assumption, 80% of historical LR)	11	n.a.	capital cost (full cost) [US\$/W]	cum. cap. [MW]	Vattenfall (2007), p. 33f	
	world	up to 2050 (assumption)	5/7/10**	n.a.	sp. inv. cost [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Gielen, D. et al. (2004), p. 8	
OECD	1981-1995	17	0.94	sp. inv. cost [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Kouvaritakis et al. (2000), zitiert nach McDonald & Schrat- tenholzer (2001), p. 257)		

Fortsetzung Tabelle A-7

Tabelle A-7: Lernraten von Windkraft-Technologien

Technology	Region/ country	Time period	Learning rate [%]	R <sup>2</sup>	Cost indica- tor	Experience indicator	Reference/ data source
Wind farm	Spain (price data); world (cum. cap.)	1990-2001	15/ 20	0.887/ 0.907	turnkey inv. cost [€/kW]	global cum. cap. [MW]	Junginger (2005), p. 65ff (different LR depend- ing on GDP-deflator)
	UK (price data); world (cum. cap.)	1992-2001	19/ 21	0.978/ 0.980			
Wind on- shore	World	up to 2020 (assumption)	5/ 9 **	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	Uyterlinde et al. (2007), p. 4080
		1980-1998	15.7	n.a.	sp. cost of cap. [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Jamasb (2006), pp. 10, 17)
Wind turbine offshore	World	up to 2020 (assumption)	5/ 9 **	n.a.	sp. inv. cost [€/kW]	cum. cap. [GW]	Uyterlinde et al. (2007), p. 4080
Wind offshore		1994-2001	8.3	n.a.	sp. cost of cap. [\$/kW]	cum. cap. [MW]	Jamasb (2006), pp. 10, 17)
Wind elec- tricity	Germany	1991-2005	10	n.a.	sp. plant price per reference yield [€/kWh]	cum. cap. [MW]	ISSET (2006), p. 89
	Danish manufacturers	1981-2000	14	0.97	sp. prod. cost [€/kWh]	cum. prod. [MW]	Neij et al. (2003), p. 26
	German manufacturers	1991-2000	12	0.87			
	Danish manufacturers	1981-2000	17	0.97	levelised production cost [€/kWh]	cum. prod. [MW]	Neij et al. (2003), p. 27
	USA	1985-1994	32	n.a.	sp. cost [\$ct/kWh]	cum. prod. [TWh]	IEA & OECD (2000), p. 43
	EU	1980-1995	18	n.a.	sp. prod. cost [ECU/kWh]	cum. prod. [TWh]	IEA & OECD (2000), p. 54
	California	1980-1994	18	0.85	sp. inv. cost [\$/kWh]	cum. prod. [TWh]	CEC (1997); Loiter & Norberg-Bohm (1999) uzitiert nach McDonald & Schrat- tenholzer (2001), p. 257)

n.a. = not available; sp. = specific; inv. = investment; cum. = cumulative; cap. = capacity; prod. = production; acc. = according  
 \*\* Depending on the chosen scenario.

## 6 Literaturverzeichnis

- Acs, Z.; Audretsch, D.B. (1987): Innovation, Market Structure and Firm Size, in: Review of Economics and Statistics Vol. 69(4), S. 567-547.
- Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials (2010): Critical Raw Materials for the EU, EU Commission, DG Enterprise, Brussels.
- Agterbosch, S. et al. (2004): Implementation of wind energy in the Netherlands: the importance of the social and institutional setting, in: Energy Policy Vol. 32, S. 2049-2066.
- Ajzen I. (1988): Attitudes, personality, and behavior, Chicago: Dorsey Press.
- Ajzen I. (1991): The theory of planned behavior, in: Organizational Behavior and Human Decision Process Vol. 50, S. 179-211.
- Alkemade, F. et al. (2007): Analysing emerging innovation systems: a functions approach to foresight, in: International Journal Foresight and Innovation Policy, Vol. 3, Nr. 2, S. 139-168.
- Amable, B.; Verspagen, B. (1995): The role of technology in market shares dynamics, in: Applied Economics, Vol. 27, S. 197-204.
- Andersson, M.; Ejermo, O. (2008): TECHNOLOGY SPECIALIZATION AND THE MAGNITUDE AND QUALITY OF EXPORTS, in: Economics of Innovation and New Technology, Vol. 17, S. 355-375.
- Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, ISI-Buchreihe beim IRB Verlag, Stuttgart, 2. Auflage.
- Archibugi, D.; Pietrobelli, C. (2004): The globalisation of technology and its implications for developing countries – Windows of opportunity or further burden? In: Technological Forecasting and Social Change, Vol. 70, S. 861-883.
- Arimura, T. et al. (2007): An empirical study of environmental R&D: What encourages facilities to be environmentally innovative? In: Johnstone, N. (ed.): Environmental policy and corporate behaviour. Cheltenham, S. 142-173.
- Arrow, K. (1962): Economic welfare and the allocation of resources for invention, in: National Bureau of Economic Research (ed., 1962): The rate and direction of inventive activity: Economic and social factors, Cambridge/ Mass., S. 609-626.

- Arthur, W.B. (1988): *Competing technologies: An overview - Technical change and economic theory*, Dosi, G.; Freeman, Ch.; Nelson, R. et al. (Hrsg.), London: Printer Publishers, S. 590-607.
- Asheim, B.; Gertler, M.S. (2005): *The Geography of Innovation: Regional Innovation Systems*, in: Fagerberg, J. et al. (eds): *The Oxford Handbook of Innovation*, Oxford University Press, Oxford, S. 291-317.
- Aznar, C.; Dowlatabadi, H. (1999): *A Review of the Treatment of Technical Change in Energy Economics Models*. In: *Annual Review Energy Environment*, Vol. 24, S. 513-544.
- Barney, J.B. (1991): *Firm Resources and Sustained Competitive Advantage*, in: *Journal of Management* 17(1), S. 99-120.
- Bassini und Ernst (2002): *Labour Market Institutions, Product Market Regulation, and Innovation: Cross Country Evidence*, OECD, Paris.
- Baylis, R.; L. Connell; et al. (1998): *Company Size, Environmental Regulation and Ecological Modernization - Further Analysis at the Level of the Firm*, in: *Business Strategy and the Environment* 7(5), S. 285-296.
- Beise, M. (2004): *Lead markets: country specific drivers of the global diffusion of innovations*, in: *Research Policy*, Vol. 33, S. 997-1028.
- Beise, M.; Cleff, T. (2004b): *Assessing the Lead Market Potential of Countries for Innovations Projects*, *Journal of International Management* 10 (4), 453-477.
- Beise, M.; Rennings, K. (2005): *Lead markets and regulation: a framework for analyzing the international diffusion of environmental innovations*. In: *Ecological Economics*, Vol. 52 (1), S. 5-17.
- Belz, F. (2001): *Integratives Öko-Marketing - Erfolgreiche Vermarktung ökologischer Produkte und Leistungen*. Wiesbaden, DUV.
- Bergek, A.; Jacobsson, S.; Carlsson, B.; Lindmark, S.; Rickne A. (2008c): *Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis*, in: *Research Policy* 37, S. 407-429.
- Bergek, A.; Hekkert, M.; Jacobsson, S. (2008): *Functions in innovation systems: a framework for analysing energy system dynamics and identifying system building activities by entrepreneurs and policy makers*, in: Foxon, T.; Köhler, J.; Oughton, C. (eds): *Innovations in Low-Carbon Economy*, Edward Elgar, 2008, S. 79-111.

- Bergek, A.; Hekkert, M.; Jacobsson, S. (2008b): Functions in innovation systems: a framework for analysing energy system dynamics and identifying system building activities by entrepreneurs and policy makers, in: Foxon, T.; Köhler, J.; Oughton, C. (eds): *Innovations in Low-Carbon Economy*, Edward Elgar, 2008, S. 79-111.
- Bergek, A.; Jacobsson, S. (2003): The emergence of a growth industry: a comparative analysis of the German, Dutch and Swedish wind turbine industries. In: S. Metcalf and U. Cantner (eds): *Change, Transformation and Development*, Physica-Verlag, Heidelberg, S. 197-227.
- Bergek, A.; Jacobsson, S.; Sandén, B. (2008a): 'Legitimation' and 'development of positive external economies': Two key processes in the formation phase of technological innovation systems, in: *Technology Analysis and Strategic Management*, 20 (5) S. 575-592.
- Berglund, C. & Söderholm, P. (2006): Modeling technical change in energy system analysis: analyzing the introduction of learning-by-doing in bottom-up energy models. In: *Energy Policy*, Vol. 34, 1344-1356.
- Berkhout, F. (2005): Technological Regimes, environmental performance and innovation systems: Tracing the links, in: Weber, M.; Hemmelskamp, J. (Hrsg.): *Towards Environmental Innovation Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer, S. 57-80.
- Bernauer, T.; Hoffmann, V.; Kammerer, C. (2005): *Determinants of Environmental Product Innovation - A comparative study on manufacturers of electrical and electronic appliances in Germany and California (CIS internal working paper)*, Zürich: Center for Comparative and International Studies (CIS), ETH Zürich.
- Betz, R.A. (2003): *Emissionshandel zur Bekämpfung des Treibhauseffektes - Der Einfluss der Ausgestaltung auf die Transaktionskosten am Beispiel Deutschland*, ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Diss. Speyer, Univ., 2003 (zugl.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bird, L. et al. (2005): Policies and market factors driving wind power development in the United States, in: *Energy Policy*, Vol. 33, S. 1397-1407.
- Blazejczak, J. et al. (1999): *Umweltpolitik und Innovation: Politikmuster und Innovationswirkungen im internationalen Vergleich*, in: *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht*, Vol. 22, 1999, S. 1-32.

- Blind, K. (2001): The impacts of innovations and standards on trade of measurement and testing products: empirical results of Switzerland's bilateral trade flows with Germany, France and the UK, in: *Information Economics and Policy* 13 (2001) 439-460.
- Blind, K.; Bührlen, B.; Menrad, K.; Hafner, S.; Walz, R.; Kotz, Ch. (2004): *New Products and Services - Analysis of Regulations Shaping New Markets. Final Report*, Luxembourg: Office for Official Publications of the EU.
- Blind, K.; Frietsch, R. (2005): *Integration verschiedener Technologieindikatoren. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 21-2005*, BMBF, Berlin.
- Blümle, G. (1994): The Importance of Environmental Policy for International Competitiveness, in: Matsugi, T; Oberhauser, A. (Hrsg.): *Interactions Between Economy and Ecology*, Berlin, S. 35-57.
- Bossel, H. (2004): *Systeme. Dynamik. Simulation*. Norderstedt 2005.
- Bradford, D.; A. Gouldson; et al. (2000): *The Impact of Eco-Audit Regulation on Innovation in Europe*. IPTS Report EUR 19722 EN. Sevilla, The European Commission DG JRC.
- Branstetter, L.G. (2001): Are knowledge spillovers international or intranational in scope? Microeconomic evidence from the U.S. and Japan, in: *Journal of International Economics* 53 (2001) 53-79.
- Brunnermeier, S.; Cohen, M. (2003): Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries, in: *Journal of Environmental Economics and Management* 45, S. 278-293.
- Bürer, M.J.; Wüstenhagen, R. (2008): Which renewable energy policy is a venture capitalist's best friend? Empirical evidence from a survey of international cleantech investors, in: *Energy Policy* 37, S. 4997-5006.
- Cansier, D. (1993): *Umweltökonomie*, Stuttgart 1993.
- Cantwell, J. (2005): Innovation and Competitiveness, in: Fagerberg, J. et al. (eds): *The Oxford Handbook of Innovation*, Oxford University Press, Oxford, S. 543-567.
- Carlsson, B.; Jacobsson, S.; Holmen, M.; Rickne, A. (2002): Innovation systems: analytical and methodological issues. In: *Research Policy* Vol. 31, S. 233-245.

- Carlsson, B.; Stankiewicz, R. (1995): On the nature, function and composition of technological systems: In: B. Carlsson (ed.) *Technological Systems and Economic Performance: The Case of Factory Automation*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Cleff, T.; Rennings, K. (1999): Determinants of Environmental Product and Process Innovation, in: *European Environment* 9(5), S. 191-201.
- Coe, D.; Helpman, E. (1995): International R&D Spillovers, in: *European Economic Review* 39(5), S. 859-87.
- Coglianesi, C.; Nash J. (2001): *Regulating From the Inside - Can Environmental Management Systems Achieve Policy Goals?* Washington D.C, Resources for the Future.
- Commission of the European Communities (2007): *Limiting global climate change to 2 degrees Celsius: The way ahead for 2020 and beyond*. Communication from the Commission, Brüssel, 2007.
- Conlisk, J. (1996): Why bounded Rationality? In: *Journal of Economic Literature*, Vol. 34, 1996, S. 669-700.
- Convey et al. (2005): *Product Market Regulation in OECD Countries: 1998 to 2003*, OECD, Paris.
- de Feber, M.A.P.C., Schaeffer, G.J., Seebregts, A.J. & Smekens, K.E.L. (2003): *Enhancements of endogenous technology learning in the western European MARKAL model: Contributions to the EU SAPIENT project*, ECN, Petten.
- Dosi, G. (1982): Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. In: *Research Policy*, Vol. 11, 1982, S. 147-162.
- Dosi, G.; Freeman, C.; Nelson, R.; Silverberg, G.; Soete, L. (1988): *Technical Change and Economic Theory*, London: Printer Publishers.
- Dosi, G.; Pavitt, K.; Soete, L. (1990): *The Economics of Technical Change and International Trade*, New York.
- Dosi, G.; Soete, L. (1988): Technical change and international trade, in: Dosi, G. et al. (eds): *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, London.

- Durstewitz, M. & Hoppe-Kilpper, M. (2000): Wind Energy Experience Curve from the German "250 MW Wind"-Programme. In Wene, C.-O., Voss, A. & Fried, T. (eds): Experience Curves for Policy Making - The Case of Energy Technologies. Proceedings of the IEA International Workshop at Stuttgart, Germany, 10 - 11 May 1999, S. 129-134.
- Dyllick, T.; Hamschmidt, J. (1999): Wirkungen von Umweltmanagementsystemen. Eine Bestandsaufnahme empirischer Studien. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, Vol. 22, 1999, S. 507-540.
- Dyllick, T.; Hamschmidt, J. (2000): Wirksamkeit und Leistung von Umweltmanagementsystemen - Eine Untersuchung von ISO 14001-zertifizierten Unternehmen in der Schweiz. Zürich, Vdf.
- Eaton, J.; Kortum, S. (1996): Trade in Ideas, Patenting, and Productivity in the OECD. Journal of International Economics 40(3-4), S. 51-78.
- Edler, J. et al. (2006): Nachfrageorientierte Innovationspolitik, Politikbenchmarking Report im Rahmen des TAB für den Deutschen Bundestag, Karlsruhe.
- Edquist, C. (2005): Systems of innovation: Perspectives and challenges, in: Fagerberg, J. et al. (eds): The Oxford Handbook of Innovation, Oxford University Press, Oxford, S. 181-208.
- Edquist, C.; McKelvey, M. (Hrsg.) (1997): Systems of innovation - Technologies, institutions and organizations, London and Washington: Pinter.
- Eggertsson, Th. (1990): Economic behaviour and institutions, Cambridge Surveys of Economic Literature, Cambridge: Cambridge University Press.
- Ekins, P.; Speck, S. (1998): The impacts of environmental policy on competitiveness: theory and evidence, in: Barker, T.; Köhler, J. (Hrsg.): International Competitiveness and Environmental Policy, Edward Elgar, Cheltenham, S. 33-70.
- Fagerberg, J. (1994): Technology and International Differences in Growth Rates, in: Journal of Economic Literature, Vol. XXXII (Sept. 1994), S. 1147-1175.
- Fagerberg, J. (1995a): Technology and Competitiveness, in: Oxford Review of Economic Policy, Vol. 12, No.3, S. 39-51.
- Fagerberg, J. (1995b): User-producer interaction, learning, and competitive advantage, in: Cambridge Journal of Economics, Vol. 19, S. 243-256.

- Fagerberg, J.; Godinho, M.M. (2005): Innovation and Catching-up, in: Fagerberg, J. et al. (eds): The Oxford Handbook of Innovation, Oxford University Press, Oxford, S. 514-542.
- Fagerberg, J. (1988): International Competitiveness. The Economic Journal, 98 (June): 355-374.
- Fees, Eberhard (1997): Mikroökonomie - Eine spieltheoretisch- und anwendungsorientierte Einführung. Marburg: Metropolis-Verlag.
- Folz, A. (2008): Modelling and dynamic simulation of the effects of technological learning on the development of renewable energies in the electricity sector in the EU up to 2050, Master thesis, Fraunhofer ISI, Karlsruhe/Kassel, January 2008.
- Fowle, M. (2007): emissions trading, electricity restructuring, and investment in pollution abatement. Working paper, University of Michigan.
- Foxon, T.J. et al. (2005): UK innovation systems for new and renewable energy systems: drivers, barriers and system failures, in: Energy Policy, Vol. 33, S. 2123-2137.
- Freeman, C., Soete, L. (2009): Developing science and technology indicators: What can we learn from the past? In: Research Policy, Vol. 38, S. 583-589.
- Frietsch, R.; Schmoch, U. (2010): Transnational patents and international markets, in: Scientometrics, S. 82. 185-200.
- Gerybadze, A. et al. (1997): Globales Management von Forschung und Innovation, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart.
- Geschka, H. (1990): Innovationsmanagement. Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe - Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung edited by H.-C. Pfohl. Berlin, Schmidt: 157-178.
- Gielen, D., Unander, F., Mattsen, N., & Sellers, R. (2004): Technology learning in the ETP model. Paper prepared for the 6th IAEE European Conference "Modelling in Energy Economics and Policy", Zürich, 2-3 September 2004.
- Gray, W.B.; Shadbegian, R.J. (1995): Pollution Abatement Costs, Regulation, and Plant-Level Productivity. NBER Working Paper W4994.
- Greenaway, D.; Sousa, N.; Wakelin, K. (2004): Do domestic firms learn to export from multinationals? In: European Journal of Political Economy, Vol. 20, S. 1027-1043.

- Greenhalgh, C.; Mavrotas, G.; Wilson, R. (1996): Intellectual property, technological advantage and trade performance of UK manufacturing industries, in: *Applied Economics* 28, No. 5, S. 509-519.
- Griliches, Z. (1991): *The Search for R&D Spillovers*. Working Paper No. 3768, National Bureau of Economic Research, Cambridge, Mass.
- Grossmann, G.M.; Helpman, E. (1991): Trade, knowledge spillovers, and growth, in: *European Economic Review* 35, (1991) S. 517-526.
- Grubb, M.; Köhler, J.; Anderson, D. (2002): Induced technical change in energy and environmental modeling: Analytic approaches and policy implications, in: *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 27, S. 271-308.
- Grubler, A., Nakicenovic, N., & Victor, D.G. (1999): Dynamics of energy technologies and global change, in: *Energy Policy*, Vol. 27, 247-280.
- Grupp, H. (1997): *Messung und Erklärung des technischen Wandels. Grundzüge einer empirischen Innovationsökonomik.*, Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Grupp, H. (1999): Umweltfreundliche Innovation durch Preissignale oder Regulation? Eine empirische Analyse für Deutschland, in: *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, Jahrgang 1999, Nr. 5/6, S. 611-631.
- Gumerman, E. & Marnay, C. (2004): *Learning and Cost Reductions for Generating Technologies in the National Energy Modeling System (NEMS)*. Berkeley, USA: University of California Berkeley.
- Hamamoto, M. (2006): Environmental regulation and the productivity of Japanese manufacturing industries, in: *Resource and Energy Economics* 28, S. 299-312.
- Harmon, C. (2000): *Experience Curves of Photovoltaic Technology*. Interim Report IR-00-014. Laxenburg, AT: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).
- Hart, S. L. (1995): A Natural-Resource-Based View of the Firm, in: *Academy of Management Review* 20(4), S. 986-1014.
- Hasic, I.; Johnstone, N.; Michel, C. (2008): Environmental policy stringency and technological innovation: Evidence from patent counts. Paper presented at the European Association of Resource and Environmental Economists, Gothenburg, Sweden, June 26, 2008.

- Hekkert, M. et al. (2007): Functions of an innovation system: a new approach for analysing technological change, in: *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 74, S. 413-432.
- Hekkert, M.P. and Negro, S.O. (2009): Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims, in: *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 76 (4), S. 584-594.
- Hemmelskamp, J.; Brockmann K.L. (1997): Environmental Labels - The German 'Blue Angel', in: *Futures* 29(1), S. 67-76.
- Héritier, A. (Hrsg.) (1993): *Policy-Analyse. Kritik und Neuorientierung*, PVS-Sonderheft Nr. 24, Westdeutscher Verlag, Opladen.
- Hicks, J. (1932): *The theory of wages*, Macmillan, London.
- Horbach, J. (2007): Determinants of environmental innovation – New evidence from German panel data sources. In: *Research Policy* 37 (1), S. 163-173.
- Howlett, M.; Ramesh, M. (1995): *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Sub-systems*, Toronto/New York/Oxford.
- IEA & OECD (International Energy Agency & Organisation for Economic Co-Operation and Development) (2000): *Experience Curves for Energy Technology Policy*. Paris: OECD/IEA.
- INFRAS; Fraunhofer ISI (Hrsg.), Iten, R.; Peter, M.; Menegale, S.; Blum, M.; Walz, R.; Ostertag, K. (2004): *Auswirkungen von Umweltschutzmaßnahmen auf BIP, Beschäftigung und Unternehmen - Schlussbericht*, Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) (2006): *Windenergie Report Deutschland 2006: Jahresauswertung des WMEP: Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm (WMEP) zum Breitentest "250 MW Wind"*. Kassel: Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET).
- Jacob, K. u. a. (2005): *Lead Markets for Environmental Innovations*. ZEW Economic Studies, Vol. 27, Heidelberg.
- Jacobsson, S.; Bergek, A.; Finon, D.; Lauber, V. Mitchell, C.; Toke, D.; Verbruggen, A. (2009): EU renewable energy support policy: Faith or facts? In: *Energy Policy* 37, S. 2143-2146.

- Jaffe, A.B.; Newell, R.G.; Stavins, R.N. (2002): Environmental Policy and Technological Change, in: *Environmental and Resource Economics* 22, S. 41-69.
- Jaffe, A.B.; Palmer, K. (1997): Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study, in: *Review of Economics and Statistics*, Vol. 79, 1997, S. 610-619.
- Jaffe, A.B.; Newell, R.G.; Stavins, R. (2003): Technological Change and the Environment, in: Mäler, K.-G.; Vincent, J. R. (eds): *Handbook of Environmental Economics*, Elsevier, Amsterdam, S. 461-516.
- Jamasb, T. (2007): Technical Change Theory and Learning Curves: Patterns of Progress in Energy Technologies, in: *The Energy Journal*, Vol. 28 (3), S. 45-65.
- Jamasb, T.; Köhler, J. (2008): Learning curves for energy technologies: a critical assessment, in: Grubb, M. et al. (eds): *Delivering a low-carbon electricity system. Technologies, Economics, Policy*. Cambridge, S. 314-332.
- Jänicke, M. ( Hrsg.) (1996): *Umweltpolitik der Industrieländer*, edition sigma, Berlin.
- Jänicke, M.; Kunig, P.; Stitzel, M. (1999): *Umweltpolitik*, Dietz, Bonn.
- Jänicke, M.; Weidner, H. (1995): *Successful Environmental Policy. A Critical Evaluation of 24 Cases*, edition sigma, Berlin.
- Johnstone, N. (2001): *The Firm, the Environmental, and Public Policy. Final Report for the OECD Working Party on National Environmental Policy*. Paris, OECD, Environment Directorate.
- Johnstone, N.; Hasic, I.; Popp, D. (2008): Renewable energy policies and technological change: Evidence based on patent counts. NBER Working Paper No. 13760.
- Junginger, M. (2005): *Learning in renewable energy technology development*. Ph.D. thesis.: Utrecht University.
- Junginger, M., de Visser, E., Hjort-Gregersen, K., Koornneef, J., Raven, R., Faaij, A. et al. (2006): Technological learning in bioenergy systems. In: *Energy Policy*, Vol. 34, 4024-4041.
- Kantzenbach, E. (1967): *Die Funktionsfähigkeit des Wettbewerbs*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Keller, W. (1998): Are international R&D spillovers trade related? Analyzing Spillovers among Randomly Matched Trade Partners, in: *European Economic Review* 42, S. 1469-1481.

- Klemmer, P. (Hrsg.) (1999): Innovationen und Umwelt, Analytica Verlag, Berlin.
- Kline, G.J.; Rosenberg, N. (1986): An overview of innovation, in: Landau, R.; Rosenberg, N. (Hrsg.): The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth, Washington, S. 275-306.
- Köhler, J.; Grubb, M.; Popp, D.; Edenhofer, O. (2006): The transition to endogenous technical change in climate-economy models: A technical overview to the innovation modeling comparison project, Energy Journal, Vol. 27, Special Issue on Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation, S. 17-55.
- Krewitt, W., Nast, M. & Nitsch, J. (2005): Energiewirtschaftliche Perspektiven der Fotovoltaik. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR).
- Kuckartz, U. (1998): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. Berlin, Springer.
- Kuehn, I.; Osorio-Peters, S. (1999): Innovationswirkungen freiwilliger Selbstverpflichtungen im Umweltschutz – spieltheoretische Analysen und Fallstudien zum Klimaschutz in Deutschland in den Niederlanden. In: Klemmer, P. (Ed.), Innovationen und Umwelt. Analytica-Verlag, Berlin, S. 329–344.
- Lachenmaier, S.; Wößmann, L. (2006): Does innovation cause exports? Evidence from exogenous innovation impulses and obstacles using German micro data. Oxford Economic Papers 58 (2006), 317-350.
- Legendijk, A. (2001): Scaling knowledge production: how significant is the region? In: Fischer, M.M.; en Fröhling, J., Knowledge, complexity and innovation systems. (Series: Advances in spatial science) Springer-Verlag, Berlin, 79-100.
- Lange, I.; Bellas, A. (2005): Technological change for sulfur dioxide scrubbers under market-based regulation. Land Economics Vol. 81, S. 546-556.
- Langniss, O.; Wiser, R. (2003): The renewables portfolio standard in Texas: an early assessment, in: Energy Policy, Vol. 31, S. 527-535.
- Lanoie, P.; Laurent-Luccetti, J.; Johnston, N.; Ambec, S. (2007): Environmental policy, innovation, and performance: new insights, GAEL working paper 2007-07.
- Lauber, V.; Mez, L. (2004): Three decades of renewable energy politics in Germany, in: Energy&Environment, Vol. 15, No. 4, S. 599-623.

- Levin, R.C.; Cohen, W.M., et al. (1985): R&D Appropriability, Opportunity, and Market Structure - New Evidence on Some Schumpeterian Hypotheses, in: *The American Economic Review* 75(2), S. 20-24.
- Lewis, J; Wiser, R. (2007): Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms, in: *Energy Policy* 35, S. 1844–1857.
- Löschel, A. (2002): Technological change in economic models of environmental policy: a survey, in: *Ecological Economics*, Vol. 43, 2002, S. 105-126.
- Lucas (1988): On the Mechanics of Economic Development, in: *Journal of Monetary Economics* 22, S. 3-42.
- Lundvall, B.Å. (1988): Innovation as an Interactive Process: From User-Producer Interaction to the National Systems of Innovations. In: Dosi et al., *Technical Change and Economic Theory*, London, New York: Pinter Publ.
- Lundvall, B.Å. (1991): Innovation, the Organised Market and the Productivity Slowdown. In: *Technology and Productivity. The Challenge for Economic Policy*, Paris: OECD.
- Lundvall, B.-A. et al. (2002): National Systems of Production, Innovation and Competence Building, in: *Research Policy*, Vol. 31, 2002, S. 213-231.
- Lundvall, B.-A.; Johnson, B. (1994): The Learning Economy, in: *Journal of Industry Studies*, Vol. 1, S. 23-42.
- Lutz, C.; Meyer, B.; Nathani, C.; Schleich, J. (2005): Endogenous technological change and emissions: the case of the German steel industry, in: *Energy Policy* 33, S. 1143-1154.
- Madsen, J.B. (2008): Innovations and manufacturing export performance in the OECD countries, in: *Oxford Economic Papers* 60 (2008), S. 143-167.
- Malerba, F. (2005): Sectoral Systems: How and why innovation differ across sectors, in: Fagerberg, J. et al. (eds): *The Oxford Handbook of Innovation*, Oxford University Press, Oxford, S. 308-406.
- Manne, A.; Richels, R. (1992): *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO<sub>2</sub> Emission Limits*. Cambridge, Mass. MIT Press.

- Maskell, P. (2001): Towards a Knowledge-Based Theory of the Geographical Cluster," *Industrial and Corporate Change*, Oxford University Press, vol. 10(4), pages 921-43, December.
- Maskell, P.; Malmberg, A. (1999): "Localised Learning and Industrial Competitiveness," *Cambridge Journal of Economics*, Oxford University Press, vol. 23(2), S. 167-85.
- Maurseth, P.B.; Verspagen, B. (2002): Knowledge Spillovers in Europe: A Patent Citation Analysis, in: *Scandinavian Journal of Economics* 104 (4), S. 531-545.
- McDonald, A.; Schrattenholzer, L. (2001): Learning rates for energy technologies, in: *Energy Policy*, Vol. 29, 255-261.
- Meffert, H.; Kirchgeorg, M. (1998): *Marktorientiertes Umweltmanagement*. Stuttgart, Schäfer Poeschel.
- Melnyk, S.A.; Sroufe, R.P. et al. (2003): Assessing the Impact of Environmental Management Systems on Corporate and Environmental Performance, in: *Journal of Operations Management* 21(3): S. 329-351.
- Menz, F.C. (2005): Green electricity policies in the United States: case study, in: *Energy Policy* Vol. 33, S. 2398-2410.
- Meyer, N.I. (2004): Development of Danish wind power market, in: *Energy & Environment*, Vol. 15, No. 4, S. 657-673.
- Meyer-Krahmer, F. (2004): Vorreiter-Märkte und Innovation, in: Steinmeier, F.W.; Machnig, M. (Hrsg.): *Made in Deutschland 21'*, Hamburg, S. 95-110.
- Michaelis, P. (1996): *Ökonomische Instrumente der Umweltpolitik*, Physica, Heidelberg.
- Mitchell, C.; Connor, P. (2004): Renewable energy policy in the UK, in: *Energy Policy* Vol. 32, S. 1935-1947.
- Montalvo, C.C. (2001): Explaining and predicting the innovative behaviour of the firm: a cognitive approach. Paper presented at the ECIS conference. The Future of Innovation Studies. Technical University of Eindhoven, September 2001.
- Montalvo, C.C. (2002): *Environmental Policy and Technological Innovation. Why Do Firms Adopt or Reject New Technologies*. Cheltenham, UK and Northampton, MA: Edward Elgar.
- Morrison, P.D.; Roberts, J.H.; Midgley, D.F. (2004): The nature of lead users and measurement of leading edge status, in: *Research Policy*, Vol. 33, S. 351-362.

- Mowery, D.C. and Rosenberg, N. (1978): The Influence of Market Demand upon Innovation: A Critical Review of Some Recent Empirical Studies. *Research Policy*, No. 8.
- Navaretti, G.B.; Tarr, D.G. (2002): International Knowledge Flows and Economic Performance: A Review of the Evidence. *The World Bank Economic Review* 14, No.1, S. 1-15.
- Neij, L. (1999): Cost dynamics of wind power, in: *Energy*, Vol. 24, 375-389.
- Neij, L.; Dannemand Andersen, P.; Durstewitz, M.; Helby, P.; Hoppe-Kilpper, M. & Morthorst, P.E. (2003): *Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment*. Lund, SE.
- Nelson, R. (1995): Recent evolutionary theorizing about economic change, in: *Journal of Economic Literature*, Vol. 33 (1), S. 48-90.
- Nelson, R.; Nelson, K. (2002): Technology, institutions, and innovation systems, in: *Research Policy*, Vol. 31, 2002, S. 265-272.
- Nelson, R.; Winter, S.G. (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Nelson, R.R. (1994): The co-evolution of technology, industrial structure, and supporting institutions, in: *Industrial and Corporate Change*, Vol. 3, Nr. 1, S. 47-63.
- Nemet, G.F. (2006): Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics, in: *Energy Policy*, Vol. 34, S. 3218-3232.
- Newell, R.G.; Jaffe, A.B.; Stavins, R.N. (1999): The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change, in: *Quarterly Journal of Economics* Vol. 114, S. 941-975.
- Nordhaus, W.D. (1994): *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*. Cambridge, Mass. MIT Press.
- Norgaard, R. (1984): Co-evolutionary development potential, in: *Land Economics* 60 (2), S. 160-173.
- OECD, I. (2000): *Experience curves for energy technology policy*, Paris: OECD.
- Ostertag, K. (2003a): Energy plus - Evaluation of the pilot procurement project in Germany - Time to turn down energy demand - eceee 2003 summer study proceedings, ECEEE (European Council for an Energy-Efficient Economy) (Hrsg.), Stockholm: ECEEE, S. 623-629.

- Ostertag, K. (2003b): No-regret potentials in energy conservation - An analysis of their relevance, size and determinants, *Technology, Innovation and Policy*. Series of the Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research. Vol. 15, Heidelberg: Physica.
- Ostertag, K.; Dreher, C. (2002): Cooperative procurement: Market transformation for energy-efficient products - Greening the budget. Budgetary policies for environmental improvement., Clinch, P.; Schlegelmilch, K.; Sprenger, R.-U.; Triebswetter, U. (Hrsg.), Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, S. 314-332.
- Ostmeier, H.; Meffert, H. (1990): *Umweltschutz und Marketing - Möglichkeiten der Verbesserung der betriebswirtschaftlichen Situation von Unternehmen durch umweltorientierte Absatzmaßnahmen*. Berlin, Schmidt.
- Pain, N.; Wakelin, K. (2004): Export Performance and the Role of Foreign Direct Investment, in: *The Manchester School*, Vol. 66, Issue 5, S. 62-88.
- Pan, H.; Köhler, J. (2007): Technological change in energy systems: Learning curves, logistic curves, and input-output coefficients, in: *Ecological Economics* Vol. 63, S. 749-758.
- Parente, V., Goldemberg, J., & Zilles, R. (2002): Comments on Experience Curves for PV Modules, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 10, 571-574.
- Pavitt, K. (1984): Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory, in: *Research Policy* 13, S. 343-373.
- Peattie, K. (2001): Golden Goose or Wild Goose? The Hunt for the Green Consumer, in: *Business Strategy and the Environment* 10(4), S. 187-199.
- Perez, C., Soete, L. (1988): *Catching up in technology: entry barriers and windows of opportunity*. Dosi, G. et al. (eds), *Technical change and economic theory*, Pinter, New York, S. 458-479.
- Poponi, D. (2003): Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology based on experience curves, in: *Solar Energy*, Vol. 74, S. 331-340.
- Popp, D. (2002): Induced innovation and energy prices, in: *American Economic Review* Vol. 92, S. 160-180.
- Popp, D. (2003): Pollution control innovations and the Clean Air Act of 1990, in: *Journal of Policy Analysis and Management* 22, S. 641-660.

- Popp, D. (2006): International innovation and diffusion of air control technologies: The effects of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> regulation in the U.S., Japan, and Germany, in: *Journal of Environmental Economics and Management* 51, S. 46-71.
- Popp, D. et al. (2008): Policy versus consumer pressure: Innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry, NBER Working Paper No. 13439.
- Popp, D.; Newell, R.G.; Jaffe, A.B. (2009): *Energy, the Environment, and Technological Change*, NBER Working Paper No. 14832, Cambridge, Mass. April 2009.
- Porter (1990): *The Competitive Advantage of Nations*, New York.
- Porter, M.E.; van der Linde, C. (1995a): Green and competitive - Ending the stalemate, in: *Harvard Business Review on Business*, 73 (5), S. 120-134.
- Porter, M.E.; van der Linde, C. (1995b): Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship, in: *Journal of Economic Perspectives*, 9 (4), S. 97-118.
- Posner, M.V. *International Trade and Technical Change*, in: *Oxford Economics Papers*, Vol. 30, S. 323-341.
- Prakash, A. (2002): Green Marketing, Public Policy and Managerial Strategies, in: *Business Strategy and the Environment* 11(5), S. 285-297.
- Rafaj, P. & Kypreos, S. (2007): Internalisation of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model, in: *Energy Policy*, Vol. 35, 828-843.
- Ragwitz, M. et al. (2005): Analysis of the renewable energy sources' evolution up to 2020, Final Report of the FORRES Project to the CEC, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, March 2005.
- Ragwitz, M.; Held, A.; Resch, G.; Faber, T.; Haas, R.; Huber, C.; Morthorst, P.E.; Jensen, S.G.; Coenraads, R.; Voogt, M.; Reece, G.; Konstantinaviciute, I. & Heyder, B. (2007): *Assessment and optimisation of renewable energy support schemes in the European electricity market - OPTRES - final report*. Karlsruhe.
- Ragwitz, M.; Resch, G. & Faber, T. (2006): *Economic analysis of reaching a 20 % share of renewable energy sources in 2020: Annex 1 to the final report: Methodological aspects & database for the scenarios of RES deployment*.

- Ragwitz, M.; Huber, C.; Resch, G. (2007): Promotion of Renewable Energy Sources: Effects on Innovation, in: *International Journal of Public Policy*, Vol. 2 (2007), No. 1/2, S. 32-56.
- Ragwitz, M.; Schade, W.; Breitschopf, B.; Walz, R.; Helfrich, N.; Rathmann, M.; Resch, G.; Panzer, C.; Faber, T.; Haas, R.; Konstantinaviciute, I.; Zagamé, P.; Fougeyrollas, A.; Le Hir, B. (2009): *EmployRES. The Impact of Renewable Energy Policy on Economic Growth and Employment in the European Union, Final Report*. DG TREN, Brussels.
- Rehfeld, K. et al. (2007): Integrated product policy and environmental product innovations: an empirical analysis, in: *Ecological Economics* 61: 91-100.
- Rehfeld, K.M.; Rennings, K.; Ziegler, A. (2004): Integrated product policy and environmental product innovations - An empirical analysis, ZEW Discussion Paper No. 04-71, Mannheim: ZEW.
- Reiche, D.; Bechberger, M. (2004): Policy differences in the promotion of renewable energies in the EU member states, in: *Energy Policy*, Vol. 32, No. 7, S. 843-849.
- Reinhardt, F.L. (1998): *Environmental Product Differentiation - Implications for Corporate Strategy*. *California Management Review* 40(4).
- Rennings, K. (2000): Redefining innovation - Eco-innovation research and the contribution from ecological economics, in: *Ecological Economics*, 32 (2), S. 319-332.
- Rennings, K. et al. (2006): The influence of different characteristics of the EU environmental management and auditing scheme on technical environmental innovations and economic performance, in: *Ecological Economics* 57: 45-59.
- Rennings, K. et al. (2003): *The Influence of the EU Environmental Management and auditing Scheme on Environmental Innovations and Competitiveness in Germany: An Analysis on the Basis of a Case Studies and a Large-Scale Survey*, ZEW Discussions Papers Nr. 03-14, Mannheim.
- Rennings, K. et al. (2007): end of pipe or cleaner production? An Empirical Comparison of Environmental Innovation Decisions Across OECD Countries. In: *Business Strategy and the Environment* Vol. 16/8, S. 571-584.
- Rennings, K., Ankele, K. et al. (2005): *Innovationen durch Umweltmanagement – Empirische Ergebnisse zum EG-Öko-Audit*. Heidelberg, Physica-Verlag.
- Richardson, J.J. (1982): *Policy Styles in Western Europe*, London.

- Richter, R.; Furubotn, E.G. (1999): *Neue Institutionenökonomik - 2nd edition*, Tübingen: J. C. B. Mohr.
- Rogge, K., Schneider, M., Hoffmann, V. (2010): *The Innovation Impact of EU Emission Trading - Findings of Company Case Studies in the German Power Sector*. Fraunhofer ISI Working Paper Sustainability and Innovation; No. S 2/2010, Karlsruhe.
- Romer, P.M. (1986): *Increasing Returns and Long-Run Growth*, in: *Journal of Political Economy*. 94. (5): S. 1002-1037.
- Romer, P.M. (1990): *Endogenous Technical Change*, in: *Journal of Political Economy* 98: S. 71-102.
- Rothwell, R. and Dodgson, M. (1994): *Innovation and Size of Firm*. *The Handbook of Industrial Innovation* edited by M. Dodgson and R. Rothwell. Aldershot, Edward Elgar: S. 310-324.
- Rothwell, R.; Freeman, Ch.; Hurlsey, A.; Jervis, V.T.P.; Robertson, A.B.; Townsend J. (1974): *SAPPHO Updated: Project SAPPHO Phase II*, in: *Research Policy*, Vol. 3, S. 258-291.
- Rout, U.K. (2007): *Modelling of Endogenous Technological Learning of Energy Technologies - an Analysis with a Global Multi-regional Energy System Model*. PhD-Thesis. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).
- Russo, M.V.; Fouts, P.A. (1997): *A Resource Based Perspective on Corporate Environmental Performance and Profitability*. *Academy of Management Journal* 40(3): S. 534-559.
- Saggi, K. (2002): *Trade, Foreign Direct Investment and International Technology Transfer: A Survey*, in: *The World Bank Research Observer* 17 (2), S. 191-235.
- Sanyal, P. (2004): *The role of innovation and opportunity in bilateral OECD trade performance*, in: *Review of World Economics* Vol. 140, No. 4, S. 634-664.
- Sartorius, C. (2008): *Promotion of stationary fuel cells on the basis of subjectively perceived barriers and drivers*, in: *Journal of Cleaner Production* 16, 1, Suppl. 1, S. S171-S180.
- Sartorius, C.; Zundel, S. (Hrsg.) (2005): *Time strategies, innovation and environmental policy*, (*Advances in ecological economics*), Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA: Elgar Publ. Ltd.

- Schaeffer, G.J. (ed.) (2004): Photovoltaic Experiences: Synthesis report of the Photex-project. ECN, Petten.
- Schleich, J. (2004): Do energy audits help overcome barriers to energy efficiency? An empirical analysis for Germany. *International Journal of Energy Technology and Policy*, Vol. 2, No.3, S. 226-239.
- Schleich, J., Böde, U., Köwener, D., Radgen, P. (2001): Chances and barriers for energy services companies - A comparative analysis for the German brewery and university sectors. In: European Council for an Energy-Efficient Economy (Ed.): ECEEE 2001 Summer Study - Further than ever from Kyoto? Rethinking Energy Efficiency can get us there. ADEME Editions, Paris 2001, S. 229-234.
- Schleich, J., Rogge, K., Betz, R. (2009): Incentives for Energy Efficiency in the EU Emissions Trading Scheme, in: *Energy Efficiency* 2 (2009), 1, S. 37-67.
- Schleich, J.; Walz, R.; Meyer, B.; Lutz, C. (2003): Policy Impacts on Macroeconomic Sustainability Indicators when Technical Change is Endogenous. In: Horbach, J. (ed.): *Systems of Indicators for Sustainable Development Innovations*, forthcoming winter 2003.
- Schmookler, J. (1966): *Invention and Economic Growth*. Harvard University Press, Cambridge, Mass., USA.
- Siddiqui, O. & Bedard, R. (2005): Feasibility assessment of offshore wave and tidal current power production: a collaborative public/private partnership. *Conference Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting, 2005*. IEEE. 12-16 June 2005, S. 2004-2010.
- Simon, H.A. (1947): *Administrative behaviour - A study of decision-making processes in administrative organisations*, New York: Macmillan Company.
- Simon, H.A. (1981): *Entscheidungsverhalten in Organisationen - Eine Untersuchung von Entscheidungsprozessen in Management und Verwaltung*, Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie.
- Smith, K. (2005): Measuring Innovation, in: Fagerberg, J. et al. (eds): *The Oxford Handbook of Innovation*, Oxford University Press, Oxford, S. 148-177.
- Smits, R.; Kuhlmann, S. (2004): The rise of systemic instruments in innovation policy, in: *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, Vol. 1, No. 1, S. 1-26.
- Solow, R.M. (1956): A contribution to the theory of economic growth, in: *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, 1956, S. 71-102.

- Swanson, R.M. (2006): A Vision for Crystalline Silicon Photovoltaics, in: Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 14, S. 443-453.
- Sweeney, J. & Weyant, J. (2006): Integrated Assessment of Energy Technologies: An Overview. GCEP Technical Report 2006.
- Szarka, J. (2006): Wind power, policy learning, and paradigm change, in: Energy Policy, Vol. 34, S. 3041-3048.
- Taistra, G. (2001): Die Porter-Hypothese zur Umweltpolitik, in: ZfU 2001, Nr. 2, S. 241-262.
- Taylor, M.R. (2008): Cap-and-trade programs and innovation for climate safety. Working Paper, University of California-Berkeley.
- Teubal, M.; Yinnon, T.; Zuscovitch, E. (1991): Networks and Market Creation, in: Research Policy, Vol. 20, S. 381-392.
- The Carbon Trust (2006): Future Marine Energy: Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy. (Rep. No. CTC601). London, UK: The Carbon Trust.
- Thirtle, C.G.; Rutan, V.W. (1987): The Role of Demand and Supply in the Generation and Diffusion of Technical Change, Fundamentals of Pure and Applied Economics, Harwood Academic Publishers, New York.
- Unruh, G.C. (2000): Understanding carbon lock-in, in: Energy Policy, Vol. 28, S. 817-830.
- Utterback J.M. (1994): Mastering the Dynamics of Innovation: How Companies Can Seize Opportunities in the Face of Technological Change. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Uyterlinde, M.A.; Junginger, M.; de Vries, H.J.; Faaij, A.P.C. & Turkenburg, W.C. (2007): Implications of technological learning on the prospects for renewable energy technologies in Europe, in: Energy Policy, Vol. 35, S. 4072-4087.
- Vattenfall (2007): Global Mapping of Greenhouse Gas Abatement Opportunities up to 2030: Power sector deep-dive. Vattenfall, Januar 2007.
- Vernon, R. (1966): International Investment and International Trade in the Product Cycle, in: Quarterly Review of Economics Vol. 88, S. 190-207.
- Villiger, A.; Wüstenhagen, R. et al. (2000): Jenseits der Öko-Nische. Basel, Birkhäuser.

- von Hippel, E. (1988 ): Sources of innovation, New York.
- Voß, J.-P.; Fischer, C.; Schumacher, K.; Cames, M.; Pehnt, M.; Praetorius, B.; Schneider, L. (2003): Innovation - An integrated concept for the study of transformation in electricity systems - Discussion Paper 3 (TIPS Project), Berlin: TIPS Project.
- Wagner, J. (2007): Exports and Productivity: A survey of the Evidence from Firm-Level Data, in: The World Economy 30, S. 817-838.
- Wakelin, K. (1997): Trade and Innovation, Cheltenham.
- Wakelin, K. (1998): The role of innovation in bilateral OECD trade performance, in: Applied Economics, 1998, 30, S. 1335-1346.
- Wallace, D. (1995): Environmental Policy and Industrial Innovation, Earthscan, London.
- Walz, R. (2004): Innovation effects of energy policy instruments in Germany, in: Energy&Environment Vol. 15, Nr. 2, S. 249-260.
- Walz, R. (2005): Interaktion des EU Emissionshandels mit dem Erneuerbare Energien Gesetz, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Vol. 29 (2005), Heft 4, S. 261-270.
- Walz, R. (2006): Impacts of Strategies to Increase Renewable Energy in Europe on Competitiveness and Employment, in: Energy & Environment, Vol. 17, Nr. 6, S. 951-975.
- Walz, R. (2007): The role of regulation for sustainable infrastructure innovations: the case of wind energy, in: International Journal of Public Policy, Vol. 2 (2007), Nr. 1/2, S. 57-88.
- Walz, R. et al. (2008 b): Zukunftsmärkte Umwelt - Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern, Reihe Umwelt, Innovation, Beschäftigung des UBA/Umweltministeriums, Berlin 2008.
- Walz, R. et al. (2008c): Innovation and regulation: the case of renewable energy technologies, DIME working paper series "Environmental Innovation" No. 2, May 2008.
- Walz, R.; Helfrich, N.; Enzmann, A. (2009): A system dynamics approach for modelling a lead-market-based export potential, Working Papers Sustainability and Innovation, No. 3/2009, Karlsruhe 2009.
- Walz, R.; Kotz, C. (2003): Innovation and Regulation, Report within the EU-Project 'Analysis of Regulation Shaping New Markets', ISI-Report, Karlsruhe, July 2003.

- Walz, R.; Kuhlmann, S. (2005): Nachhaltigkeitsinnovationen in systemischer Perspektive, in: Mappus, S. (Hrsg.): Erde 2.0 - Technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung, Berlin, Heidelberg: Springer, S. 278-310.
- Walz, R.; Meyer-Krahmer, F.: Innovation and sustainability in economic development. Invited paper, Global Network on Economics of Learning, Innovation and Competence Building Systems (Globelics) First Conference on "Innovation Systems and Development Strategies for the Third Millennium", Rio de Janeiro, November 2-6, 2003.
- Walz, R.; Ostertag, K.; Eichhammer, W.; Glienke, N.; Jappe-Heinze, A.; Mannsbart, W.; Peuckert, J. (2008a): Research and Technology Competence for a Sustainable Development in the BRICS Countries, IRB publisher, Stuttgart 2008.
- Walz, R.; Schleich, J.; Ragwitz, M. (2011): Regulation, Innovation and Wind Power Technologies – An empirical analysis for OECD countries, Working Paper for DIME-Final Conference in Maastricht, Karlsruhe, April 2011.
- Weber, M.; Hemmelskamp, J. (2005a): Merging research perspectives on innovation systems and environmental innovation: An introduction - Towards Environmental Innovation Systems, Weber, M.; Hemmelskamp, J. (Hrsg.), Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1-7.
- Weber, M.; Hemmelskamp, J. (Hrsg.) (2005b): Towards Environmental Innovation Systems, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wei Yingqi, Y.; Xiaming Liu, X.; Wang, C. (2008): Mutual productivity spillovers between foreign and local firms in China, in: Cambridge Journal of Economics 2008, 32, S. 609-631.
- Wene, C.O. et al. (Hrsg.) (2000): Experience curves for policy making - The case of energy technologies. Proceedings of the IEA International Workshop at Stuttgart, 10-11 May 1999, Stuttgart: IER.
- Wernerfelt, B. (1984): A resource-based view of the firm, in: Strategic Management Journal 5(2), S. 171-180.
- Williamson, O.E. (1975): Markets and hierarchies: - Some elementary considerations, New York.
- Williamson, O.E. (1985): The economic institutions of capitalism, New York: Free Press.

Williamson, O.E.; Winter, S. (Hrsg.) (1991): The nature of the firm - Origins, evolution, and development, New York, Oxford: Oxford University Press.

Winter, S.G.; Kaniovski, Y.M.; Dosi, G. (2000): Modeling industrial dynamics with innovative entrants, in: Structural Change and Economic Dynamics, Vol. 11(3), S. 255-293.

Wong, V.; Turner, W. et al. (1996): Marketing Strategies and Market Prospects for Environmentally-Friendly Consumer Products, in: British Journal of Management 7(3), S. 263-281.

ZSW et al. (2006): Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den Arbeitsmarkt, Stuttgart 2006.

Die Bedeutung erneuerbarer Energien ist genauso unbestritten wie die Notwendigkeit ihrer technischen Weiterentwicklung. Die vorliegende Studie analysiert die Bedingungen für das Entstehen von Innovationen bei erneuerbaren Energien aus der systemaren Sicht des Innovationssystems. Mit Hilfe der Innovationsindikatorik beschreibt sie die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit einzelner Länder und stellt Ansätze zur Modellierung der Wettbewerbsfähigkeit vor. Darauf aufbauend werden Schlussfolgerungen für die innovationsorientierte Ausgestaltung politischer Maßnahmen gezogen.

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert die Rahmenbedingungen 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 breiten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.



FRAUNHOFER VERLAG

ISBN 978-3-8396-0318-5

