



**Universität Stuttgart**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

**IER**

Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy · Institut d'Economie Energétique et d'Utilisation Rationnelle de l'Énergie

Arbeitsbericht

**Einfluss der Förderung  
auf die  
Kostenentwicklung von  
Windenergie- und  
PV-Anlagen**

C. Kruck, L. Eltrop

Nr. 3

September 2007

**Inhalt**

1	Einfluss der Windenergieförderung auf die Entwicklung der spezifischen Investitionskosten von Windenergieanlagen.....	1
2	Einfluss der Förderung der photovoltaischen Strahlungsenergienutzung auf die Entwicklung der spezifischen PV-Modulpreise .....	5

## **1 Einfluss der Windenergieförderung auf die Entwicklung der spezifischen Investitionskosten von Windenergieanlagen**

Drei Arten von Förderinstrumenten haben insgesamt zur Entwicklung der Windenergienutzung in Deutschland beigetragen:

### *1.) Förderung von Forschung und Entwicklung (FuE)*

Hierunter werden Aufwendungen für FuE-Projekte als auch die Unterstützung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben verstanden. Sie wurden und werden vom Bund als auch von den einzelnen Bundesländern getragen. Darüber hinaus gehört das 250-MW-Wind-Förderprogramm hierzu. Dieses 1990 gestartete Programm gewährte wahlweise Investitions- oder Betriebskostenzuschüsse unter der Voraussetzung, dass sich der Betreiber verbindlich zur Teilnahme an einem wissenschaftlichen Mess- und Evaluierungsprogramm verpflichtete. Aus diesem Grund wird es in der vorliegenden Betrachtung dem Bereich FuE zugeordnet.

### *2.) Indirekte Investitionskostenzuschüsse*

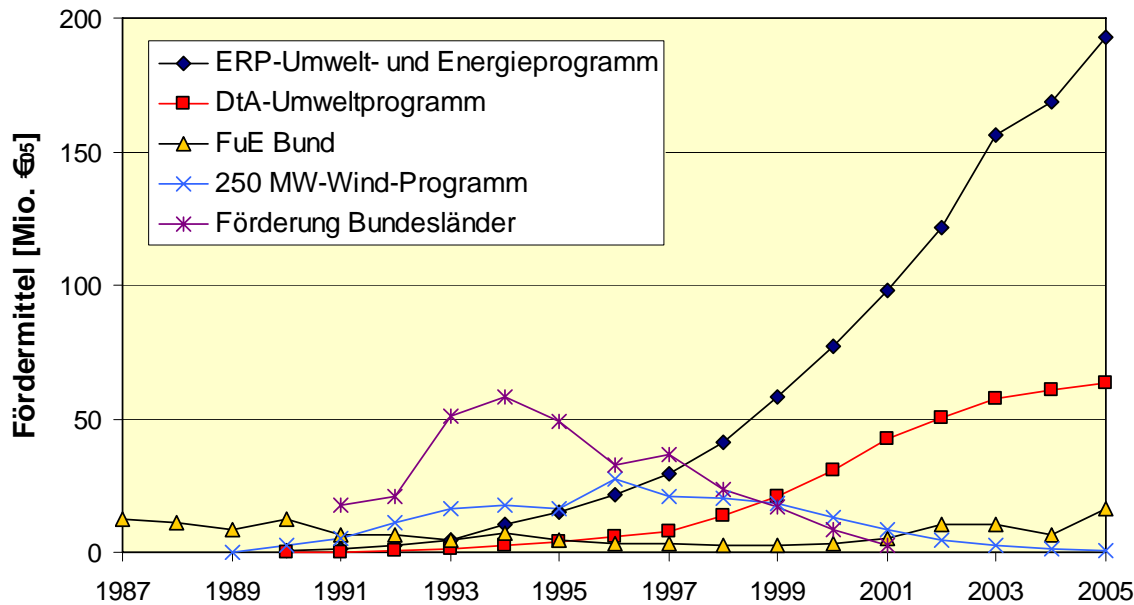
Unter diesem Förderinstrument werden speziell indirekte Zuschüsse zu den Investitionskosten durch den Zinsvorteil bei zinsvergünstigten Darlehen verstanden. Darlehensprogramme der Deutschen Ausgleichsbank gewähren um 1,5 – 2 % gegenüber dem Marktzins vergünstigte Kredite bei Laufzeiten zwischen 10 und 20 Jahren und 2 – 5 tilgungsfreien Anlaufjahren. Die indirekten Zuschüsse lassen sich dabei aus dem Darlehensvolumen sowie der jeweiligen Zinsdifferenz von Darlehens- und Marktzins berechnen. Insbesondere das ERP-Umwelt- und Energiesparprogramm und das DtA-Umweltprogramm sind hierunter zu nennen.

### *3.) Einspeisevergütungen*

Das Stromeinspeisegesetz (StrEG), das zum 1. Januar 1991 in Kraft trat, sah eine Vergütung des eingespeisten Windstroms von zunächst 16,61 Pf/kWh (8,49 Cent/kWh) vor. Abgelöst wurde das StrEG zum 1. April 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das eine Anfangsvergütung von 17,8 Pf/kWh (9,1 Cent/kWh) vorsah. Im novellierten EEG beläuft sich der Anfangssatz auf 8,7 Cent/kWh. Der erzielte Ertrag einer Windenergieanlage entscheidet darüber, nach welchem Zeitraum der Anfangssatz auf die Basisvergütung reduziert wird. Die Förderung erstreckt sich insgesamt über 20 Jahre.

In **Abb. 1-1** ist der zeitliche Verlauf der Ausgaben der verschiedenen Programme zu Forschung und Entwicklung wie auch zur Markteinführung aufgetragen.

Insbesondere die Mittel aus dem ERP-Umwelt- und Energieprogramm sind in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen und lagen im Jahr 2005 bei rund 200 Mio. €<sub>05</sub>. Auch die indirekten Investitionskostenzuschüsse aus dem DtA-Umweltprogramm lagen mit rund 60 Mio. €<sub>05</sub> erheblich über den FuE-Ausgaben durch den Bund, die sich im Jahr 2005 auf rund 17 Mio. €<sub>05</sub> beliefen.

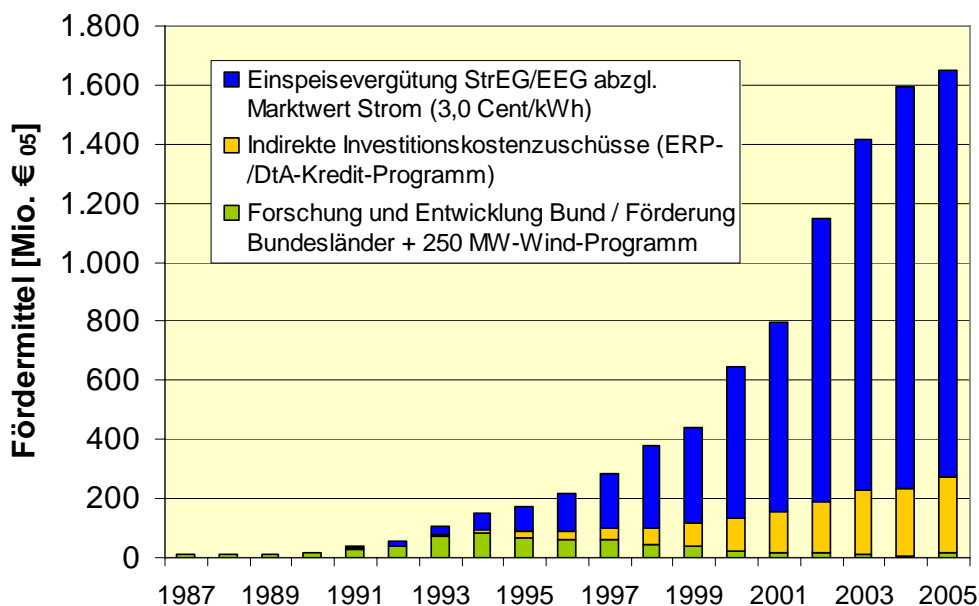


**Abb. 1-1:** Aufwendungen an Fördermitteln in Deutschland für die Windenergie im Rahmen von Programmen zu FuE (250 MW-Wind-Programm, FuE Bund, Förderung Bundesländer) sowie Programmen zu indirekten Investitionskostenzuschüssen (ERP, und DtA-Programm) 1987 - 2005 (/Staiß 2003/, /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /Schneider; Kaltschmitt 2005/, /Lenz; Kaltschmitt 2006/)

In **Abb. 1-2** werden die jährlichen Gesamtfördersummen dargestellt. Die Höhe der Einspeisevergütung wurde bereinigt um einen mit 3,0 Cent/kWh angesetzten Marktpreis für Strom. (Zum Vergleich: Der durchschnittliche Spotmarktpreis der EEX stieg von 2,85 Cent/kWh im Jahr 2004 auf 4,60 Cent/kWh im Jahr 2005). Wenngleich es sich bei den Fördergeldern aus StrEG und EEG um auf die Stromverbraucher umgelegte Mittel handelt, so werden diese hier dennoch als erbrachte im Sinne von induzierten Förderleistungen angesehen.

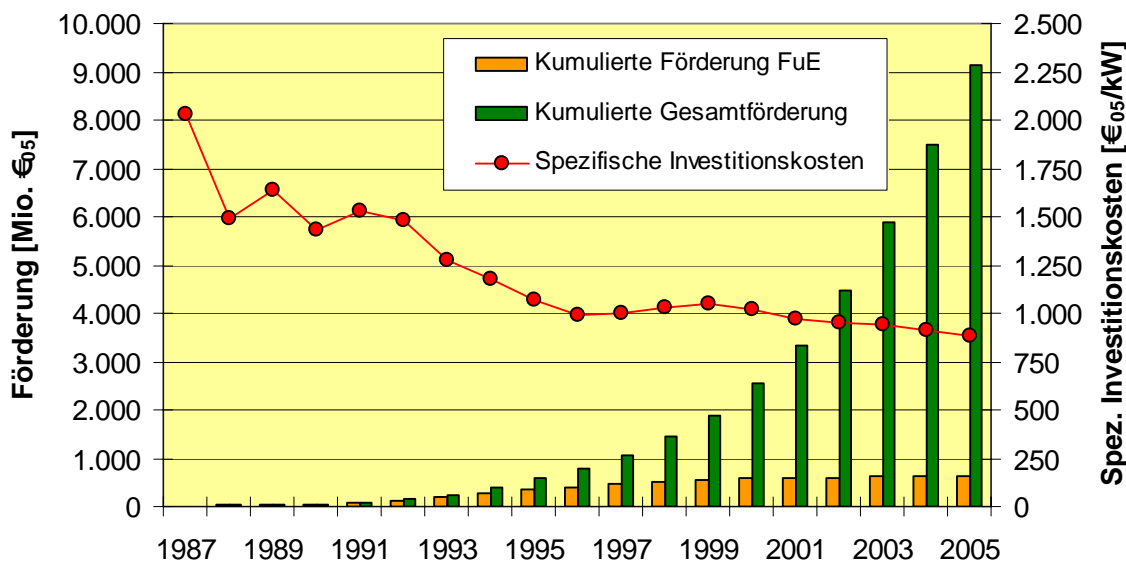
**Abb. 1-2** zeigt, dass ab 1994 die Ausgaben für Forschung und Entwicklung rückläufig sind und ab 1995 betragsmäßig von indirekten Investitionskostenzuschüssen und Einspeisevergütungen übertroffen werden. Insbesondere die Zahlungen nach dem StrEG bzw. EEG dominieren ab 1996 und liegen 2005 um etwa den Faktor 5 über der Summe aus FuE-Aufwendungen und indirekten Investitionskostenzuschüssen. Im Jahr 2005 beträgt die Summe der (bereinigten) EEG-Einspeisevergütungen für Windenergiestrom knapp 1.400 Mio. €₀₅.

Insgesamt beläuft sich die kumulierte Förderung der Windenergie seit 1987 bis einschließlich 2005 auf ca. 9,1 Mrd. €₀₅. Bei einer Summe von rund 125 TWh elektrischem Strom, die in dieser Zeit erzeugt wurden, bedeutet dies eine Förderung von rund 7,3 Cent₀₅/kWh. Das Fördervolumen wurde zu rund 7,14 Mrd. €₀₅ aus Einspeisevergütungen (ca. 78 %), zu rund 1,36 Mrd. €₀₅ aus Investitionskostenzuschüssen (ca. 15 %) und zu rund 640 Mio. €₀₅ aus Aufwendungen für Forschung und Entwicklung durch Bund und Bundesländer sowie das 250 MW-Wind-Förderprogramm (ca. 7 %) aufgebracht.



**Abb. 1-2:** Aufwendungen an Fördermitteln in Deutschland für die Windenergie 1987 – 2005 nach Förderinstrumenten (/Staiß 2003/, /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /Schneider; Kaltschmitt 2005/, /Lenz; Kaltschmitt 2006/)

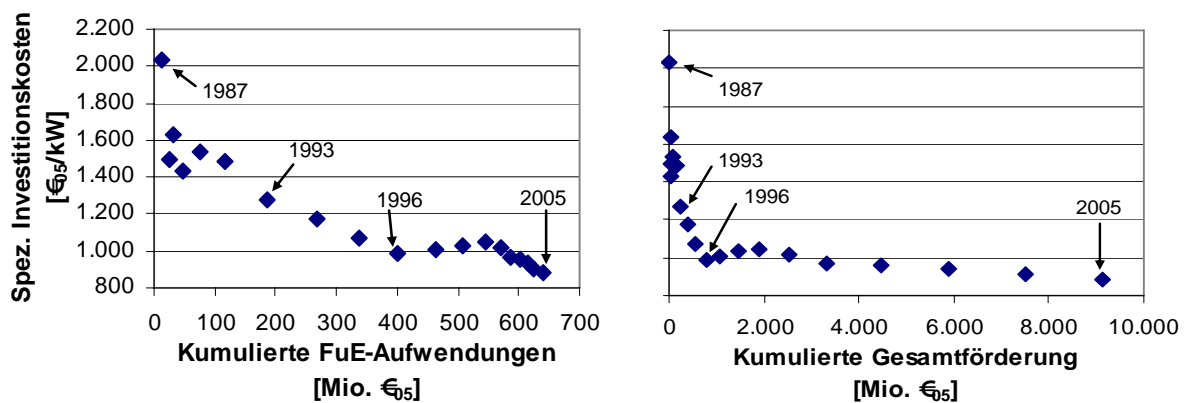
Wird neben der Entwicklung der Fördervolumina die Entwicklung der spezifischen Investitionskosten von Windenergieanlagen über den oben betrachteten Zeitraum untersucht, so zeigt sich der in **Abb. 1-3** dargestellte Verlauf.



**Abb. 1-3:** Entwicklung der kumulierten FuE- und Gesamtförderung der Windenergie und der spezifischen Investitionskosten für Windenergieanlagen in Deutschland von 1987 - 2005 (/Staiß 2003/, /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /Neij, Andersen et al. 2003/, /Schneider; Kaltschmitt 2005/, eigene Abschätzung)

Aus der Analyse des Zusammenhangs zwischen Förderung und spezifischen Investitionskosten kann nun auf die Effekte verschiedener Fördermaßnahmen hinsichtlich ökonomischer Kenndaten geschlossen werden.

Aus **Abb. 1-3** lässt sich bereits entnehmen, dass ab 1996 bei steigenden Fördersummen die spezifischen Investitionskosten stagnieren bzw. sogar leicht ansteigen. Da bis Mitte der 90er Jahre die Förderung durch FuE überwiegt, währenddessen danach die indirekten Investitionskostenzuschüsse wie auch Einspeisevergütungen als Förderinstrumente dominieren (vgl. **Abb. 1-2**), liegt der Schluss nahe, dass insbesondere Ausgaben für Forschung und Entwicklung die Reduktion der spezifischen Investitionskosten begünstigt haben. Zur Prüfung dieser These werden die spezifischen Investitionskosten den kumulierten Förderaufwendungen für FuE sowie der kumulierten Gesamtförderung gegenübergestellt (vgl. **Abb. 1-4**).



**Abb. 1-4:** Zusammenhang zwischen spezifischen Investitionskosten und kumulierten FuE-Aufwendungen bzw. kumulierter Gesamtförderung 1987 – 2005, Kumulation ab 1987 (/Staiß 2003/, /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /Neij, Andersen et al. 2003/, /Schneider; Kaltschmitt 2005/, eigene Abschätzung)

Von 1987 bis 1996 belaufen sich die kumulierten FuE-Aufwendungen auf rund 400 Mio. €<sub>05</sub> im Vergleich zu rund 790 Mio. €<sub>05</sub> Gesamtförderung, was einem Anteil von 51 % FuE-Aufwendungen an den Gesamtfördermitteln entspricht. In diesem Zeitraum erfolgt eine Reduktion der spezifischen Investitionskosten von rund 2.000 €<sub>05</sub>/kW auf knapp 1.000 €<sub>05</sub>/kW.

Wird lediglich der Zeitraum von 1987 bis 1993 betrachtet, bis zu dem ebenfalls bereits eine deutliche Reduktion der spezifischen Investitionskosten auf rund 1.250 €<sub>05</sub>/kW erfolgt ist, so berechnet sich gar ein Anteil von rund 74 % FuE-Aufwendungen an den Gesamtfördermitteln.

Eine multiple Regressionsanalyse mit den Daten des Zeitraums von 1987 bis 2005 führt zu der Regressionsgleichung:

$$K_{\text{spez}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot F_{\text{FuE,kum.}} + \beta_2 \cdot F_{\text{sonst,kum.}} \quad [K_{\text{spez}}] = \text{€}_{05}/\text{kW}$$

mit  $\beta_0 = 1.608 \pm 49$ ,  $\beta_1 = -1,276 \pm 0,167$ ,  $\beta_2 = 0,005 \pm 0,005$  und

$F_{\text{FuE,kum.}}$  : Kumulierte Förderung über Forschung und Entwicklung [Mio. €<sub>05</sub>]

$F_{\text{sonst,kum.}}$  : Kumulierte Förderung über indirekte Investitionskostenzuschüsse und Einspeisevergütungen [Mio. €<sub>05</sub>]

Die einzelnen Koeffizienten sind jeweils zusammen mit ihrem Standardfehler angegeben. In Bezug auf die EEG-Fördermittel wurden die gesamten während der Förderzeit von 20 Jahren anfallenden Einspeisevergütungen berücksichtigt.

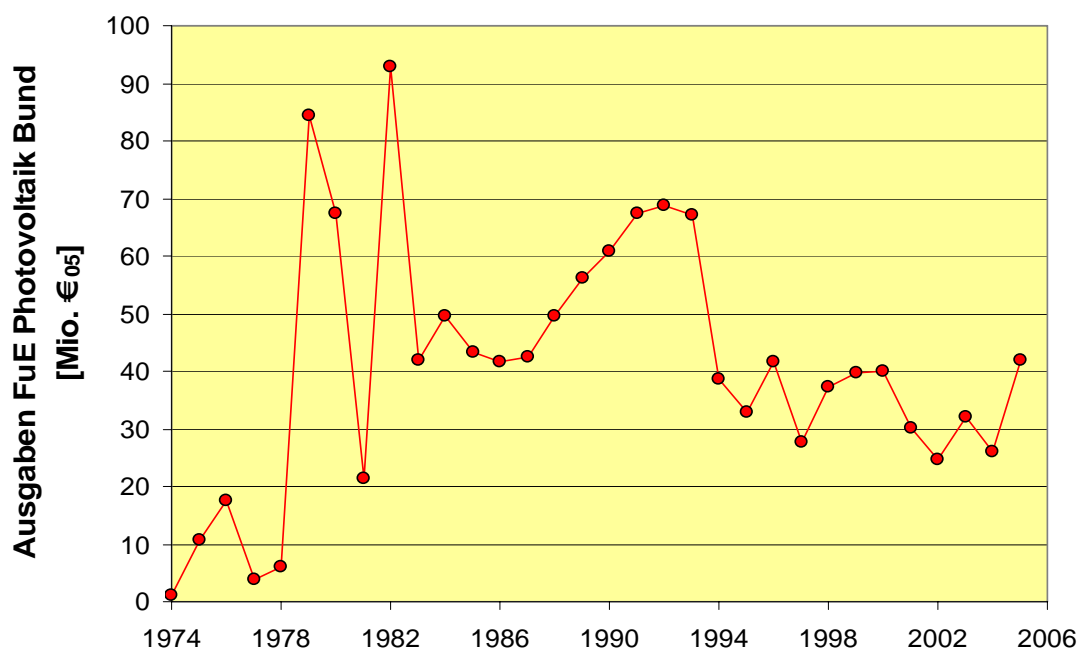
Während gemäß der Gleichung die kumulierte Förderung über FuE eine Senkung der spezifischen Investitionskosten bewirkt ( $\beta_1 < 0$ ), ist der Einfluss der Markteinführungsmittel angesichts der Größe des Standardfehlers von  $\beta_2$  nicht eindeutig zu bestimmen. Markteinführungsmittel können einen geringfügig die Investitionskosten erhöhenden Einfluss ausgeübt haben, ihr Einfluss kann allerdings auch vernachlässigbar sein.

Diese statistische Analyse stützt insgesamt die These, dass speziell die Aufwendungen für FuE zu einer Preisreduktion bei Windenergieanlagen geführt haben.

## 2 Einfluss der Förderung der photovoltaischen Strahlungsenergienutzung auf die Entwicklung der spezifischen PV-Modulpreise

Zwei grundsätzliche Arten von Förderinstrumenten haben zur Entwicklung und zum Ausbau der Photovoltaik in der Vergangenheit beigetragen. Zum einen die Förderung in Form von Forschung und Entwicklung, zum anderen die Förderung in Form von Markteinführungsprogrammen respektive Einspeisevergütungen.

**Abb. 2-1** veranschaulicht die Entwicklung der FuE-Ausgaben des Bundes über den Zeitraum zwischen 1974 und 2005.



**Abb. 2-1:** Ausgaben für FuE Photovoltaik auf Bundesebene zwischen 1974 und 2005 (Quellen: /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /BMU 2005/, /BMU 2006/, /IEA 2005/)

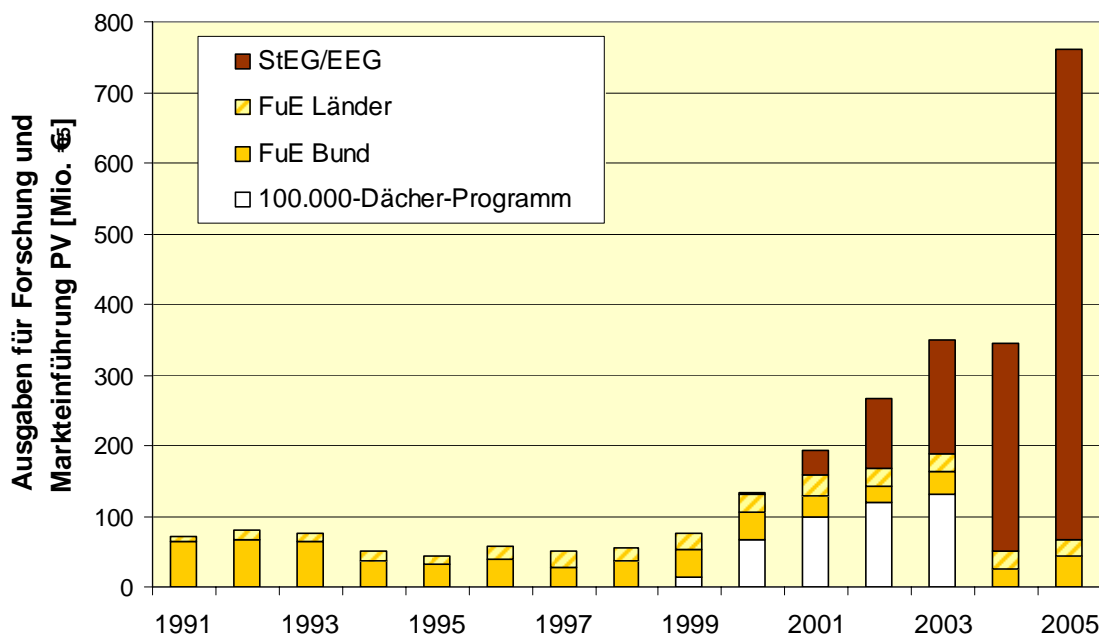
In den 70er-Jahren waren es speziell die beiden Ölkrisen, die den Blick auf terrestrische Anwendungen der Photovoltaik lenkten und angesichts der Abhängigkeit des Energiesystems von fossilen Energieträgern die Suche nach Alternativen forcierten. Entsprechend erklärt sich

der starke Anstieg des FuE-Budgets für die Photovoltaik in Deutschland Ende der 70er-Jahre (vgl. **Abb. 2-1**), während sich das Budget danach auf wesentlich niedrigerem Niveau stabilisiert.

Zuletzt bewegen sich die Aufwendungen des Bundes für FuE Photovoltaik in einem Bereich von rund 30 Mio. €<sub>5</sub> jährlich, bevor im Jahr 2005 ein Anstieg der FuE-Mittel auf rund 40 Mio. €<sub>5</sub> zu verzeichnen ist.

Erste Fördersummen zur Markteinführung fallen erst 1994 - wenige Jahre nach Einführung des Stromeinspeisegesetzes 1991 - an, die Summen erhöhen sich deutlich jedoch erst ab 1999 mit Beginn des 100.000 – Dächer – Programms bzw. 2000 mit In-Kraft-Treten des EEG. Bis zum Jahr 2005 ist die Förderung in Form von Einspeisevergütungen auf rund 700 Mio. €<sub>5</sub> angewachsen.

Wie sich im Zeitraum von 1991 bis 2005 die Fördersummen entwickelt haben, zeigt **Abb. 2-2**.

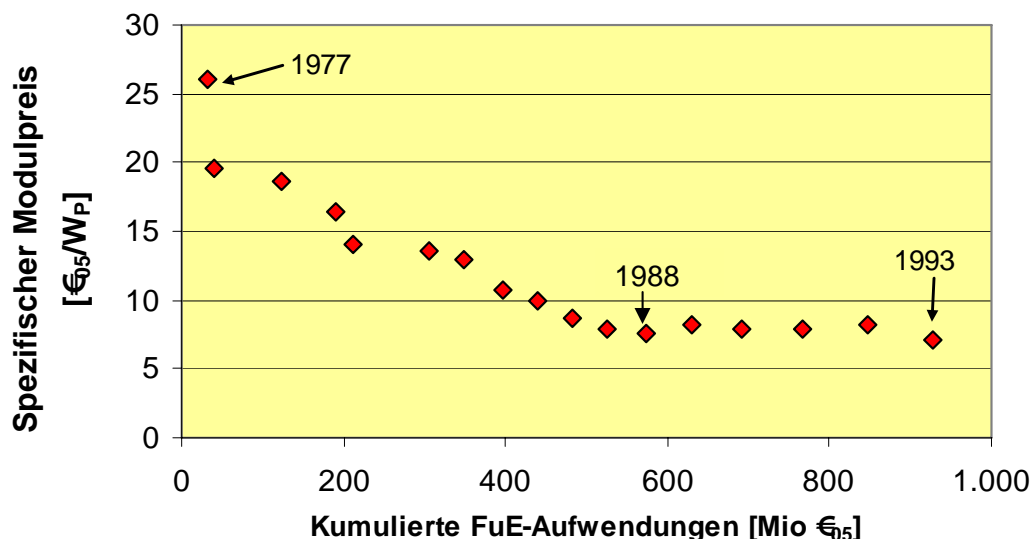


**Abb. 2-2:** Entwicklung der Fördersummen 1991 - 2005 (Quelle: /Staiß 2001/, /Schneider, Falkenberg et al. 2004/, /BMU 2005/, /BMU 2006/, /IEA 2005/; 2002-2005: Schätzwerte für FuE Länder)

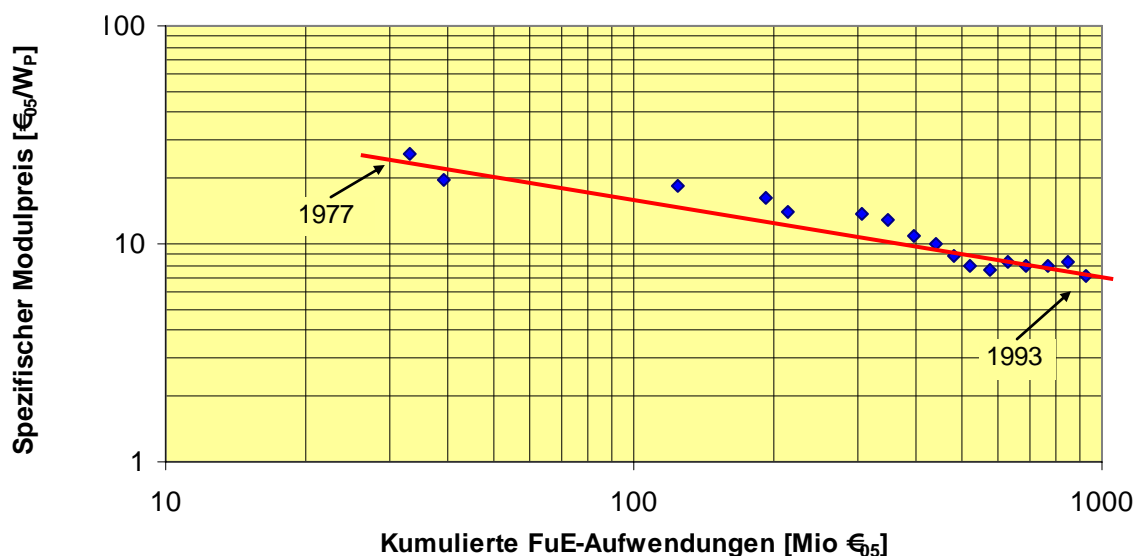
Wird die Entwicklung der Modulpreise ab 1977 bis einschließlich 1993 – solange noch keine Markteinführungsmittel geflossen sind - der kumulierten Förderung in Form von FuE gegenübergestellt, so erhält man **Abb. 2-3**.

Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der spezifischen Modulpreise mit zunehmenden kumulierten FuE-Fördervolumina bis 1988. Die zugehörige Lernkurve für den Zeitraum 1977 - 1993 ergibt eine Progress Ratio von  $0,768 \pm 0,018$ , entsprechend einer Reduktion der spezifischen Modulpreise von 23 % pro Verdopplung der kumulierten Fördersumme (vgl. **Abb. 2-4**).





**Abb. 2-3:** Zusammenhang zwischen spezifischen Modulpreisen und kumulierten FuE-Aufwendungen (Quellen: /Staiß; Knaupp 2000/, /Schmela 2003/, /Schmela 2004/, /Krampitz; Schmela 2003/, /Alsema 2003/, /Bernreuter 2004/, /Schmela; Siemer 2005/, /Kreutzmann; Siemer 2005/, /Hirshman; Schmela 2006/)



**Abb. 2-4:** Lernkurve zu spezifischen Modulpreisen und kumulierten FuE-Aufwendungen

Ab dem Jahr 1994 treten neben die Förderung in Form von FuE zusätzlich Markteinführungsmaßnahmen wie die Zahlung von Einspeisevergütungen gemäß StrEG, später EEG und das 100.000 – Dächer – Programm.

Aufgrund dieser Überlagerung unterschiedlicher Fördermaßnahmen wird für die Zeit von 1994 - 2005 eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt, um über diesen Weg die unterschiedlichen Einflüsse von FuE bzw. Markteinführungsprogrammen auf die Modulpreise deutlich zu machen. Dazu werden sowohl die Fördersummen in Form von FuE als auch in Form von Markteinführungsmaßnahmen ab 1994 kumuliert. In Bezug auf die EEG-Fördermittel werden jeweils die gesamten während der Förderzeit von 20 Jahren

## 8 Einfluss der Förderung auf die Kostenentwicklung von Windenergie- und PV-Anlagen

anfallenden Einspeisevergütungen berücksichtigt. Die Analyse führt zu der Regressionsgleichung:

$$P_{\text{spez}} = \beta_0 + \beta_1 \cdot F_{\text{FuE,kum}} + \beta_2 \cdot F_{\text{Markteinf,kum}} \quad [P_{\text{spez}}] = \text{€}_{05}/W_P$$

mit  $\beta_0 = 6,11 \pm 0,21$ ,  $\beta_1 = -0,00267 \pm 0,00065$ ,  $\beta_2 = 0,00001 \pm 0,00004$  und

$F_{\text{FuE,kum}}$  : kumulierte Förderung in Form von FuE [Mio. €<sub>05</sub>]

$F_{\text{Markteinf,kum}}$ : kumulierte Förderung über Markteinführungsmaßnahmen [Mio. €<sub>05</sub>]

Die einzelnen Koeffizienten sind jeweils zusammen mit ihrem Standardfehler angegeben.

Während gemäß der Gleichung die kumulierte Förderung in Form von FuE eine leichte Senkung der spezifischen Modulpreise bewirkt ( $\beta_1 < 0$ ), kann aufgrund des geringen Betrages von  $\beta_2$  und des zugehörigen Standardfehlers keine eindeutige Aussage über die Richtung des Einflusses von Geldern zur Markteinführung erfolgen. So können die Mittel zur Markteinführung zu einer geringen Erhöhung der spezifischen Modulpreise geführt haben, allerdings können sie auch einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Entwicklung der Preise gehabt haben.

In der Summe der beiden Betrachtungen über die Zeiträume von 1977 – 1993 und 1994 – 2005 kann gefolgert werden, dass FuE-Mittel einen bis 1993 erheblichen Einfluss, danach einen schwächeren, aber weiterhin senkenden Einfluss auf die Entwicklung der spezifischen PV-Modulpreise hatten.

## Literaturverzeichnis

- Alsema, E. (2003). PV Cost and development - PV experience curves from the PHOTEX database. PHOTEX workshop, 4. Juni 2003, Brüssel
- Bernreuter, J. (2004). "Den Löwenanteil nehmen die Bauern" - Schlüsselfertige Solarstromanlagen. In: Photon 04/2004: 74-87
- BMU (2005). Umwelt Nr. 4 / 2005 - Sonderteil: Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien, Jahresbericht 2005. Berlin, 2005
- BMU (2006). Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung (Stand: Mai 2006). Berlin, 2006
- Hirshman, W.P.; Schmela, M. (2006). Siliziummangel - na und? In: Photon 04/2006: 18-30
- International Energy Agency IEA (2005). Internet: <http://library.iea.org/rdd/eng/ReportFolders/Rfview/Explorerp.asp> (Stand: 13.12.2005)
- Krampitz, I.; Schmela, M. (2003). "It's the modules' fault." In: Photon international May 2003: 24-25
- Kreutzmann, A.; Siemer, J. (2005). Teure Exoten. In: Photon 04/2005: 80-91
- Lenz, V.; Kaltschmitt, M. (2006). "Erneuerbare Energien." In: BWK Bd. 58 (2006): 83-94
- Neij, L., P. D. Andersen et al. (2003). Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment. Lund, 2003
- Schmela, M. (2003). Ein ermutigendes Jahr - Marktübersicht zur weltweiten Solarzellenproduktion 2002. In: Photon 04/2003: 42-45
- Schmela, M. (2004). Sharp und der Rest der Welt - Markterhebung zur weltweiten Solarzellenproduktion 2003. In: Photon 04/2004: 18-22
- Schmela, M.; Siemer, J. (2005). Wachstum um die Wette. In: Photon 04/2005: 28-36
- Schneider, S., D. Falkenberg et al. (2004). Erneuerbare Energien. In: BWK Bd. 56 (2004): 75-84
- Schneider, S., Kaltschmitt, M. (2005). Erneuerbare Energien. In: BWK Bd. 57 (2005): 87-96
- Staiß, F., Knaupp, W. (2000). Photovoltaik - Ein Leitfaden für Anwender. Köln, 2000
- Staiß, F. (2003). Jahrbuch Erneuerbare Energien 2002/03. Radebeul, 2003