

# INNOVATIONSÖKONOMISCHE ANALYSE DER ENTWICKLUNG VON SOLARSTROMSPEICHERN IN DEUTSCHLAND

Paul KUNZ<sup>1</sup> (\*), Stefan VÖGELE<sup>2</sup>, Dirk RÜBBELKE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich, +49 2461/613393,  
paul.kunz@gmx.de

<sup>2</sup>Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich, +49 2461/613393, s.voegele@fz-  
juelich.de

<sup>3</sup>TU Bergakademie Freiberg, Lessingstraße 45, D-09596 Freiberg, +49  
3731/392749, Dirk.Ruebbelke@vwl.tu-freiberg.de

## **Inhalt**

Mit dem rasant ansteigenden Ausbau der PV-Kapazität in Deutschland stellt sich zunehmend die Frage, wie die zur Verfügung stehenden PV-Kapazitäten am besten genutzt bzw. wie das durch das PV zur Verfügung stehende Stromangebot und der anfallende Strombedarf synchronisiert werden können. Eine Möglichkeit hierfür stellen Stromspeicher dar. Im Folgenden wird mittels der Multi-Level-Perspektive der Innovationsverlauf im Bereich „PV-Stromspeicher-Systeme“ unter Berücksichtigung maßgeblicher Einflussfaktoren analysiert. Dabei wird die Entwicklung von Solarstromspeichern, welche eng mit der Entwicklung der Photovoltaik zusammenhängt, nachgezeichnet. Die Analyse der Entwicklung erfolgt auf mehrdimensionaler Ebene, d.h. es wird sowohl auf Veränderungen in den allgemeinen, exogen gegebenen Rahmenbedingungen als auch auf die Entwicklung innerhalb des dominierenden Regimes, dass durch das Zusammenwirken von technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Strukturen gebildet wird, eingegangen. Besonderes Augenmerk gilt der Entwicklung auf Nischenebene, d.h. der Dynamiken innerhalb der Nische sowie der Wandlung der Nische hin zu einem Teil des Regimes.

## 1 Einleitung

Die Energiewirtschaft befindet sich in einem tiefgreifenden Umwandlungsprozess. Durch die global steigende Energienachfrage und die sich verschärfenden negativen Umweltauswirkungen des Ressourcenverbrauchs wird verstärkt nach Lösungen für eine langfristig preisgünstige, umweltverträgliche und stabile Energieversorgung gesucht.

Derzeit verschiebt sich die Struktur der Energieversorgung von zentralen Großkraftwerken auf Basis fossiler Energieträger hin zu einer Nutzung regenerativer und dezentraler Energieerzeugungsarten. Ein Hauptelement des technologischen Wandels bildet dabei die verstärkte Nutzung von Photovoltaikanlagen. Die Möglichkeit kostengünstig, emissionsarm und dezentral Strom zu erzeugen, bringt der Photovoltaik (PV) hohe Sympathiewerte ein und sorgte vor allem im privaten Immobilienbereich und im Gewerbebereich für einen intensiven Ausbau. Die hohe Bereitstellung von Strom aus PV stellt allerdings die Aufnahmefähigkeit der Stromnetze zusehends vor Herausforderungen. Weiterhin ist die PV bislang nicht in der Lage sich aus eigener Kraft am Strommarkt gegenüber anderer Energieerzeugungsarten zu behaupten. Eine zunehmend wichtige Rolle bei der Einbindung von PV ins das Stromnetz kommt dezentralen Stromspeichern zu. Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, den Entwicklungsprozess von Stromspeichern in Verbindung mit Photovoltaikanlagen nachzuzeichnen. Dafür wird der Innovationsprozess der Speicherentwicklung hinsichtlich ökonomischer, technischer und regulatorischer Einflüsse mittels der Multi-Level-Perspektive analysiert und die wichtigsten Einflussfaktoren abgeleitet. Diese können für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von wichtige Indikatoren bilden und das Verständnis für den innovationsökonomischen Verlauf technischer Entwicklungen erhöhen.

Die Multi-Level-Perspektive ermöglicht eine Strukturierung des Innovationsverlaufs, indem sozio-ökonomisch bedeutende Elemente und Prozesse zusammengefasst werden. Die Grundannahme besteht darin, dass sich Innovationen durch die Verknüpfung verschiedener Technologien in Form sogenannter Nischen entwickeln. Als Gegenstück zu den Nischen besteht ein dominierendes sozio-ökonomisches System, welches die Nischenentwicklung unter Abhängigkeit von exogenen Faktoren beeinflusst. Mittels dieser mehrdimensionalen Methode soll die Entwicklung von Stromspeichern als Nischenelement in Verbindung mit dem sich wandelnden System der Energiewirtschaft untersucht werden.

## 2 Die Multi-Level-Perspektive

Die Multi-Level-Perspektive (MLP) ist eine mehrdimensionale, heuristische Methode zur Beschreibung von Veränderungsprozessen. Die Entwicklung geht vorwiegend auf FRANK GEELS zurück und wurde in zahlreichen Fallstudien zu technologischen, kulturellen und ökonomischen Themen angewandt und weiterentwickelt. Mittels der MLP ist es möglich ökonomische, soziale und technologische Einflüsse auf Innovationsprozesse in einem einheitlichen Rahmen darzustellen und zu analysieren.

### 2.1 Grundelemente der Multi-Level-Perspektive

Im Rahmen der MLP werden Einflüsse und Prozesse zwischen den Elementen Landscape, Regime und Nische untersucht. Die Basis für die MLP bildet die Annahme, dass Innovationen innerhalb von sogenannten Nischen entstehen. Dies sind separierte, geschützte Bereiche mit einer marginalen Zahl an Nutzern bzw. Entwicklern. Nischen sind im Zusammenhang mit Regimen zu betrachten, welche das etablierte, dominierende sozio-technische System darstellen und ihrerseits wiederum in das Landscape eingebunden sind. Das Landscape ist der gesellschaftliche, ökonomische und politische Grundrahmen. Er ist in erster Linie durch exogene Faktoren geprägt. Die einzelnen Elemente und Prozesse werden im Folgenden beschrieben.

#### 2.1.1 Landscape

Der Innovationsablauf findet stets im Kontext von exogenen Rahmenbedingungen statt, welche in der MLP als Landscape bezeichnet werden. Das Landscape beschreibt die politischen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Faktoren, welche sich auf die Entwicklung von Regime und Nischen auswirken [2].

Das Landscape kann grundsätzlich als relativ konstant betrachtet werden, da sich die grundlegenden Rahmenbedingungen, Einstellungen und Werte nur langsam verändern. Charakteristisch für das Landscape ist, dass sich dieses grundsätzlich nicht beeinflussen lässt.

### 2.1.2 Regime

Das Regime beschreibt gefestigte Strukturen, Nutzungsmuster und Marktsituationen in einem bestimmten sozio-ökonomischen System. Das Regime wird in folgende Subregime unterteilt:

- das sozio-kulturelle,
- das politische,
- das wissenschaftliche,
- das technologische,
- das industrielle bzw.
- das Verbraucherregime.

Alle dieser Subregime interagieren miteinander und bilden ein Gesamtsystem [2]. Innerhalb des Regimes herrschen konsistente Denkmuster, Werte und Normen. Aus einer statisch-ökonomischen Sicht sind Regime als positiv zu betrachten. Sie ermöglichen es auf etablierte Routinen, wie Produktionsarten, Geschäftsprozesse oder Nutzungspraktiken, zurückzugreifen. Dies verschafft den Akteuren Sicherheit und Stabilität. Regime sind allerdings nicht als starr und unbeweglich zu verstehen. Innerhalb des Regimes gibt es Lernprozesse und Entwicklungen [3]. Allerdings generieren diese keine (radikalen) Innovationen außerhalb des Systems, sondern können das herrschende Regime, z.B. mittels Prozessinnovationen, nur verbessern. Dies wird auch als Pfadabhängigkeit oder als Lock-in-Effekt bezeichnet. Solange ein Regime durch einen Konflikt mit dem Landscape nicht dazu gezwungen wird sich zu verändern bzw. abgelöst wird, bleibt es theoretisch ewig bestehen.

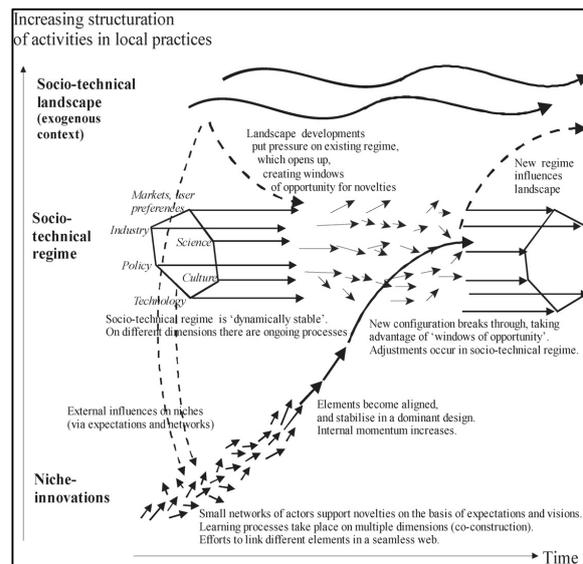
### 2.1.3 Nischen

Nischen bilden das zentrale Element in der MLP. Sie sind isolierte Bereiche, in welchen die Selektionsprozesse des Marktes keine Gültigkeit haben [1]. Nischen können bspw. Forschungslabore oder technikaffine Individuen darstellen. Innerhalb dieser Nischen werden Inventionen (weiter-) entwickelt, welche von den entsprechenden Elementen des aktuellen Regimes abweichen. Nischen entstehen aufgrund von Erwartungen oder Visionen die Funktionen des aktuellen Regimes auf andere Art und Weise zu erfüllen. Die einzelnen Nischen stehen dabei in kooperativer oder kompetitiver Beziehung zueinander [1]. Diese Beziehung kann sich temporär verschieben oder umkehren. Die Protagonisten hinter den Nischen haben die Hoffnung, dass ihre Neuerung innerhalb des Regimes einen Platz findet, bzw. dieses in Zukunft ablöst. Entscheidend für den Erfolg ist, dass eine Innovation Eigendynamik entwickelt um den Diffusionsprozess zu beginnen [1]. Diese drückt sich in der MLP in Form von Kanalisierungsprozessen aus.

Innerhalb von Nischen sind drei Hauptprozesse zu beobachten.

- Die Visionen und Erwartungen werden artikuliert und gegebenenfalls angepasst. Dies dient dazu den Innovationsfluss zu lenken, sowie Aufmerksamkeit zu erlangen und somit den Diffusionsprozess zu forcieren.
- Durch Netzwerkbildung und Marketingmaßnahmen wird versucht neue Akteure zu generieren und somit die Ressourcen- und die Nutzerbasis zu erhöhen.
- Zuletzt werden Lernprozesse genutzt, um die Wertschöpfungskette, die Organisation und die Technologie zu verbessern [4].

Analog zu anderen innovationsökonomischen Theorien, wie z.B. durch SCHUMPETER, geht die MLP von der Annahme aus, dass Innovationen durch die Kombination von bestehenden Technologien und Techniken begründet werden [3]. Davon abweichend wird aber nicht nur die Kombination von Technologien betrachtet, sondern der Fokus auf politische-, institutionelle-, ökologische- und soziale Faktoren erweitert.



**Abbildung 1: Prozesse und Elemente in der Multi-Level-Perspektive; Quelle: Geels and Schot [1]**

## 2.2 Prozesse in der Multi-Level-Perspektive

Die MLP beschreibt die Entstehung, Diffusion und Durchsetzung von Innovationen sowie die Stabilisierung und Lenkung von Innovationsprozessen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt die Beziehungen der einzelnen MLP-Elemente zueinander dar. Die Basis für Innovationen bilden Inventionen. Deren Implementierung, welche in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** mittels kleiner Pfeile auf Nischenebene dargestellt ist, kann über den Kanalisierungsprozess der Einzelnischen zur Entstehung eines dominanten Designs und zu einem Nischen-Regime führen. Das Regime mit seinen unterschiedlichen Bereichen steht im Zentrum von **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Im Zustand der Stabilität passt das Regime perfekt zum Landscape. Die relative Konstanz des Landscapes bildet die Grundlage für die Ausbildung eines stabilen Regimezustands. Kommt es jedoch zu bedeutenden Änderungen des Landscapes, wird das Regime unter Druck gesetzt. Zwar kann das Regime geringe Änderungen des Landscapes bewältigen, kommt es allerdings zu einer sehr starken Änderung bzw. zu einem Schock oder weist das Regime eine zu hohe Pfadabhängigkeit auf, so kann sich ein sogenanntes Window of Opportunity (WoO) öffnen. Das WoO beschreibt, einen Zustand der Regime-Instabilität. Dieser Zustand kann durch eine Nische genutzt werden, um sich weiter zu etablieren. Allerdings ist dies in vielen Fällen nicht möglich, da Nischen hierfür einen ausreichenden Reifegrad benötigen [1]. Für die Beurteilung ob eine Nische weit genug entwickelt ist, entwickelten Geels and Schot [1] vier zu prüfende Kriterien:

- **Haben die Lernprozesse ein dominantes Design erzeugt?** – Ein dominantes Design wird erkennbar wenn sich innerhalb der Nische konsistente technische und organisatorische Muster einstellen.
- **Sind machtvolle Akteure integriert worden?** – Als machtvolle Akteure werden politische und industrielle Unterstützer einer Nischentechnologie bezeichnet. Teilweise können auch Akteure aus Forschung und Entwicklung mit einbezogen werden.
- **Hat sich das Preis/Leistungs-Verhältnis verbessert und ist eine weitere Verbesserung absehbar?** - Dies bezieht sich auf die Bereitstellungs- und Nutzungskosten der Technologie in Bezug auf substituierende Technologien.
- **Beträgt der Marktanteil mindestens 5 %?** – Ab einem Marktanteil von 5 bis 20 % gilt der Diffusionsprozess als selbsttragend [1].

Es ergeben sich fünf mögliche Pfade zur Etablierung von Innovationen.

- **Regimeanpassung** – Im Falle eines moderaten Drucks des Landscapes auf das Regime, bleibt die Stabilität dessen erhalten. Es werden geringfügige Änderungen an einzelnen Regimeelementen vorgenommen. Diese Änderungen/ Neuerungen entstehen auf Basis eigener Ideen oder es werden symbiotische Nischen integriert [1]. Oft handelt es sich um reine Prozessinnovationen.
- **(chaotische-) Neuordnung** – Sollte ein enormer Landscapedruck oder sogar ein Landscapeschock auf das Regime wirken, kann die Stabilität nicht gewährleistet werden und mehrere oder alle Elemente erodieren. Wenn, zur Füllung des nun entstandenen Vakuums in Form eines WoO, keine entwickelte Nische bereitsteht, wird dieses von vielen unterentwickelten Nischen gefüllt. Diese verfügen weder über standardisierte Designs noch über verhältnismäßige Kosten- und Vertriebsstrukturen. Diese Situation wird einige Zeit für ein sehr chaotisches System ohne Regime sorgen, bis sich eine Nische durchsetzen kann und ein neues Regime bildet.
- **Substitution** – Analog zur Neuordnung kann ein WoO im Falle einer vorhandenen entwickelten Nische auch erfolgreich gefüllt werden. In diesem Fall werden die bestehenden Elemente des Regimes die Nischeninnovation bekämpfen. Durch den hohen Druck des Landscapes wird die Nische das Regime allerdings ablösen. Der Unterschied zur Neuordnung besteht darin, dass dies auf Basis von marktwirtschaftlichem Wettbewerb zwischen dem Regime und der entwickelten Nische, statt zwischen einer Vielzahl verschiedener Nischen erfolgt.
- **Regimezersetzung** – Die Form der Regimezersetzung baut auf den Prozess der Regimeanpassung auf. Die Voraussetzungen bleiben die gleichen, jedoch kommt es durch die eingeführten symbiotischen Innovationen innerhalb des Regimes zu sukzessiven Anpassungen, was die Implementierung von weiteren Innovationen bewirkt. Die Veränderungen auf allen Ebenen des Regimes führen somit zu einem substantiell neuen Regime, auch wenn dieses u.U. von den alten Akteuren geprägt bleibt [1].
- **Sequentielle Regimeablösung** – Als fünfte Form der Anpassungsprozesse gilt die sequentielle Regimeablösung. Diese geht von der Grundannahme eines konstant steigenden Landscapedrucks aus. Bei geringem Druck sind zur Sicherung des Regimes kleine interne Innovationen ausreichend. Dies entspricht dem Prozess der Regimeanpassung. Durch den stärkeren Druck des Landscapes werden radikal neue (aber symbiotische) Nischeninnovationen eingeführt. Diese führen in Verbindung mit dem zunehmenden Druck des Landscapes zu einer Zersetzung sowohl von innen, als auch zu einer Erosion der Regimeelemente. Abhängig davon, ob das nun entstehende WoO

durch eine Nische gefüllt werden kann, kommt es zu einer (chaotischen) Neuordnung oder zu einer Substitution des Regimes [1].

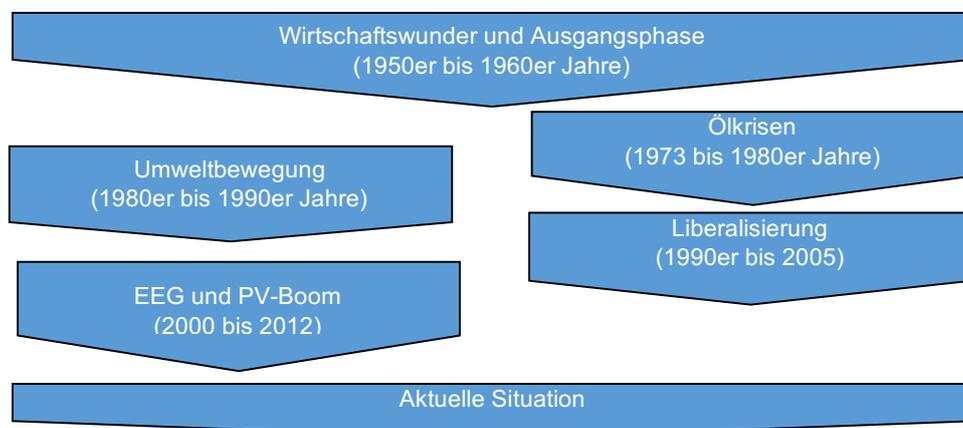
Allen Prozessen gemein ist, dass sich im Anschluss ein neues, dem Landscape konformes, stabiles Regime etabliert. Bis zu einer erneuten Veränderung des Landscapes bleibt dieses Regime stabil. Die Nützlichkeit von Regimen besteht darin, dass sie Sicherheit und Stabilität bringen. Allerdings verhindern sie radikale Innovationen und systematische Weiterentwicklung.

### 3 Der Innovationsprozess

#### 3.1 Überblick zu Entwicklungsphasen von PV-Stromspeichern

Zur Darstellung des Innovationsablaufs für Stromspeicher in Verbindung mit PV-Anlagen wird der Rahmen der MLP verwendet. Dabei werden zunächst die exogenen Rahmenbedingungen vorgestellt, um anhand dieser das vorherrschende Regime einzuordnen. Basierend auf dem Konzept der MLP wird die Entwicklung der PV und der Stromspeicher als Nischen aufgezeigt und die Entwicklungsfaktoren erarbeitet und diskutiert.

Der Entwicklungsprozess von PV-Stromspeichern in Deutschland lässt sich in sechs Phasen gliedern, welche sich hinsichtlich ihrer Einflüsse grundlegend unterscheiden. Die Phaseneinteilung ermöglicht den Innovationsprozess zu strukturieren und Entwicklungsfaktoren voneinander abzugrenzen.



**Abbildung 2: Phasen des Innovationsprozesses (eigene Darstellung)**

Jede dieser in Abbildung 2 dargestellten Phasen beschreibt eine für den Innovationsprozess maßgebliche gesellschaftliche und wirtschaftliche Grundstimmung. Da sich die Phasen temporär überlagern und gegenseitig beeinflussen, ist eine exakte zeitliche Abgrenzung nicht zielführend. Vielmehr soll durch die Ausarbeitung der individuellen Merkmale der jeweiligen Phasen der Einfluss auf den Innovationsprozess untersucht werden.

Anhand der retrospektiven Betrachtung des Innovationsablaufes, werden wichtige Faktoren für den Innovationsverlauf identifiziert.

#### 3.2 Ausgangsphase und Wirtschaftswunder (1950er bis 1960er Jahre)

Durch das Wirtschaftswachstum der 1950er und 1960er Jahre in Europa, kam es zu einem starken Anstieg der Stromnachfrage durch Industrie und Haushalte. Der wachsenden Stromnachfrage wurde durch den Ausbau von zentralen Großkraftwerken auf Kohle- und Wasserkraftbasis begegnet [5]. Energiepolitisch standen die Versorgungspreise und die Versorgungssicherheit im Mittelpunkt [6]. Zum Lastenausgleich wurden Pumpspeicherkraftwerke errichtet. Diese ermöglichten es die stetige Produktion auf die Lastspitzen zu übertragen und unterstützten die Netzfrequenzhaltung.

Auf Landscapeebene standen die volkswirtschaftliche Entwicklung und die flächendeckende Elektrifizierung im Vordergrund. Die nachfrageorientierte Bereitstellung von Energie, neben gleichzeitigem Wachstum der Nachfrage, war politisch und gesellschaftlich vordergründig gefordert [7].

Die Zeit der 1950er und 1960er Jahre war von zentralistischen Staatsbetrieben der Energieversorgung geprägt. Die monopolistische Marktstruktur ermöglichte die risikoarme Investition in konventionelle

Großkraftwerke zur zentralen Energieerzeugung [6]. Das System der konventionellen Energieerzeugung auf Kohle- und Ölbasis in Verbindung mit PSK ermöglichte es Energie kostengünstig und nachfrageorientiert bereitzustellen. Die Investitionssicherheit war durch die staatliche Unterstützung gewährleistet [6].

Als bedeutendste Nische dieser Zeit kann die Atomenergie betrachtet werden. Die Atomenergie wurde schon früh als vielversprechend betrachtet und die Erforschung dementsprechend gefördert [8]. Ebenso ist die Entwicklung des Blei-Akkus zu nennen. Dieser erfuhr in der Phase des Wirtschaftswunders bedeutende Fortschritte. Insbesondere die Innovationen im Bereich der Kunststoffentwicklung begünstigten die Verbesserungen der Lebensdauer und der Betriebssicherheit von Akkumulatoren. Am verbreitetsten und bereits durch industrielle Prozesse gefertigt, war der Akku auf Bleibasis. Dieser wurde vor allem für dezentrale Energieversorgung und in Automobilen eingesetzt [9].

### 3.3 Die Ölkrise (1973 bis 1980er Jahre)

Im Rahmen des Jom-Kippur-Kriegs im Jahr 1973 drosselte die Gemeinschaft Öl exportierender Länder (OPEC) die Ölproduktion, um die westlichen Staaten durch Preisschocks unter Druck zu setzen. Die Verknappung und dadurch bedingte Preissteigerungen bewirkten, dass der breiten Öffentlichkeit erstmalig die Abhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern bewusst wurde.

Durch die Ölpreisschocks wurden Politik und Öffentlichkeit auf die hohe Abhängigkeit von fossilen Energieträgern aufmerksam. Nun stand vor allem die sichere Versorgung mit preisgünstiger Energie im Fokus der Politik [8]. Außerdem wurde im Sinne der Risikostreuung die Diversifikation der Energieträger und der Energielieferanten forciert. Durch die Ölkrise wurde die Sensibilität der gesamten Wirtschaft auf Rohstoffschocks erkannt und strategische Speicher eingeführt, welche die Verfügbarkeit von Energieträgern über mehrere Monate gewährleisten sollten. Befand sich die Kernenergie aufgrund des geringen Wissensstands in den 1950er Jahren noch in einer Nischenposition, wurde diese nun in das Regime integriert. Der Ausbau der Kernenergie passte zum Ziel der Diversifikation der Energieerzeugung und zum System der zentralen Großkraftwerke. An der Struktur der Stromwirtschaft änderte sich hingegen wenig. Der Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken und Talsperren wurde sukzessive mit dem Ausbau der zentralen Stromversorgung vorangetrieben. Weiterhin gewann das System der Nachtspeicherheizungen in Verbindung mit vergünstigten Stromtarifen an Bedeutung [10].

Die Elektrifizierung wurde in den 1960er Jahren in Deutschland weitgehend abgeschlossen. Dennoch gab es, insbesondere an schwer zugänglichen oder weit entfernten Orten, die Schwierigkeit eine konstante Elektroenergieversorgung zu gewährleisten. So wurden bspw. ab 1976 in Australien abgelegene Telefonstationen mittels PV-Batteriesystemen erfolgreich betrieben [11]. Die PV wurde zur Nutzung für die Raumfahrt entwickelt. Im Rahmen der Suche nach neuen Energiequellen zur Diversifikation sowie zur Versorgung von Systemen abseits des Stromnetzes wurde das Potential von PV in einigen Ländern erkannt.

Außerdem wurden im Wärmezeugungsbereich Nachtspeicherheizungen ausgebaut. Diese ermöglichten die Kraftwerksfahrpläne der zentralen Großkraftwerke zu optimieren, indem die Stromabnahme während der Nacht erhöht wurde [10]. Es zeigt sich, dass die Praxis der dezentralen stationären Energiespeicherung bereits hier ihren Anfang nahm. Obwohl Nachtspeicheröfen die Definition eines Stromspeichers (Strom→Speicher→Strom) nicht explizit erfüllen, zeigen sie dennoch, dass die stationäre Energiespeicherung beim Verbraucher keine neue Idee ist.

### 3.4 Die Umweltbewegung (1980er bis 1990er Jahre)

Das hohe Wirtschaftswachstum und der damit einhergehende Ressourcenverbrauch führte zu einem Erstarken der Umweltbewegung. In zahlreichen Ländern entstanden politische Gruppen, welche für den Gedanken des Umwelt- und Ressourcenschutzes aktiv eintraten. In Deutschland formierte sich der Widerstand im Energiesektor einerseits gegen die Atomenergie und andererseits gegen den Einsatz der Kohleverstromung. Durch die Globalisierung und den weltweit wachsenden Ressourcenabbau wurde der Nachhaltigkeitsgedanke zunehmend bedeutsam.

Auch die vom Club of Rome veröffentlichten Thesen zu den Grenzen des Wachstums (1972) machten deutlich, dass die damals aktuelle Energieversorgung auf Dauer nicht nachhaltig sein würde. So gewann der soziale, generationengerechte und ökologieorientierte Umgang mit fossilen, mineralischen und erneuerbaren Ressourcen weltweit an Bedeutung.

Durch die Identifizierung von CO<sub>2</sub> als Treibhausgas und dessen wachsender Anteil in der Atmosphäre, wird mit einem Anstieg der globalen Temperatur gerechnet. Die Prävention globaler negativer Einflüsse durch die Nutzung fossiler Energieträger erforderte die internationale Verständigung [12].

Auf Landscapeebene lassen sich folgende vier differenziert zu betrachtende Strömungen identifizieren.

- Die Umweltschäden durch sauren Regen und den Bergbau führten zu lokalen Protesten und konkreten projektbezogenen Umweltschutzforderungen [13].
- Hinsichtlich der Kernenergie wurden Bedenken bzgl. der Betriebssicherheit und der Endlagerung geäußert [6]. Die Reaktorkatastrophen von Three-Miles-Island (1979) und Tschernobyl (1986) wirkten als Katalysatoren für die wachsende Gegenbewegung.
- Der globale Abbau mineralischer und fossiler Rohstoffe warf Bedenken hinsichtlich der Ressourcenreichweite auf. Die sozialen und ökologischen Nebeneffekte der Ausbeutung nichterneuerbarer Ressourcen führten zu zusätzlichem Landscapedruck.
- Durch die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre wurde der Anstieg der globalen Temperatur erwartet. Die damit einhergehenden Veränderungen waren und sind nicht komplett absehbar. Um dem Klimawandel zu begegnen, ist im Gegensatz zu lokalen Umweltauswirkungen eine internationale Verständigung nötig.

In der deutschen als auch in der europäischen Gesellschaft und Politik gewann der Nachhaltigkeitsgedanke an Bedeutung. Die ökologischen, sozialen und intergenerationellen Effekte des eigenen Konsums spielten für wachsende Teile der Gesellschaft eine Rolle. In der Energiepolitik führte dies zu einer zunehmend ökologieorientierten Ausrichtung, wie nachfolgend vorgestellte Maßnahmen und Entwicklungen belegen.

Aufgrund der wachsenden politischen Umweltbewegung und die sich entfaltenden Umweltschäden durch die Industrie wurden Gesetze zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit erlassen. Zusätzlich zur Erkenntnis aus den Ölkrisen hinsichtlich der Importabhängigkeit, wurde nun ebenso die begrenzte Reichweite von fossilen Energieträgern erkannt [8].

Innerhalb der Energiewirtschaft führten die politischen und gesellschaftlichen Forderungen bzgl. Umwelt- und Ressourcenschutz zu höheren Kosten in der Stromerzeugung. So mussten neue Filter- und Entsorgungsverfahren eingeführt und parallel die Effizienz der Stromerzeugung verbessert werden. Der Druck durch Stakeholder hinsichtlich der Umweltverträglichkeit der Stromerzeugung führte dazu, dass Projekte der Energiewirtschaft verstärkt auf ihre ökologische Tragfähigkeit geprüft wurden.

Die Nischenentwicklungen der erneuerbaren Energien gründeten sich auf zwei Säulen. Zum einen wurde die Forschung für erneuerbare Energien Anfang der 1980er Jahre verstärkt gefördert und zum anderen starteten kleinere private Initiativprojekte zu Testzwecken oder zur ökologieorientierten Eigenstromerzeugung. Zusätzlich begannen sich die Akteure in der PV-Nische zu organisieren und politischen Einfluss zu nehmen.

Die staatliche Forschungsförderung erneuerbarer Energien stieg innerhalb weniger Jahre sprunghaft an. Ebenso wurde die Herausforderung der Energiespeicherung erkannt und in der Forschungsfinanzierung erstmals gesondert aufgeführt [12]. Ziel der PV-Forschung war es in erster Linie neue Basismaterialien zur Kostendegression sowie zur dezentralen, oftmals mobilen Anwendbarkeit zu finden [14]. Damit ging auch die Entwicklung von Speichertechnologien für die Elektromobilität und das Netzmanagement einher [15]. Das erste PV-Kraftwerk Deutschlands mit einer Leistung von 300 kW ging 1983 in Betrieb und verfügte bereits über stationäre Batteriespeicher zum kurzfristigen Lastausgleich [14]. 1986 initiierte die Firma Alpha Real das Projekt MEGAWATT. Das Ziel war es, 333 PV-Anlagen zu je 3 kW auf Wohnhäusern in der Schweiz zu installieren. Die Anlagen wurden netzbasiert ausgelegt, d.h. man vermied bewusst einen systemintegrierten Stromspeicher [16]. Es zeigte sich, dass sich hinsichtlich der Pfadentwicklung innerhalb der Nischenebene zwei Strömungen heraus kristallisierten: Einerseits die netzbasierte PV-Erzeugung, in welcher die Energie über rücklaufende Zähler ins Stromnetz gespeist wurde und andererseits die speicherbasierte Variante, die den Eigenverbrauch der erzeugten Energie anstrebte. Während der 1980er Jahre war eine verstärkte Vernetzung der PV-Akteure zu beobachten. Die Organisation und Ausformulierung von gemeinsamen BRUNS, OHLHORST [14] nennen drei Organisationsebenen.

- Die Akteure auf Bürgerebene werden durch Verbände und Fördervereine repräsentiert und tragen dazu bei das Image der PV zu verbessern und die Potentiale aufzuzeigen.

- Auf industrieller Ebene ist der DEUTSCHE FACHVERBAND SOLARENERGIE E.V. (heute BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT - BSW) zu erwähnen, welcher sich die flächendeckende Markteinführung von PV und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit als Ziel setzte.
- In der EUROSOLAR finden sich auf europäischer Ebene politische Akteure, welche für eine erneuerbare Energieerzeugung eintreten.

### 3.5 Die Liberalisierung (1990er bis 2005)

Ende der 1980er Jahre vollzog sich in der europäischen und deutschen Politik ein Paradigmenwechsel bezüglich der, durch Monopole geprägten, Struktur der Energiewirtschaft. Die horizontalen und vertikalen Verflechtungen der Strom- und Gaswirtschaft führten zu volkswirtschaftlichen Ineffizienzen. Sowohl auf technischer als auch auf organisatorischer Ebene wurde die Energieversorgung als träge und ineffizient betrachtet [6]. Im Zuge der europäischen Binnenmarktintegration der 1990er Jahre wurde die Strom- und Gaswirtschaft reformiert. Die Veränderungen lassen sich in drei Kategorien einteilen.

- Die vertikalen Verflechtungen sollten durch das sogenannte „Unbundling“ aufgelöst werden.
- Der Wettbewerb sollte intensiviert und europäisiert werden.
- Die Netzbetreiber wurden hinsichtlich der Netzzugangsberechtigung für Dritte und der Vergütung für Netzdienstleistungen reguliert [7].

Die 1990er Jahre waren in weiten Teilen der westlichen Welt von einer Kultur der staatlichen Deregulierung und Privatisierung geprägt. Im Energiesektor erhoffte man sich eine effizientere und kostengünstigere Energieversorgung sowie eine Entlastung des Staates. Es wurde weiterhin ein gemeinsamer europäischer Strombinnenmarkt verlangt, um die europäische Energiewirtschaft wettbewerbsfähiger zu gestalten.

Das Regime der Energieversorgung änderte sich seit den 1950er Jahren erstmals grundlegend. Auf europäischer Ebene wurden Vorschriften über Erzeugung, Übertragung und Verteilung von Strom vereinheitlicht. Im Vordergrund stand die Öffnung der einzelnen Energiemärkte, die Entflechtung vertikal organisierter Energieunternehmen sowie der diskriminierungsfreie Netzzugang [6]. Um im Wettbewerb bestehen zu können, schlossen sich die damals acht Verbundunternehmen zu den heute bestehenden vier großen EVU zusammen [17]. Die lokalen und regionalen EVU schlossen sich hingegen kaum zusammen. Tatsächlich traten hunderte neue Wettbewerber in den Markt ein [7], welche vorwiegend Anbieter für erneuerbare Energien oder Tochterfirmen ausländischer Energieversorger waren [6].

Durch die Eröffnung der Stromhandelsbörse (EEX) wurde die Stromvermarktung sowohl wettbewerbsfähiger als auch transparenter. Durch die Etablierung des Börsenhandels wandelte sich die Preisbildung auf Basis von Durchschnittskosten hin zu einer Preisbildung auf Basis von Grenzkosten [18]. Jedoch ist durch die grenzkostenbasierten Strompreise die Vollkostendeckung von Erzeugungskapazitäten unter Umständen nicht gewährleistet. Die Etablierung des Börsenhandels führte auch zu einer wachsenden Relevanz von Strom-Terminmärkten. Diese ermöglichten ein effizienteres Risikomanagement für Anbieter und Nachfrager, da diese sich gegen zukünftige Preisschwankungen absichern konnten [7]. Die Strukturveränderung in der europäischen Energiewirtschaft öffneten zahlreiche Windows of Opportunity, welche durch die Etablierung neuer Anbieter im deutschen Markt genutzt wurden.

Die Forschungsförderung für PV in Deutschland wurde weiter erhöht und übertraf nun selbst die der PV-Vorreiterländer USA und Japan [19]. Der Schwerpunkt wurde nun in die Kostendegression und Wirkungsgradverbesserung gesetzt [20]. Die PV-Nische wurde somit weiterhin vor allem durch Forschungsfinanzierung geschützt.

Bundesländer und einzelne Kommunen setzten unterschiedliche Programme zur Förderung der PV um. Die Förderung auf Bundesebene setzte erst durch die Verabschiedung des EEG in nennenswerter Weise ein. Der Markt für die Herstellung von PV-Technik wurde weiterhin von US-amerikanischen und japanischen Unternehmen dominiert, welche hinsichtlich Kosten- und Vertriebsstruktur einen erheblichen Vorsprung gegenüber der deutschen Industrie besaßen [14]. Die hohe Liquidität und niedrige Risikoaversion der „New-Economy“ gepaart mit Prozessinnovationen führten trotz allem zur Gründung neuer deutscher Unternehmen.

Auf Seiten der Nutzer etablierten sich Graswurzelbewegungen in Form von Betreiber- und Beteiligungsgesellschaften. War die Motivation zur Nutzung von PV zuvor noch stark ökologisch geprägt, so ist nun ein zunehmender kommerzieller Antrieb zu beobachten [21]. Die Gründung von Bürgersolaranlagen wie in Hammelburg durch HANS-JOSEF FELL (1994) oder Beteiligungskonzepten wie die Regiostromanlage in Freiburg (1994), weiteten sich auf das ganze Bundesgebiet aus [14].

In Rahmen von Entwicklungshilfeprojekten wurden sogenannte Solar-Home-Systems (SHS) präferiert, da der fehlende Netzausbau in Entwicklungsländern die Errichtung netzgekoppelter Anlagen erschwerte. Um abgelegenen Gebieten mit schlechter Infrastruktur die nötigste Elektrifizierung zu ermöglichen, wurden kompakte SHS konstruiert. Durch diese Systeme wurde eine autarke dezentrale Stromversorgung in kleinem Maßstab möglich.

Auch in Deutschland wurden in dieser Zeit speicherbasierte Pilotprojekte gestartet, wie z.B. 1986 durch die Solar-Wasserstoff-Bayern-GmbH. In diesem Projekt wurde die Speicherung von PV-Strom mittels Wasserstoff erprobt. Neben der Nutzung als Stromspeicher wurden auch die Einsatzmöglichkeiten als Treibstoff getestet. Das Projekt lief bis 1999 und konnte die Potentiale für Wasserstoff als Energiespeicher aufzeigen [22]. Die Ausgangslage für die PV-Entwicklung in Deutschland basierte demnach auf zwei Systemen. Es existierten technische Systeme, sowohl für speicherbasierte Anwendungen (SHS, Wasserstoffspeicherung) als auch für netzgekoppelte Anlagen (1000-Dächer, MEGAWATT). Wirtschaftlich betrachtet, waren beide Systeme gegenüber der konventionellen Stromerzeugung nicht konkurrenzfähig [14].

### 3.6 Das EEG und der Photovoltaik-Boom (2000 bis 2012)

Die Gesetzgebung zum Ausbau regenerativer Energien bewirkte einen starken Ausbau dieser und war maßgeblich an der Etablierung der PV-Energie in Deutschland beteiligt.

Die 2000er Jahre sind geprägt von einer Institutionalisierung des Klimaschutzes. Durch das Kyoto-Protokoll (1997) wurden zum ersten Mal völkerrechtlich verbindliche Ziele zur Begrenzung von Treibhausgasen verabschiedet [7]. Als Werkzeuge zur Zielerreichung sollten

- die Energieeffizienz verbessert,
- CO<sub>2</sub>-arme Energieerzeugung integriert und
- ein CO<sub>2</sub>-Zertifikate-Handelssystem etabliert werden, welches durch EU-Richtlinie 2003/87/EG beschlossen wurde.

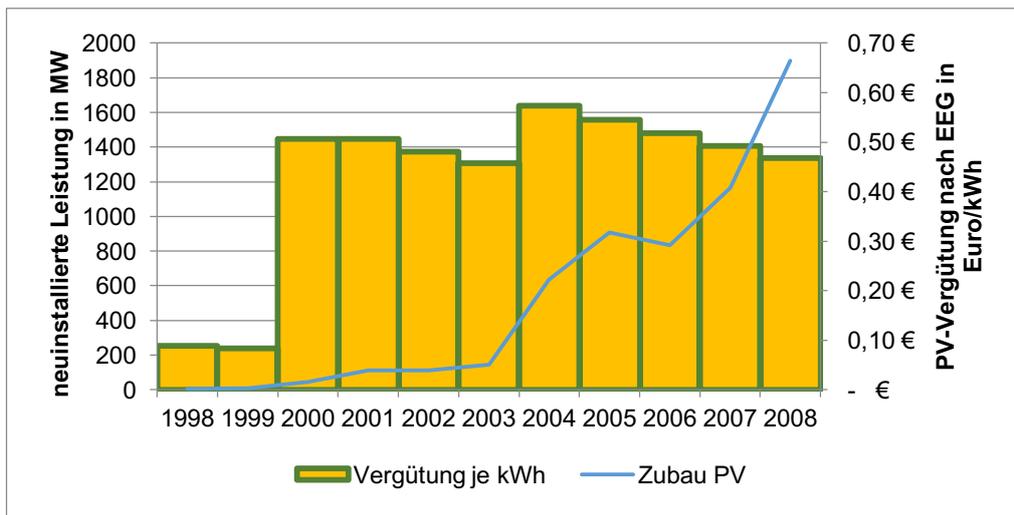
Im Jahr 1998 erfolgte auf Bundesebene der Regierungswechsel. Die neue rot/grüne-Regierungskoalition stand dem Klimaschutz und dem Ausbau erneuerbarer Energien positiv gegenüber [14]. In der Bevölkerung genossen erneuerbare Energien und insbesondere PV als „bürgernahe“ Energieerzeugung sehr hohe Sympathiewerte [14].

Zur Umsetzung der Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll wurden auf politischer Regimeebene zahlreiche Reformen durchgeführt, welche das bestehende Regime stark beeinflussten. Hierzu zählte u.a. der Zertifikatehandel. Dieser wurde mit dem Treibhausgasemissionsgesetz (2004) in nationales Recht überführt [7] und betraf vor allem die konventionelle Stromerzeugung, welche das energiewirtschaftliche System dominierte.

Zur Steigerung der Energieeffizienz wurde 2002 das KWK-Gesetz verabschiedet. Dieses förderte KWK-Anlagen umlagebasiert und sollte den Anteil an der Stromerzeugung bis 2020 auf 25 % erhöhen. Die Effizienz der Energienutzung wurde durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) forciert. Durch die sukzessive Verschärfung der EnEV, soll bis 2050 ein klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden.

Der Regierungswechsel im Jahr 1998 bewirkte eine stärkere ökologische Ausrichtung der Politik. Insbesondere die Regierungsbeteiligung von Bündnis90/Die Grünen wirkte sich auf die Ausgestaltung des Gesetzes für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG), welches im Jahr 2000 verabschiedet wurde, aus [23]. Das Gesetz bewirkte einen Paradigmenwechsel in der deutschen Förderpolitik erneuerbarer Energien. Die Grundpfeiler des EEG bilden die Abnahmepflicht und die degressive technologieabhängige Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien.

Durch das EEG und das 100.000-Dächer-Programm (1999-2003), ein Förderprogramm zur Investitionsbezuschung von PV-Anlagen durch die KfW, erlebte die PV einen Boom in Deutschland. Allein zwischen 1999 und 2003 verzehnfachte sich der PV-Markt [14].



**Abbildung 3: PV-Zubau und Vergütung; Quelle: Bruns, Ohlhorst [14]**

Es ist erkennbar, dass die PV durch das EEG in das Regime integriert wird. Gemäß den Kriterien für die Nischendiffusion, erfüllt die Technologie alle Voraussetzungen für eine Regimeintegration.

- So wurden machtvolle Akteure auf allen relevanten Ebenen gewonnen.
- Durch die Weiterentwicklung der Wechselrichtertechnologie und die Einspeisevergütung setzte sich ein dominantes Design in Form von netzgekoppelten Anlagen durch.
- Die Kosten für die Herstellung und Installation konnten erheblich gesenkt werden. Eine weitere Kostendegression wurde erwartet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).
- **Bezogen auf die bundesweite Stromerzeugung lag der Marktanteil der PV erstmals 2012 bei 5 % [24].** Gemäß MLP ist ein Marktanteil von ca. 5 % ein Kriterium für die Regimeintegration einer Nische.

Durch die gesetzliche Förderung, die Investitionsbereitschaft in neue Technologien sowie die erfolgreiche Lobbyarbeit von Solarverbänden, konnte die PV endgültig die Nische verlassen und wurde in das Regime integriert. Dieser Prozess kann als Substitutionsprozess bezeichnet werden und hält bis heute an. Die massive Förderung erneuerbarer Energien durch das EEG wirkte sich als Landscapeschock auf das Regime aus. Für die großen EVU bestand ein ökonomischer Interessenkonflikt zwischen dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Betrieb der bestehenden Energieerzeugungskapazitäten. Der Ausbau erneuerbarer Energien und die Ausnutzung des EEG hätte dem eigenen konventionellen Kraftwerkspark geschadet [23]. Mit Ausnahme einiger neuer Marktteilnehmer waren die EVU nicht in der Lage bzw. nicht bereit tragfähige Konzepte zu entwickeln um erneuerbare Energien erfolgreich in ihr Portfolio zu integrieren [25]. Somit führte der Ausbau dezentraler erneuerbarer Energien dazu, dass potentielle Marktanteile der bestehenden Stromwirtschaft verloren gingen.

Für Stromspeicher im Bereich der Photovoltaik bedeutete die geschilderte Entwicklung hingegen das vorläufige Ende. Standen bisher sowohl netzgekoppelte als auch speicherbasierte Systeme zur Disposition, setzten sich nun die netzgekoppelten Anlagen als dominantes Design durch. Ein Grund dafür war die ertragsorientierte Förderpolitik. Im Rahmen der Marktanreizprogramme wurden noch die Investitionskosten bezuschusst, wohingegen das EEG die ins Netz eingespeisten Strommengen förderte. Dies hemmte die Investitionen in Flexibilitätsoptionen, wie dezentrale Stromspeicher.

Nachdem sich die netzgekoppelten PV-Anlagen durch die EEG-Förderung durchsetzen konnten, verblieben die PV-Speicher in der Nische. Zwar wuchs der weltweite Markt für speicherbasierte Anwendungen zwischen 1999 und 2008 jährlich zwischen 10-15 %. Allerdings erscheint dies gegenüber dem Wachstum netzgekoppelter Systeme, welche ihren Marktanteil in derselben Zeit mit dem Faktor 70 erhöhten, verschwindend gering [24]. Ein Ausbau dezentraler stationärer Energiespeicher konnte, zumindest in Deutschland, nicht beobachtet werden. Dennoch konnten PV-Stromspeicher international weiterhin in der Nische bestehen, wie das Beispiel der PV-basierten Stromerzeugung auf Torkelau (Neuseeland) zeigt [9]. Obwohl die Entwicklung von PV-Stromspeichern in Deutschland, durch das Einspeisevergütungssystem und die Beschneidung der öffentlichen Forschungsförderung gehemmt wurde, stagnierte diese nicht. So wurden weltweit zahlreiche speicherbasierte Inselanlagen umgesetzt und innovative Konzepte zur privaten dezentralen Energieversorgung entwickelt. Diese Faktoren brachten die Entwicklung von Stromspeichern innerhalb der Nische voran.

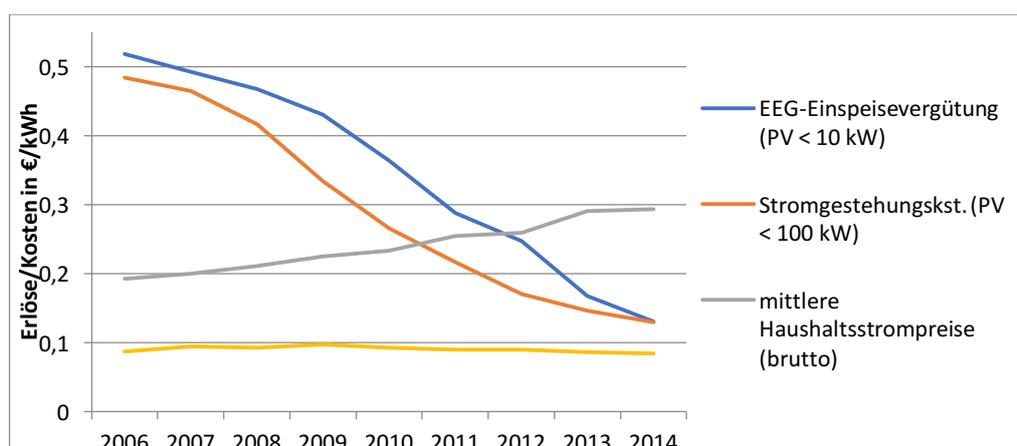
### 3.7 Die aktuelle Situation und die zukünftige Entwicklung

Die aktuelle Entwicklung auf Landscapeebene ist geprägt durch den Drang erneuerbarer Energien in das deutsche und europäische Energiesystem zu integrieren. Dabei müssen tragfähige Marktkonzepte für einen zukünftigen Strommix und eine konsistente europäische Energiepolitik entwickelt werden.

Das EEG hat für einen hohen Ausbau erneuerbarer Energien gesorgt. Durch die sinkende Einspeisevergütung für neue Anlagen ist ein Ende der umlagebasierten Förderung absehbar. Deswegen wird nach tragfähigen Konzepten zur Marktintegration erneuerbarer Energien gesucht. Die fluktuierende Einspeisung und das Problem der bedarfsorientierten Bereitstellung erfordert außerdem die technische Integration erneuerbarer Energien im großen Maßstab. Das Regime der Energiewirtschaft befindet sich im Wandel. Der Ausbau erneuerbarer Energien und veränderte Marktstrukturen setzen die etablierten Energiekonzerne unter Druck. Die Börsenpreise für Strom sind seit 2012 um 12,7 % gefallen, wofür u.a. auch die erhöhte Einspeisung durch erneuerbare Energien verantwortlich ist [26]. Für konventionelle Kraftwerke leiten sich daraus Finanzierungsschwierigkeiten ab. Zudem verringert sich die Investitionsbereitschaft in effiziente und flexible Neuanlagen. Durch das 2012 novellierte EEG, wurde die Förderung von PV auf einen Ausbau von 52 GW begrenzt. Ein PV-Ausbau auf 200 GW, wie u.a. durch Weniger, Tjaden [27] für notwendig erachtet, ist auf diesem Weg nicht erreichbar.

In den letzten Jahren sind die Energiewende und die EEG-Umlagenzahlung hinsichtlich der sozialen Verträglichkeit unter Kritik geraten. Die Umlage belastet Geringverdiener stärker, da der Stromverbrauch im Verhältnis zum Einkommen, mit steigendem Einkommen sinkt [28]. Außerdem wird der Anstieg der Anzahl an Unternehmen, welche aus Wettbewerbsgründen eine verminderte EEG Umlage zahlen, kritisiert. Erneuerbare Energien integrieren sich derzeit in das Regime und könnten es langfristig dominieren. Dabei bringen diese die bekannten Vor- und Nachteile in das Energiewirtschaftsregime ein. So erfordert die Saisonalität und Fluktuation von EE den Einsatz von Flexibilisierungsmaßnahmen auf Erzeugungs-, Verteilungs- und Verbraucherebene. Dadurch öffnen sich WoO, z.B. für innovative Speichertechnologien.

Mit 38,5 GW installierter Leistung stellt Photovoltaik die größte Kapazität der Energieerzeugungstechnologien in Deutschland. Der Preiseinbruch für PV-Modultechnik ab 2009 (siehe **Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden.; S. Fehler! Textmarke nicht definiert.**) veranlasste die europäische Union 2013 zum Schutz der einheimischen PV-Industrie, Mindestpreise für PV-Module von 56 ct/W zu setzen [29]. Obwohl befürchtet wird, dass diese künstliche Verteuerung den weiteren PV-Ausbau in Deutschland und Europa bremsen könnte [30], wird Strom aus PV stetig günstiger. Besonders die Qualitätsverbesserungen bewirken, dass die Lebensdauer von PV-Anlagen statt der üblichen 20 Jahre, mittlerweile mit 30 bis 40 Jahren angesetzt wird [31].



**Abbildung 4: PV-Netzparität; eigene Darstellung;**  
**Quellen: PV-Guide [32], Statista [33], Eurostat [34]**

Ein wichtiger Meilenstein in der Integration von PV war das Erreichen der Netzparität. Mit ausgewählten Systemen in guter Lage, konnte ab 2010 Strom aus PV erstmals günstiger erzeugt werden, als für Strom aus dem öffentlichen Netz gezahlt werden musste (siehe Abbildung 4). 2012 wurde auch die Einspeisevergütung soweit gesenkt, dass der Eigenverbrauch von PV-Energie mehr Ertrag einbrachte, als die

Einspeisung und Vergütung nach EEG. Für PV-Anlagenbesitzer und -planer stand nun die Erhöhung des Eigenverbrauchs im Vordergrund. Jedoch ist für typische Privathaushalte der Solarstrom-Eigenverbrauch ohne weiteres schwer zu erhöhen, da sich die Ertragsspitzen und der Hauptstrombedarf zeitlich nicht überschneiden. Aus diesem Grund besteht ein hohes Potential für stationäre Stromspeicher in Privathaushalten. Aber auch für Unternehmen lohnt sich in einigen Branchen der Eigenverbrauch von PV-Strom. Das Erreichen der Fördergrenze für PV ist mittelfristig absehbar. Um den Ausbau selbsttragend zu ermöglichen, wird nach neuen Geschäftsmodellen gesucht. Ein Standbein der neuen Vermarktungsstrategien wird dabei das Eigenversorgungsprinzip bilden. Um die PV weiter auszubauen, rückt die Systemintegration weiter in den Vordergrund. Der Ausbau von stationären Energiespeichern erhöht die Aufnahmefähigkeit der bestehenden Stromnetze für PV-Strom um 67% [35].

Der Markt für PV-Batteriespeicher verzeichnet ein starkes Wachstum, welches auf steigende Strompreise, niedrige Einspeisevergütungen und fallende Systempreise zurückgeführt werden kann. Im deutschen Markt sind, nach aktuellen Quellen, 51 Hersteller für stationäre Energiespeicher aktiv [36]. Dabei bedienen diese vor allem den privaten Markt. Der Markt kann als sehr dynamisch beschrieben werden, wodurch sich ein ständiger Wechsel in der Struktur der Anbieter ergibt. So sind Konsolidierungstendenzen bzw. Anbieterfluktuationen zu beobachten [37]. Die Speicherkosten sinken gemäß einer typischen Lernkurve mit 10-20 % bei Verdopplung des Produktionsvolumens. Der Preis für Bleibatterie-Systeme fällt mit durchschnittlich 11 % p.a. für Lilon-Systeme sogar mit 18 % p.a. [35]. Die Systempreise liegen durchschnittlich bei 1100 €/kWh für Bleibatterien und bei 2000 €/kWh für Lilon-Systeme [36]. Die Distribution von PV-Speichern erfolgt auf vier Hauptkanälen:

- Batterien für private Haushalte oder Gewerbe, werden direkt als Einzelprodukt an die Kunden vermarktet. Dies erfolgt zunehmend außerhalb des klassischen Business-to-Business Geschäfts.
- Vor allem PV-Anbieter aber auch Energieversorger vermarkten die Speicher als Komplettpakete in Verbindung mit den eigenen Produkten.
- Durch Quartierspeicher teilen sich mehrere EE-Erzeuger die Kosten für die Stromspeicherung durch einen zentralen Großspeicher. Dieses Speichermodell wird aktuell durch den Mannheimer Energieversorger MVV getestet. Dabei schließen sich mehrere lokale private Energieerzeuger zusammen und investieren in einen Großspeicher.
- Anbieter von Elektromobilität nutzen den Stromspeichermarkt als zweites Standbein neben dem Vertrieb von Elektrofahrzeugen

Im Rahmen des Mess- und Evaluierungsprogramms für Stromspeicher der RWTH-Aachen wurden Speicherbesitzer zu ihren Investitionsmotiven befragt [35]. Demnach besteht der wichtigste Grund in der Absicherung gegen steigende Strompreise. Das zweite Hauptmotiv für Investoren liegt darin, einen eigenen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Für eine anhaltende Marktdiffusion spielt die Strompreisentwicklung eine entscheidende Rolle, da es das wichtigste Investitionsmotiv darstellt. Das altruistische Motiv der Unterstützung der Energiewende wird mit steigender Marktdiffusion voraussichtlich anteilig abnehmen, wohingegen das Motiv der langfristigen sicheren Geldanlage in den Vordergrund treten wird.

Trotz der guten Marktentwicklung und dem offensichtlichen Nutzen für das Energiesystem gehören PV-Stromspeicher weiterhin zu den Nischenprodukten. Im Folgenden soll anhand der Nischenintegrationskriterien aufgezeigt werden, warum Speicher Nischenprodukte sind und welche Schritte für eine Regimeintegration nötig wären.

- Es hat sich kein dominantes Design entwickelt. Die technischen Spezifikationen und Anwendungsmuster der Energiespeicher sind zu unterschiedlich. Es ist nicht absehbar ob sich private stationäre Speicher in Einzelhaushalten oder Quartierspeicher durchsetzen werden. Außerdem ist nicht erkennbar, welche Speichertechnologie zukünftig vorrangig verwendet wird. Um mittelfristig zu bestimmen, welche Technologie und Anwendung überlegen ist, muss erforscht werden wie sich einzelne Speichertechnologien im Zusammenhang mit EE-Stromerzeugung im Langzeitbetrieb (>10 Jahre) verhalten. Bisher sind die langfristigen Auswirkungen des Speicherbetriebs durch Entladetiefe, Leistungsabfrage, -aufnahme und Zyklenwechsel zu wenig erforscht. Außerdem braucht es einheitliche Qualitätsstandards um die Sicherheit der Stromspeicher zu gewährleisten.
- Die Kosten für Stromspeicher sind bereits deutlich gesunken. Sollte die Nachfrage zunehmen, ist der Ausbau von weiteren Fertigungskapazitäten notwendig. Große Hoffnungen werden in die Elektromobilität gesetzt, welche den Bedarf an Akkus weiter erhöhen und somit für die nötigen Lern- und Skaleneffekte in der Batterietechnik sorgen könnte. Weiterhin hängt die Attraktivität von PV-Stromspeichern stark vom Endverbraucherpreis für Strom ab. Die erwartete Entwicklung des

Strompreises beeinflusst die Vorteilhaftigkeit von Stromspeichern massiv. Neben dem hohen Steueranteil am Strompreis, rücken die Netzentgelte stärker in den Fokus. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung von 2013 wurde die Prüfung von leistungsabhängigen Elementen in der Berechnung der Netzentgelte vereinbart [38]. Dies würde die Speicherattraktivität verringern, da die nutzungsbedingten Kosten des Strombezugs aus dem öffentlichen Stromnetz anteilmäßig sinken. Derzeit ist die Speicherung von PV-Strom nur an wenigen Standorten und unter sehr speziellen Bedingungen wirtschaftlich vertretbar. Aber die vergangenen und zukünftigen erwarteten Kostendegressionen im Bereich der Batterietechnik erfüllen das Kostenkriterium für eine Regimeintegration.

- Es gibt noch keine wahrzunehmenden Interessensvertreter für Solarstromspeicher. Das Thema rückt durch die Fachpresse und aktuelle Forschungsergebnisse verstärkt in das Bewusstsein der Branchenakteure. Außerdem beginnen sich Verbände wie der Bundesverband erneuerbare Energien (BEE) und der BSW für Stromspeicher einzusetzen [39]. Aber eine Interessenvertretung, wie sie bspw. die PV-Industrie der 1990er Jahre oder die Atomindustrie aufbauen konnten, besteht bisher nicht. Um machtvolle Verbündete zu finden, muss die Branche auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette und in der Politik und Forschung die Vorteile der Solarstromspeicher aufzeigen.
- Derzeit ist der Nutzerkreis zu klein, um eine Regimeintegration zu ermöglichen. Aktuell wird die Anzahl der installierten Stromspeicher auf 15.000-17.000 Stück geschätzt [35]. Bezogen auf einen Anlagenbestand von 1,5 Mio. PV-Anlagen, wovon ca. 43 % mit >20 kW tendenziell nicht zur privaten Hausstromversorgung genutzt werden, liegt der Anteil von PV-Anlagen mit Stromspeichern zwischen 1,7 und 1,9 %. Um eine Regimeintegration zu ermöglichen, wird ein Marktanteil von etwa 5 % benötigt. Allerdings ist das Wachstum beachtlich. Allein im Jahr 2014 hat sich die Kapazität von stationären dezentralen Stromspeichern mehr als vervierfacht. Zudem wurden 13,4 % der neuinstallierten PV-Anlagen in Verbindung mit Stromspeichern installiert [35]. Bis zum Jahr 2030 rechnet man mit 700.000 installierten dezentralen Stromspeichern [10]. Begünstigende Faktoren für den Speichermarkt werden im Ausbau der Elektromobilität gesehen [10].

#### 4 Fazit

Die innovationsökonomische Analyse der PV-Stromspeicherentwicklung in Deutschland zeigt aufgrund welcher Einflussfaktoren stationäre Stromspeicher derzeit ein hohes Wachstum aufweisen. Obwohl es sich bei Stromspeichern in Verbindung mit Photovoltaik um eine bekannte und ausgereifte Technologie handelt, setzt der Diffusionsprozess im PV-Bereich erst 10 Jahre nach dem Durchbruch der Photovoltaik ein. Die Hauptfaktoren für die verzögerte Diffusion der Speicher sind in der ertragsorientierten PV-Förderung nach EEG, dem Rückgang der Forschungsfinanzierung und der fehlenden regulatorischen Einordnung von Stromspeichern zu finden. Seit 2013 entwickelt sich der Markt für dezentrale PV-Stromspeicher. Folgende Faktoren führen dazu, dass sich dezentrale stationäre Stromspeicher etablieren: Als wichtigster Faktor ist das Erreichen der Netzparität zu betrachten. Seit die EEG-Förderung für PV-Anlagen unter den Endabnehmerstrompreis gesunken ist, rückt der Eigenverbrauch von PV-Energie in den Vordergrund. Um den Eigenverbrauch zu erhöhen und sich gegen steigende Strompreise abzusichern, wird mit steigender Tendenz ca. jede siebte PV-Anlage in Verbindung mit einem Stromspeicher installiert. Obwohl andere Maßnahmen zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs existieren, wächst vor allem der Markt für PV-Batteriespeicher. Dies ist unter anderem auf das Wachstum des globalen Batteriemarktes und die damit verbundene Preisdegression zurückzuführen. Seit 2012 wird das Marktwachstum auf dem Batteriemarkt zunehmend durch die Elektromobilität getragen. Deshalb wird seitens der Hersteller von PV-Stromspeichern große Hoffnung in die Entwicklung der Elektromobilität gesetzt. Zuletzt muss der flankierende Beitrag des KfW-Förderprogramms erwähnt werden, welches durch Investitionszuschüsse zur Beschleunigung des Diffusionsprozesses führte. Folgende Faktoren wirken sich besonders positiv auf die der Stromspeicher aus:

- Das Hauptmotiv für die Investition in einen Stromspeicher bildet die Absicherung gegen steigende Endverbraucherstrompreise. Durch die Erhöhung des Eigenverbrauchs werden die Auswirkungen von Strompreiserhöhungen auf die zu zahlenden Stromkosten abgeschwächt.
- Stromspeicher wurden durch Investitionszuschüsse staatlich gefördert. Neben der direkten Verbesserung der Wirtschaftlichkeit konnten durch die Förderauflagen die Systemkompatibilität sowie die Qualitätsstandards beeinflusst werden.

- Der Markt für Elektromobilität erzeugt durch den Ausbau von Produktionskapazitäten für Batterien Ausstrahlungseffekte. Die Kostendegression durch Lern- und Skaleneffekte wirkt sich positiv auf den Bereich der stationären Energiespeicher aus.

Um Stromspeicher erfolgreich in das Regime zu integrieren, gelten folgende Punkte als kritisch:

- Es existiert bislang kein einheitlicher Standard hinsichtlich der Technologie und der Systemausgestaltung. Durch intelligente Vernetzung könnten Stromspeicher zusätzliche Aufgaben im Stromversorgungssystem wahrnehmen.
- Die Betriebssicherheit und Batterielebensdauer muss optimiert werden. Derzeit fehlt es an einheitlichen verbindlichen Qualitätsstandards. Insbesondere die Sicherheit von Batteriespeichern wird kritisch beobachtet.
- Zuletzt müssen die Investitionskosten weiter sinken. Ein wirtschaftlicher Betrieb von Stromspeichern ist in Deutschland derzeit nur mit Hilfe von Investitionszuschüssen oder an besonders günstigen Standorten möglich.

## 5 Literatur

- [1] Geels FW, Schot J. Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*. 2007;36(3):399-417.
- [2] Geels FW. The multi-level perspective on sustainability transitions: Response to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2011;1:24-40.
- [3] Geels FW. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*. 2002;31:S. 1257–74.
- [4] Geels FW, Kemp R. The Multi-Level Perspective as a New Perspective for Studying Socio- Technical Transitions. *Automobility in Transition? A Socio-Technical Analysis of Sustainable Transport*. London: Routledge; 2011. p. 49-76.
- [5] Fast V. Die Technisierung der Hausarbeit von 1950 bis 1970. Bielefeld: Universität Bielefeld, 2006.
- [6] Krisp A. Der deutsche Strommarkt in Europa - Zwischen Wettbewerb und Klimaschutz. Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen, 2007.
- [7] Schiffer H-W. Energiemarkt Deutschland. Köln: TÜV-Media GmbH, 2005.
- [8] BMFT. Programm der Energieforschung und Energietechnologie (1977-1980). Bonn: Bundesminister für Forschung u. Technologie; 1977.
- [9] Sterner M, Stadler I. Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Heidelberg, Berlin, New York: Springer-Vieweg Verlag, 2014.
- [10] Fürstenwerth D, Waldmann L. Stromspeicher in der Energiewende-Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Berlin: Agora, 2014.
- [11] Charters WWS, Mack MR. Remote Area Applications of Solar Cell Technology. *Energy, Resources and Environment*. 1982:458-68.
- [12] BMFT. 3. Programm Energieforschung und Energietechnologien. Bonn: Bundesminister für Forschung und Technologie, 1990.
- [13] Huber J. Allgemeine Umweltsoziologie. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag, 2001.
- [14] Bruns E, Ohlhorst D, Wenzel B, Köppel J. Erneuerbare Energien in Deutschland - eine Biographie des Innovationsgeschehens. Berlin: Universitätsverlag der TU-Berlin, 2009.
- [15] Sandtner W, Geipel H, Lawitzka H. Forschungsschwerpunkte der Bundesregierung im Bereich erneuerbare Energien. *Energiepolitik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 1997. p. 255-72.
- [16] Real M, Lüdi H. Projekt Megawatt: Experience with Photovoltaik in Switzerland. Zürich: Glas Trösch Solar AG, 1991.
- [17] Berkel M. Die großen Vier. <http://www.bpb.de/politik/wirtschaft/energiepolitik/152780/die-grossen-vier>: Bundeszentrale für politische Bildung,; 2013.

- [18] Canty K. Faire Strompreise: Grundlagen und Handlungsbedarf. Berlin: infraCOMP, 2009.
- [19] IEA. RD & D Photovoltaics. [iea.org](http://iea.org): International Energy Agency; 2015.
- [20] Räuber A. Photovoltaik in Deutschland - eine wechselvolle Geschichte. Auf dem Weg in die solare Zukunft - 30 Jahre DGS. München: DGS; 2005. p. 151-70.
- [21] Mautz R, Byzio A. Die soziale Dynamik der regenerativen Energien - am Beispiel der Fotovoltaik, der Biogasverstromung und der Windenergie. Göttingen2005.
- [22] Winter CJ, Fuchs M. Hysolar and Solar-Wasserstoff-Bayern. International Journal for Hydrogen Energy. 1991;16(11):S. 723-34.
- [23] Müller T. Politische Ökonomie der Erneuerbaren-Energien-Politik in Deutschland. Kassel: Kassel-University-Press, 2015.
- [24] Varadi PF. Sun above the Horizon. Singapor: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2014.
- [25] Bontrup HJ, Marquardt RM. Die Zukunft der großen Energieversorger. Hannover, Lüdinghausen: Greenpeace, 2015.
- [26] Öko-Institut. Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035 im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin: Agora, 2015.
- [27] Weniger J, Tjaden T, Quaschnig V. Solare Unabhängigkeitserklärung. Photovoltaik. 2012;10:50-4.
- [28] Bardt H, Niehues J, Techert H. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz - Erfahrung und Ausblick. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln; 2012.
- [29] Fuhs M. Streit um Mindestpreis-Berechnung für chinesische Photovoltaikmodule. [http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/streit-um-mindestpreis-berechnung-fr-chinesische-photovoltaikmodule\\_100019432/2015](http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/streit-um-mindestpreis-berechnung-fr-chinesische-photovoltaikmodule_100019432/2015).
- [30] Schindlbeck E. Mindestpreise hemmen den Markt. PV-Magazine. 2015(6):15.
- [31] Ossenbrink R. Speicherlösungen und mehr. Sonne, Wind und Wärme. 2015;06:56-61.
- [32] PV-Guide. Photovoltaik-Preisindex. 01.08.2015, <http://www.photovoltaik-guide.de/pv-preisindex:photovoltaik-guide.de>, 2015.
- [33] Statista. Strompreise für Haushaltskunden in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2014. 12.08.2015, [statista.com](http://statista.com), 2015.
- [34] Eurostat. Energy and Environment. [www.eurostat.eu](http://www.eurostat.eu): EUROSTAT; 2015.
- [35] Kairies K-P, Haberschusz D, Magnor D, Leuthold M, Badede J, Uwe Sauer D. Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarspeicher. Aachen: ISEA-RWTH Aachen, 2015.
- [36] PV-Magazine. Marktübersicht Home-Speicher. PV-Magazine. 2015;06:35-40.
- [37] Röpcke I. Zwischen Konsolidierung und Wachstum. Sonne Wind & Wärme. 2014;12:66-77.
- [38] RAP. Netzentgelte in Deutschland: Herausforderungen und Handlungsoptionen, Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin: The Regulatory Assistance Project, 2014.
- [39] Falk H. Was dezentrale Speicher für ein stabiles Stromnetz leisten. Sonne-Wind & Wärme. 2015;6:84-5.