

## **Sozio-ökologisch-ökonomische Beurteilung handelbarer Zertifikate und garantierter Einspeisetarife für Ökostrom**

**Reinhard Madlener**

ETH Zürich, Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), Weinbergstrasse 11, CH-8092 Zürich  
Tel.: +41-1-632 06 52, Fax: +41-1-632 10 50, E-mail: reinhard.madlener@cepe.mavt.ethz.ch

**Sigrid Stagl**

WU Wien, Institut für Volkswirtschaftstheorie und -politik, Reithlegasse 16/1/4, A-1190 Wien  
Tel.: +43-1-313 36-5859, Fax: +43-1-313 36-5835, E-mail: sigrid.stagl@wu-wien.ac.at

### **Zusammenfassung**

Garantierte Einspeisetarife und Quotenregelungen in Verbindung mit handelbaren Zertifikaten für Ökostrom dienen vor allem einer an den kurzfristigen direkten Kosten orientierten Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. Sozio-ökologische und langfristige ökonomische Kriterien werden im Regelfall nicht explizit berücksichtigt. Im vorliegenden Beitrag stellen wir ein neuartiges Konzept vor, das zusätzlich zum Ziel der ökonomischen Effizienzsteigerung und mittels einer Multikriterienanalyse die explizite Berücksichtigung ökologischer, sozialer und langfristiger ökonomischer Ziele ermöglicht. Dies führt einerseits zu einer gezielten Reihung der verschiedenen Technologien nach ihrer sozio-ökologisch-ökonomischen Eignung, andererseits aber auch zu einer gewissen Objektivierung der Beurteilung. Das entwickelte Konzept, dessen praktische Umsetzbarkeit in Grundzügen kurz skizziert wird, eignet sich sowohl für Verbesserungen bei der Gestaltung von Einspeisetarifsystemen als auch von Quotenregelungen mit handelbaren Zertifikaten.

### **1. Einleitung**

Die Notwendigkeit einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen für die Bereitstellung von Energiedienstleistungen wird heute angesichts der erwarteten zahlreichen positiven Auswirkungen kaum mehr in Frage gestellt. Ebenso wenig wird die Notwendigkeit des Einsatzes geeigneter Förderinstrumente in Zweifel gezogen, um die Bereitstellung wirtschaftlich attraktiver zu gestalten bzw. überhaupt erst zu ermöglichen. Weit weniger Einigkeit herrscht hingegen – insbesondere im Hinblick auf die vielerorts vorangetriebene Liberalisierung der Energiemärkte – darüber, ob bei der direkten monetären Förderung der Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energieträgern Systemen mit garantierten Einspeisetarifen, oder aber Quotenregelungen in Verbindung mit handelbaren Zertifikaten der Vorzug gegeben werden sollte.<sup>1</sup>

Auf europäischer Ebene haben die Diskussionen rund um die geplante Einführung einer EU-Richtlinie zur Förderung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern verdeutlicht, dass eine rasche EU- bzw. europaweite Harmonisierung des eingesetzten Förderinstrumentariums äußerst schwer zu realisieren sein wird, und die Koexistenz unterschiedlicher nationaler Systeme (Betonung des Subsidiaritätsprinzips) zu Kompatibilitätsproblemen im internationalen Verbund der Politiken und des Handels führen kann. Einerseits ist man im Sinne einer auf marktwirtschaftlichen Prinzipien basierenden Integrationspolitik bestrebt, die durch garantierte Preise und zunehmende Anteile der Erneuerbaren am Gesamtenergieaufkommen verstärkt auftretenden Marktverzerrungen zu minimieren und die Liberalisierung und Harmonisierung in Richtung eines europäischen Binnenmarktes für Strom weiter voranzutreiben. Andererseits ist es von entscheidender Bedeutung, durch stabile und ausreichend

---

<sup>1</sup> Für eine Diskussion der Vor- und Nachteile der Förderung von Investitions- versus Betriebskosten von Anlagen zur Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energieträgern siehe beispielsweise Wohlgemuth/Madlener (2000).

attraktive Rahmenbedingungen eine gewisse Planungssicherheit und auch Rentabilität für die Betreiber von Erzeugungsanlagen zu gewährleisten, und insbesondere auch kleineren, dezentralen Anbietern von Ökostrom Überlebenschancen im härter werdenden Wettbewerb zu bieten. Es ist daher nicht allzu verwunderlich, dass sich die Entwicklung einer Richtlinie der EU zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen langwierig und mühsam gestaltet hat, und man sich zumindest vorläufig noch nicht auf ein einheitliches, EU-weit verpflichtend einzuführendes Förderinstrument einigen konnte (Europäische Kommission 1998, 1999, 2000).

Garantierte Einspeisetarife und Quotenregelungen in Verbindung mit handelbaren Zertifikaten für Ökostrom dienen vor allem einer an den kurzfristigen und direkt den Unternehmen zugerechneten Kosten orientierten Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern. Sozio-ökologische und langfristige ökonomische Kriterien werden in der Regel kaum oder zumindest nicht explizit berücksichtigt. Außerdem besteht bei handelbaren Zertifikaten die Gefahr, dass sich infolge der Orientierung an den kurzfristigen Grenzkosten nur relativ wenige Technologien (im Extremfall eine einzige!) am Markt durchsetzen können, wodurch die Diversität der Erzeugungsstruktur leidet.

Da die Diskussion über die gängigen Förderinstrumente (d.h. Einspeisevergütungen, Quotenregelungen mit handelbaren Zertifikaten, Ausschreibungsmodelle) in der Regel rein kostenorientiert und damit eindimensional abläuft, wurde der unterschiedlichen kurz- und langfristigen Umwelt- und Sozialverträglichkeit der einzelnen erneuerbaren Energietechnologien bislang relativ wenig Beachtung geschenkt. Erst in neuerer Zeit kommt es zu einer zunehmenden Differenzierung, die einerseits auch die oft vernachlässigten negativen Implikationen des Einsatzes von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energieträger entsprechend thematisiert (Abbasi/Abbasi 2000), und andererseits Weiterentwicklungen der Förderinstrumente in Richtung einer mehrdimensionalen Betrachtungsweise Auftrieb verleiht. Bislang konzentrierten sich diese Anstrengungen allerdings hauptsächlich auf den unterschiedlichen Beitrag der erneuerbaren Energietechnologien für den Klimaschutz (Drillisch 1999; Morthorst 2000a, 2001).

Im vorliegenden Beitrag stellen wir ein neuartiges, alternatives Konzept vor, das – aufbauend auf einer Bewertung der in Betracht gezogenen Erzeugungstechnologien nach einem an sozio-ökologisch-ökonomischen Kriterien ausgerichteten Nachhaltigkeitsindex – zusätzlich zum lediglich an den kurzfristigen Erzeugungskosten orientierten Ziel einer Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energieträger explizit auch ökologische, soziale und langfristige ökonomische Ziele zu berücksichtigen vermag. Der Beitrag knüpft an die in Madlener/Stagl (2000) erstmals vorgestellten theoriegestützten Überlegungen an. Die systematische Anwendung des Konzepts bietet zwei entscheidende Vorteile gegenüber konventionelleren Ansätzen: auf der einen Seite führt es zu einer erhöhten Transparenz und Objektivierung bei der Bewertung der einzelnen Technologien, auf der anderen Seite aber auch zu einer gezielten Reihung nach ihrer (von den jeweiligen gesellschaftlichen Präferenzen abhängigen) sozio-ökologisch-ökonomischen Eignung. Der Nachteil liegt in dem durch die Berücksichtigung multipler Kriterien naturgemäß höheren Aufwand bei der konkreten Ausgestaltung der Instrumente. Anhand erster empirischer Ergebnisse skizzieren wir die Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Ansatzes im praktischen Einsatz, der gleichsam für eine verbesserte Ausgestaltung von Systemen mit handelbaren Zertifikaten als auch garantierten Einspeisetarifen angewendet werden kann.

## 2. Sozio-ökologisch-ökonomische Betrachtung erzeugungsorientierter Förderinstrumente für Ökostrom

In diesem Abschnitt sollen wichtige Aspekte von garantierten Einspeisetarifen und Quotenregelungen mit handelbaren Zertifikaten für Ökostrom im Lichte einer sozio-ökologisch-ökonomischen Betrachtungsweise dargestellt werden; für eine theoretische Fundierung siehe Madlener/Stagl (2000).

Auf eine möglichst umfassende allgemeine Diskussion der genannten Instrumente muss aus Platzgründen verzichtet werden; stattdessen verweisen wir auf die mittlerweile recht zahlreichen einschlägigen Arbeiten zu diesem Themenbereich (vgl. Kühn/Bräuer 2000; Madlener 2000; Morthorst 2000b; Kühn et al. 1999; Schaeffer et al. 1999; Madlener/Fouquet 1999; Drillisch 1998, 1999; Menges 1998 u.a.m.). Ebenso ausgeklammert bleiben Ausschreibungsmodelle, auf die das hier vorgestellte Konzept jedoch prinzipiell ohne Schwierigkeiten übertragen werden kann.

### 2.1 Systeme mit garantierten Einspeisetarifen

In einem System mit garantierten und für eine bestimmte Zeitspanne festen Einspeisetarifen unterliegen die Netzbetreiber einer Abnahmeverpflichtung für aus regenerativen Quellen erzeugten Strom („Ökostrom“). Den Erzeugern wiederum wird für die Bereitstellung ihres Ökostromes nach einem in der Regel technologie- und tages- bzw. jahreszeitlich differenzierten Tarifschema pro gelieferter Kilowattstunde eine garantierte Vergütung gewährt.

Einspeisetarifsysteme für Ökostrom haben sich – wie etwa in Dänemark und Deutschland im Falle der Windenergie – als sehr *effektiv* (im Sinne eines hohen Zielerreichungsgrades) erwiesen, was jedoch nicht mit *effizient* (im Sinne von wirtschaftlich) gleichgesetzt werden darf. Der regulatorische und administrative Aufwand kann zumindest in einfachen Systemen (d.h. solchen ohne laufende dynamische Anpassung entsprechend der technologiespezifischen Kostenentwicklung) als verhältnismäßig gering bezeichnet werden. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass durch garantierte Einspeisetarife weder Wettbewerb induziert, noch in ausreichendem Ausmaß Anreize für Innovationen geschaffen werden. Außerdem ist es sehr schwierig, für jede geförderte Technologie das optimale Förderniveau zu finden und dieses entsprechend der verzeichneten Kostenentwicklung in adäquater Weise anzupassen (d.h. oft genug, um sich nicht zu weit vom ermittelten Optimum zu entfernen, aber nicht so oft, dass die Kreditgeber/Investoren bzw. die Betreiber zu sehr verunsichert werden). Einen diesbezüglich viel beachteten Ansatz hat man im deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2000) gewählt, nach dem die Einspeisetarife bestimmter Technologien – klar vorhersehbar – ab 2002 jährlich um ein bestimmtes Maß gekürzt werden sollen (Biomasse 1 %, Windenergie 1,5 %, Photovoltaik 5 %).

Im Falle garantierter Einspeisetarife hängt es also von den Fähigkeiten der politischen Entscheidungsträger ab, ob zumindest ein gewisser Grad an ökonomischer Effizienz erreicht wird (z.B. wie im EEG durch Kürzung der Tarife entsprechend dem erwarteten technologischen Fortschritt), ob zumindest ein gewisser Grad an Diversität erreicht wird (durch Anpassung des Kataloges der förderbaren Technologien), und ob beispielsweise angestrebte umwelt-, industrie- und gesellschaftspolitische Ziele erreicht werden. Ein impliziter Nachteil dieses preisgesteuerten Instruments ist es, dass (politisch gut verwertbare) Mengenziele nicht mit Sicherheit erreicht werden können.

Es ist relativ einfach, ein bereits existierendes Einspeisetarifschema mit dem Ergebnis aus einer (in Abschnitt 3 skizzierten) sozio-ökologisch-ökonomischen Bewertung zu modifizieren. Obwohl die von uns vorgeschlagene Methode zwei der wesentlichsten Nachteile von garantierten Einspeisetarifen nicht beseitigen kann (mangelnder Anreiz für Effizienzsteigerungen, keine Gewähr für Mengenzielerreichung), kann damit zumindest

verhindert werden, dass Technologien mit stark negativem sozio-ökologisch-ökonomischem Einfluss unverhältnismäßig hohe Einspeisetarife erhalten.

## **2.2 Quotensysteme mit handelbaren Zertifikaten**

Das energiepolitische und wissenschaftliche Interesse an Quotensystemen in Verbindung mit handelbaren Zertifikaten für Ökostrom hat in den letzten Jahren nicht zuletzt durch die seitens der EU geäußerte Präferenz für Zertifikathandelsmodelle (vgl. Europäische Kommission 1998, 1999, 2000) massiv zugenommen. Im nordamerikanischen Sprachraum sind derartige Ökostrom-Quotensysteme vor allem als „Renewable Portfolio Standard“ (RPS) bekannt geworden (vgl. Berry/Jaccard 2001; Rader/Norgaard 1996).

Bei Systemen mit handelbaren Zertifikaten für Ökostrom, die auf der Festlegung von politisch determinierten Quoten beruhen, werden die Endverbraucher (bzw. alternativ die Stromlieferanten) verpflichtet, pro Periode eine bestimmte, der Stromverbrauchsmenge entsprechende Anzahl von Zertifikaten vorzuweisen. Die Möglichkeit des Handels mit Zertifikaten führt zur Bildung eines Zertifikatmarktes, auf dem die Anbieter und Nachfrager von Ökostromzertifikaten miteinander in Konkurrenz treten. Dies führt zu einer Flexibilisierung, und im Falle unterschiedlicher Erzeugungskosten zu einer Minimierung der Grenzkosten (*statische Effizienz*), andererseits werden Innovationen gefördert (*dynamische Effizienz*) und Anreize für den Markteintritt neuer Anbieter geschaffen.

Zur tatsächlichen Erreichung der festgelegten Quote ist die Androhung ausreichend hoher Strafen (d.h. deutlich höher als die Grenzkosten der Erzeugung) für den Fall der Nichterfüllung unabdingbar. Außerdem muss die Herkunft und Qualität des Ökostromes durch eine glaubwürdige Registrierung und Zertifizierung festgestellt werden, um Missbrauch (z.B. durch Mehrfachzählungen) vorzubeugen.

Durch den Besitztitel an den Zertifikaten kommt es zu einer Trennung zwischen dem physikalischen Markt für Ökostrom und dem finanziellen Markt für die Zertifikate. Ohne Abnahmeverpflichtung für den physikalischen Strom herrscht auf beiden Märkten Wettbewerb. Ein derartiger, auf einer Quotenverpflichtung beruhender Markt unterscheidet sich ganz wesentlich von Systemen, bei denen einzelne Konsumenten freiwillig dazu bereit sind, einen gewissen Mehrpreis für „grünen“ Strom zu bezahlen (vgl. Markard/Truffer 1999; Öko-Institut 1999; Markard 1998; Weller 1998; u.a.m.). Zertifikate für Ökostrom repräsentieren den zusätzlichen externen Nutzen von Ökostrom, der zum Beispiel durch die Vermeidung von Luftschadstoffemissionen, oder etwa dank zusätzlicher dezentraler Erzeugung unter Umständen resultierender Kostenreduktionen im Verteilnetz hervorgerufen werden.

Prinzipiell können zwei Methoden unterschieden werden, um zu vermeiden, dass höherpreisige Technologien von billigeren Technologien verdrängt werden: (a) Bildung von Technologiegruppen und (b) Bewertung anhand des sozio-ökologisch-ökonomischen Einflusses. Bildet man eine gewisse Anzahl von Technologiegruppen, in denen ähnlich wettbewerbsfähige Technologien zusammengefasst werden, so wird das System unweigerlich komplexer und der administrative Aufwand und die Transaktionskosten steigen. Außerdem leidet die Liquidität des Zertifikatmarktes darunter, da in so einem Fall mehrere Arten von Zertifikaten (und mehrere Einzel- bzw. Subquoten) nebeneinander existieren, was zu weiteren Effizienzverlusten führt. Der entscheidende Vorteil einer dem sozio-ökologisch-ökonomischen Einfluss entsprechenden Bewertung im Vergleich zur Bildung von Technologiegruppen liegt gerade darin begründet, dass es nur einen Zertifikatmarkt gibt, sodass in einem wesentlich liquideren Markt derselbe Diversifikationseffekt erzielt werden kann.

Weiters ist zu beachten, dass sich erneuerbare Energietechnologien in der Regel in unterschiedlichen Stadien der technologischen Entwicklung bzw. Marktfähigkeit befinden.

Deshalb ist ein Wettbewerbssystem, das auf diesen Umstand keine Rücksicht nimmt, nicht besonders sinnvoll, weil es zu einer Diskriminierung der weniger entwickelten (und daher in der Regel weniger konkurrenzfähigen) Technologien kommen würde (vgl. Mitchell 1996, 1999; Grubb/Vigotti 1997; Voß/Dicke 2000). Im vorgeschlagenen Bewertungsmodell wird diese Dimension nicht automatisch berücksichtigt, kann aber durch eine explizite und transparente Entscheidungsstruktur zugunsten einer Priorisierung der einen oder anderen vielversprechenden Technologie korrigiert werden.

### **3. Kriterien ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit und deren Gewichtung**

Unabhängig davon, für welches der oben beschriebenen Instrumente man sich entscheidet, werden beispielsweise physische Unterschiede in der Ressourcenintensität (z.B. Schadstoffemissionen, Landverbrauch, etc.) oder die Wahlmöglichkeiten zukünftiger Generationen in liberalisierten Märkten meist nur unzureichend bzw. nicht explizit berücksichtigt.

In diesem Abschnitt widmen wir uns der Frage, wie man zusätzlich zu den kurzfristigen ökonomischen Kriterien auch biophysische und sozio-ökonomische Kriterien in Systeme mit garantierten Einspeisetarifen bzw. Quotenregelungen mit handelbaren Zertifikaten einbauen kann. Dies bedeutet, dass man die verschiedenen, zur Disposition stehenden Technologieoptionen anhand einer ganzen Palette von Qualitätskriterien zu bewerten bzw. zu beurteilen versucht. Diese Qualitätskriterien werden mittels Indikatoren gemessen, und sollten idealerweise auf Daten aus Lebenszyklusanalysen basieren – d.h. sowohl die direkten als auch die indirekten Emissionen und Abfälle aus dem vor- und nachgelagerten Energie- und Materialeinsatz berücksichtigen.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft, wie ein solches Schema sozio-ökologisch-ökonomischer Einflussfaktoren und deren relative Gewichtung aussehen könnte, welches in weiterer Folge als Grundlage für die Ermittlung der gesellschaftlichen Präferenzen und die Gestaltung qualitativ verbesserter Fördersysteme herangezogen werden kann. Wichtig ist dabei, dass positive (z.B. Schaffung/Erhalt von Arbeitsplätzen) und negative (z.B. Schadstoffemissionen) Einflussfaktoren derart aggregiert werden, dass sie sich nach Möglichkeit nicht gegenseitig aufheben; dies kann beispielsweise durch die Einführung von Minimalwerten (zumindest teilweise) realisiert werden.

Sowohl die Zusammenstellung der Kriterien und deren relative Gewichtung als auch die verwendeten Daten sind naturgemäß nicht immun gegenüber Kritik. Zudem sind die Daten oft mit hohen Unsicherheiten behaftet, sodass bei entsprechend großem Datenbedarf das Risiko besteht, dass ein Teil der Bewertung in die Phase der Datenerhebung bzw. -aufbereitung vorverlagert wird. Derartigen Problemen kann man mit „weichen“ Beurteilungen entgegengetreten – z.B. unter Zuhilfenahme von Noten- oder verbalen Beurteilungsskalen.

### **4. Bestimmung der gesellschaftlichen Präferenzen**

Die in Abschnitt 3 beschriebene und normalerweise unter Beiziehung von einschlägigen ExpertInnen zu erstellende Einflussfaktoren-Matrix dient als Basis für die Bestimmung der gesellschaftlichen Präferenzen mittels einer sogenannten Multikriteriellen Entscheidungshilfe (MKEH). Es dürfte klar sein, dass die Bestimmung von gesellschaftlichen Präferenzen nicht ohne Feldforschung möglich ist. Dazu kann man entweder Interviews mit den Entscheidungsträgern und/oder den durch ein Energieversorgungsprojekt unmittelbar Betroffenen durchführen, oder Gruppenentscheidungsfindungs-Techniken anwenden. Letzteres erfreut sich wachsender Beliebtheit. MKEH stellt eine gängige Methode für derartige Untersuchungen dar (De Montis/De Toro et al. 2000), die sich auch in energiewirtschaftlichen Untersuchungen einer wachsenden Beliebtheit erfreut (vgl. Karni et al. 1992). Zumeist wird dabei mit *kardinalen* Rangfolgen gearbeitet, da mit Hilfe von

ordinalen Rangordnungen lediglich die Reihenfolge der Präferenzen, nicht aber das Ausmaß der Bevorzugung zum Ausdruck kommt.

**Tabelle 1:** Sozio-ökologische-ökonomische Einflussfaktoren und deren relative Gewichtung (fiktive Werte zur Illustration)

Kriterium	Erneuerbare Energie-Technologie			
	A	B	...	N
<b>BIOPHYSISCHE DIMENSION</b>				
<b>Inputfaktoren</b>				
- Intensität der Landnutzung / Landverbrauch	Niedrig	mittel	...	...
- Intensität der Wassernutzung / Wasserverbrauch	Hoch	hoch	...	...
- Materialintensität (z.B. seltene / schwere Materialien)	5	3	...	...
- Indirekter Energiebedarf	groß	sehr groß	...	...
<b>Produktionsauswirkungen (potenziell)</b>				
- Einfluss auf die Biosphäre	1	3	...	...
- Umweltrisiken (z.B. Grundwasserbeeinträchtigung)	2	2	...	...
- Lärm	laut	sehr laut	...	...
- Visuelle Beeinträchtigung	marginal	bedeutend	...	...
- Einfluss auf das Mikroklima	4	5	...	...
- Einfluss auf die Bodenproduktivität	6	7	...	...
- Umsiedlungen	1	2	...	...
<b>Auswirkungen von Energieumwandlung und -einsatz</b>				
- Schadstoff-/Treibhausgasemissionen (z.B. SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , VOC, Partikel; CO <sub>2</sub> )	7	9	...	...
- Organische Emissionen (z.B. Dioxine, krebserregende Substanzen, etc.)	2	8	...	...
- Treibhausgase	4	5	...	...
- Abfall (z.B. Flugasche)	5	3	...	...
- Wasserverschmutzung	1	1	...	...
- Negative Auswirkungen auf Boden und Wasser	2	4	...	...
- Andere Gefahren (z.B. Brandrisiken, Aussetzung gg. giftigen Substanzen)	7	5	...	...
<b>SOZIO-ÖKONOMISCHE DIMENSION</b>				
- Arbeitsplätze	1.000	1.500	...	...
- Arbeitsplatzgefahren	gering	mittel	...	...
- Einfluss auf lokale Armut	6	7	...	...
- Ungleichheit der Haushaltseinkommen	3	2	...	...
- Demokratische Kontrolle über die Märkte	4	5	...	...
- Sicherheit der Energieversorgung	2	3	...	...
- Einfluss auf Leistungs- bzw. Handelsbilanz	7	4	...	...
- Langfristige ökonomische Sinnhaftigkeit / Rentabilität	300	550	...	...
- Lokaler Mehrwert	1.250	1370	...	...

Anmerkungen: Die Kriterien werden in verschiedenen Einheiten gemessen (z.B. Anzahl der geschaffenen Arbeitsplätze, Mehrwert in Geldeinheiten oder sprachlichen Bewertungen; beispielsweise pro erzeugter MWh oder pro MW Leistung).

Quelle: Madlener/Stagl (2000).

In der Literatur findet sich mittlerweile eine Vielzahl von unterschiedlichen MKEH-Methoden (Algorithmen und Software-Pakete), die sich je nach Einsatzzweck in Ihrer Eignung stark voneinander unterscheiden (vgl. Guitouni/Martel). Das Ergebnis derartiger Methoden ist eine Reihung der betrachteten Technologien entsprechend ihrem sozio-ökologisch-ökonomischen Einfluss.

In der folgenden Analyse haben wir aus der Methodenvielfalt AHP (Analytic Hierarchy Process; vgl. Saaty 1980, 1992; Saaty/Alexander 1989) gewählt, weil diese als eine der wenigen Methoden eine kardinale Messung versucht. Dieses Charakteristikum ist im konkreten Anwendungsfall hilfreich, da diese Methode versucht nicht nur Reihung der Technologien zu liefern sondern auch über das Ausmaß der Differenz in der Reihung Auskunft zu geben. Grundlegende Charakteristika sind: (a) Strukturierung komplexer

Probleme als Hierarchie und (b) paarweise, relative Vergleiche. Gewichtungen werden durch verbal oder numerische kommunizierte Bewertungen abgeleitet. Das entsprechende Softwarepaket ist Expert Choice 2000. Es sollte jedoch nicht vergessen werden, dass gerade AHP auf starken Annahmen beruht, die unter Umständen problematisch sein können. Außerdem sind viele der Auswirkungen mit großen Unsicherheiten behaftet, was die Erstellung einer kompletten Einflusstabelle erschwert (einen Ausweg kann der Einsatz von sog. „fuzzy sets“ liefern, vgl. Munda 1995). Letztendlich sinkt die Praktikabilität des hier vorgestellten Ansatzes mit zunehmender Größe der Kriterientabelle bzw. zunehmendem Aufwand bei der Quantifizierung der einzelnen Kriterien, da der Aufwand bei der Ermittlung der Einflüsse und in weiterer Folge der gesellschaftlichen Präferenzen entsprechend steigt.

## 5. Praktische Umsetzung und vorläufige Ergebnisse

In einem ersten Anlauf in Richtung einer Überprüfung der Praxistauglichkeit der von uns vorgeschlagenen Methode haben wir versucht, mit Hilfe des Modells GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme; Öko-Institut 1998) für eine gegebene Auswahl an Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern Einflussfaktoren zu finden, die in weiterer Folge mittels MKEH zur Ermittlung der gesellschaftlichen Präferenzen herangezogen werden können (vgl. Tabelle 2).

Leider enthält auch die neueste verfügbare Version von GEMIS (Version 4.0b) zwar biophysische, aber nur wenige ökonomische und keine sozialen Kriterien, welche für eine umfassende Bewertung der einzelnen Technologien in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit nötig wären. In Fortführung des unseren Untersuchungen zugrunde liegenden Forschungsprojektes sollen daher die für die Einbeziehung zusätzlicher Kriterien fehlenden Daten so weit wie möglich erhoben und in die Analyse integriert werden. Zudem liegen uns derzeit noch keine exakten Beschreibungen der den GEMIS-Ergebnissen zugrunde liegenden technologiebezogenen Annahmen vor (beispielsweise hängen die in Tabelle 2 angegebenen Werte ganz wesentlich vom angenommenen Energieträgermix ab, sodass eine Übertragbarkeit von einem Land auf ein anderes nicht ohne weiteres gegeben ist).

Tabelle 3 zeigt das vorläufige Ergebnis einer solchen Bewertung, die die sozio-ökologisch-ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Energietechnologien widerspiegelt und für die Konstruktion eines Nachhaltigkeitsindex verwendet werden kann. Abbildung 1 zeigt den Beitrag der jeweiligen Unterziele zur Gesamtbewertung. In Ermangelung weiterer Informationen über die spezifische Bedeutung, die den einzelnen Kriteriengruppen (Luftschadstoffe, Treibhausgase, kumulierter Energieaufwand, kumulierter Stoffaufwand, Abwasserschadstoffe, feste Reststoffe, Flächeninanspruchnahme, langfristige Rentabilität) von ExpertInnen beigemessen wird, haben wir zur Illustration unserer Methode alle Kriterien gleichgewichtet in die Berechnungen einfließen lassen. Die gewonnenen Resultate können in weiterer Folge zum Design eines differenzierteren Fördersystems für Strom aus erneuerbaren Energieträgern herangezogen werden. Legt man beispielsweise fest, wie hoch die Zahl der ausgegebenen Zertifikate oder die Einspeisetarife pro Kilowattstunde minimal bzw. maximal sein soll, so können die dazwischen liegenden Werte auf einfache Weise mit Hilfe der in den Tabelle 3 bzw. Abbildung 1 dargestellten Resultate ermittelt werden.

**Tabelle 2:** Einflussfaktoren der Strombereitstellung aus ausgewählten Erneuerbaren-Technologien für Deutschland (Auswahl; in g/kWh, sofern nicht anders angegeben)

Technologie*	A	B	D	E	G	H	J	K	L	N
Kriterium	Hydro klein	Hydro klein-r.	Hydro groß	Wind klein	Wind groß	Holzgas GT klein	Holzgas DT klein	Stückholz DT groß	PV mono	PV amorph
<b>LUFTSCHADSTOFFE</b>										
- Ozon-Vorläufer-Äq.	0,005	0,007	0,111	0,062	0,077	5,480	2,439	4,127	0,336	0,449
- SO <sub>2</sub> -Äq.	0,004	0,005	0,072	0,041	0,051	2,679	2,168	2,876	0,371	0,444
- Staub	0,001	0,001	0,016	0,009	0,012	0,139	5,195	0,140	0,106	0,132
<b>TREIBHAUSGASE</b>										
- CO <sub>2</sub> -Äq.	1,478	1,927	40,112	17,499	23,947	196,688	70,394	47,185	174,237	145,606
<b>KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND (KEA) (in kWh/kWh)</b>										
- KEA, nicht erneuerbar	0,003	0,004	0,058	0,031	0,041	0,678	0,044	0,029	0,547	0,439
- KEA, erneuerbar	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,009	0,000	0,000	1,016	1,014
- KEA, andere	0,000	0,001	0,003	0,003	0,003	4,054	6,667	4,469	0,058	0,042
<b>KUMULIERTER STOFF-AUFWAND (KSA)</b>										
- KSA, nicht erneuerbar	1,922	2,478	62,996	24,292	34,682	6,488	0,495	0,332	91,782	166,192
- KSA, erneuerbar	6,225	8,347	77,934	48,829	65,102	780,484	4,071	2,729	1311,822	1289,557
- KSA, andere	0,150	0,204	0,548	0,852	1,064	0,576	0,095	0,064	6,651	9,219
<b>FESTE RESTSTOFFE</b>										
- Asche	0,008	0,010	0,342	0,108	0,167	10,127	0,009	13,424	10,823	5,011
- REA-Reststoff	0,002	0,002	0,071	0,020	0,034	2,215	0,002	0,001	2,274	0,978
- Klärschlamm	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,014	0,003	0,002	0,003	0,003
- Prod.-Abfall	0,180	0,245	0,795	1,059	1,333	3,790	0,115	0,077	10,257	13,717
- Abraum	2,053	2,677	55,149	22,598	32,260	429,345	1,010	0,677	490,490	282,087
- Müll, atomar (hochaktiv) (× 10 <sup>-3</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>ABWASSERSCHADSTOFFE</b>										
- P (× 10 <sup>-6</sup> )	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
- N (× 10 <sup>-6</sup> )	0,000	0,000	0,002	0,003	0,002	0,034	0,007	0,005	0,010	0,013
- AOX (× 10 <sup>-6</sup> )	0,004	0,005	0,014	0,022	0,027	0,015	0,002	0,002	0,110	0,212
- CSB	0,014	0,019	0,050	0,078	0,097	0,053	0,009	0,006	0,427	0,813
- BSB5	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,002	0,000	0,000	0,012	0,023
- Salze, anorganisch	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,512	1,758
<b>FLÄCHEN-INANSPRUCHNAHME</b>										
- (in m <sup>2</sup> /kWh)	0,002	0,002	0,063	0,021	0,032	2,456	0,000	0,000	0,263	0,916
<b>ÖKONOMISCH</b>										
- Rentabilität, langfristig	15.598	20.325	12.194	20.875	14.116	39.647	27.257	20.006	109.019	92.989

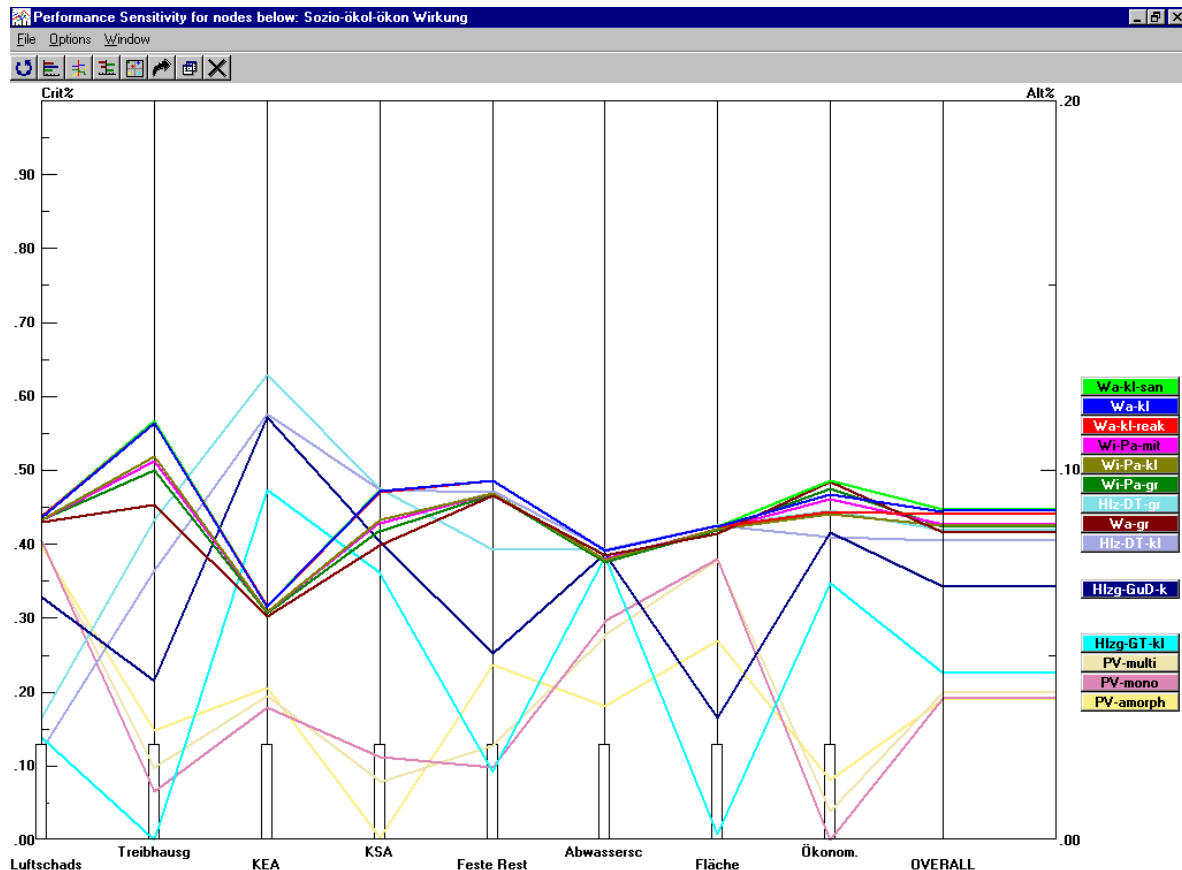
Anmerkungen: Siehe Anhang für eine Kurzbeschreibung der betrachteten Technologien. Ergebnisse auf Basis GEMIS Version 4.0b, gesamter Lebenszyklus inkl. Transporte u. Materialvorleistungen, gerundet. Wegen der großen Bedeutung der Materialvorleistungen für die Umwelteffekte bei Photovoltaik wird in GEMIS zwischen PV-Modulen aus monokristallinem (PV-mono), multikristallinem (PV-multi) bzw. amorphem (PV-amorph) Silizium unterschieden. Werte bei Biomasse stellen im wesentlichen Obergrenzen dar. In Ermangelung entsprechender Daten konnte die CO<sub>2</sub>-Neutralität der Biomasse (bei der Verbrennung wird unter der Annahme nachhaltigen Wirtschaftens in etwa so viel Kohlenstoff in die Atmosphäre freigesetzt wie während des Pflanzenwachstums gebunden) bisher in den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten noch nicht entsprechend berücksichtigt werden. Für eine Erklärung der verschiedenen Kriterien vgl. [www.oeko.de/service/gemis/deutsch/glossar.htm](http://www.oeko.de/service/gemis/deutsch/glossar.htm).

**Tabelle 3:** Reihung der betrachteten Technologien mittels „Expert Choice 2000“

Technologie	SEE-Bewertung
1. Wasserkraft klein – saniert	.090
2. Wasserkraft klein	.089
3. Wasserkraft klein – reaktiviert	.088
4. Windkraft klein	.085
4. Windkraft mittel	.085
4. Windkraft gross	.085
5. Holz-KW-DT-gross	.084
6. Wasserkraft-gross	.083
7. Holz-KW-DT-klein	.081
8. Holzgas-KW-GuD-klein	.068
9. Holzgas-KW-GT-klein	.045
10. PV multi	.040
11. PV mono	.038
11. PV amorph	.038

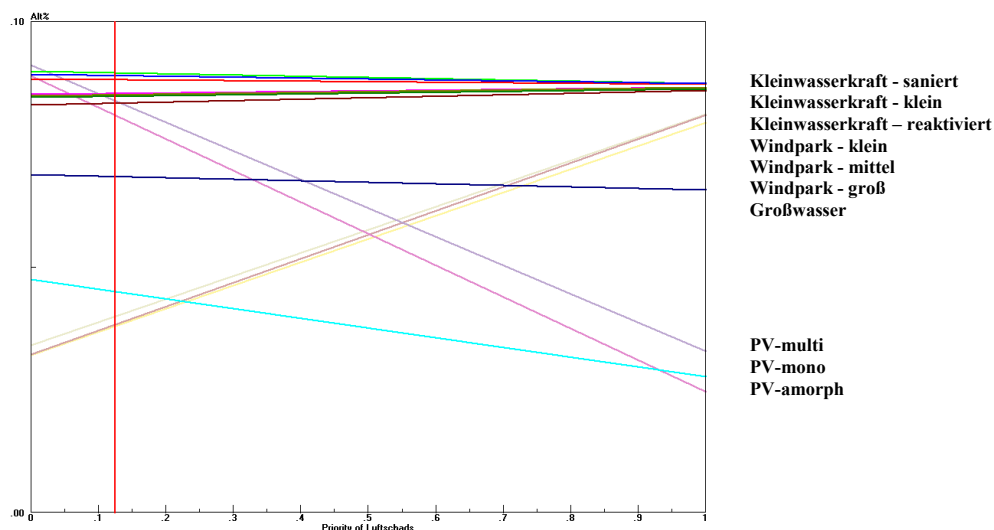
Anmerkungen: Bei der oben angeführten Reihung handelt es sich um vorläufige Ergebnisse. Beispielsweise wurde bei den Biomasse-Technologien die CO<sub>2</sub>-Neutralität der Biomasse (unter der Voraussetzung einer nachhaltigen Bewirtschaftung) noch nicht entsprechend berücksichtigt. Bei der Anwendung der AHP-Methode (Softwarepaket „Expert Choice 2000“) wurde neben den oben genannten Annahmen bezüglich der Gewichtung die Annahme getroffen, dass eine lineare Beziehung zwischen den einzelnen Kriterien und der sozio-ökologisch-ökonomischen Bewertung besteht. Daraus folgt, dass je mehr Sub-Kriterien ein Kriterium hat, desto weniger Gewicht entfällt auf das einzelne Sub-Kriterium. Innerhalb jedes Kriteriums wurde – in Ermangelung besserer naturwissenschaftlicher Information – jedem Sub-Kriterium wiederum gleich viel Gewicht gegeben. Außerdem wurde als Minimalwert 0 und als Maximalwert der jeweils höchste auftretende Wert angenommen („Expert Choice“ verlangt die Eingabe von Minimal- und Maximalwerten). Nichtlineare Wirkungen und kritische Werte müssen im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes noch eingearbeitet werden.

**Abb. 1:** Beiträge der jeweiligen Unterziele zur Gesamtbewertung



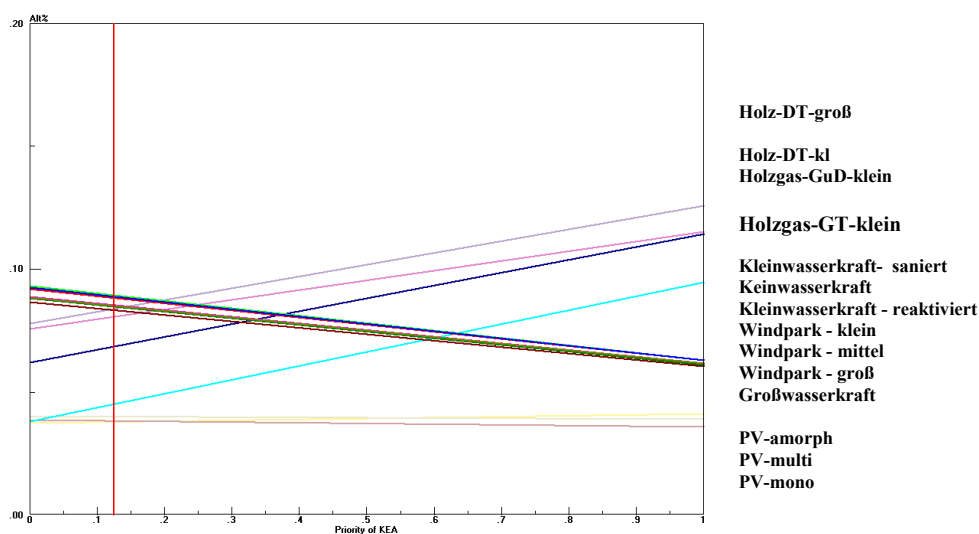
Um die Robustheit der erzielten Resultate zu testen, haben wir zusätzlich verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die in Abbildung 2a dargestellte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Reihung der Stückholz- und der Holzgas-Kraftwerke relativ stark auf die Gewichtung der Luftschadstoffe reagiert; wird diesen besonders viel Gewicht gegeben (d.h. mehr als etwa 22 %, 50 %, 55 % bzw. 75 %), so landen die betrachteten Biomassekraftwerke sogar hinter den Photovoltaik-Technologien.

**Abb. 2a:** Sensitivitätsanalyse – Erhöhung Gewichtung der Luftschadstoffe



- Wird hingegen dem „kumulierten Energieaufwand“ mehr Gewicht beigemessen (siehe Abb. 2b), so werden die Stückholz- und Holzgaskraftwerke bald zuvorderst gereiht (ab einer relativen Gewichtung von ca. 20 %, 25 %, 37 % bzw. 63 %).

**Abb. 2b:** Sensitivitätsanalyse – Erhöhung Gewichtung des kumulierten Energieaufwands



Obwohl aus Platzmangel nicht grafisch dargestellt, verändert sich die Reihung ebenso, wenn den folgenden Kriterien(kategorien) mehr Gewicht gegeben wird:

- Ab einer Gewichtung der „festen Reststoffe“ mit ca. 25 % wird *Holz-DT-groß* um zwei Ränge schlechter gereiht als im Referenzfall (= Gleichgewichtung aller Kriterien). *Holzgas-GT-klein* wird ab einer Gewichtung von ca. 87 % statt an elfter nur mehr an letzter Stelle gereiht. *PV-amorph* hingegen verbessert sich ab einer Gewichtung von ca. 28 % vom letzten (14.) auf den 11. Rang.
- Bei einer Erhöhung der Gewichtung des Kriteriums „Abwasserschadstoffe“ gewinnt *PV-amorph* ab einer Gewichtung von ca. 40 % einen Rang, ansonsten ergeben sich Änderungen erst bei extrem hohen Gewichtungen. Die Spreizung der Technologiebewertungen reduziert sich hier tendenziell bei einer Erhöhung der Gewichtungen.
- Durch höhere Gewichtung der „Flächeninanspruchnahme“ werden die Holzgas-Technologien deutlich schlechter gereiht (ab ca. 23 % bzw. ca. 65 % sogar an letzter Stelle).
- Durch Erhöhung der Gewichtung von „langfristiger Rentabilität“ verbessert sich *Wasserkraft gross* deutlich (von 8. Stelle im Referenzfall auf 2. Stelle ab ca. 65 % Gewichtung).
- Bei vermehrtem Augenmerk auf „Treibhausgase“ verschiebt sich lediglich die Reihung zwischen den PV-Technologien (ab ca. 40 % liegt *PV amorph* vor *PV multi*), und *Holzgas-GT-klein* wird ab einer Gewichtung von 40 % statt an elfter Stelle nur mehr letztgereiht. Außerdem weitet sich die Spreizung zwischen den Alternativen mit Erhöhung der Gewichtung aus.
- Durch Erhöhung des Kriteriums „kumulierter Stoffaufwand“ werden die Alternativen *Holz-DT-klein* und *Holz-DT-groß* deutlich besser und zuletzt sogar bestgereiht.

Nach Vorliegen der endgültigen Ergebnisse der Analyse können diese in weiterer Folge dazu verwendet werden, auf sozio-ökologisch-ökonomischen Kriterien basierende garantierte Einspeisetarife bzw. handelbare Zertifikate für Ökostrom festzulegen. Diese werden nicht zuletzt von den politischen Vorstellungen in bezug auf die gewünschte Bandbreite der gewährten Förderung (Minimal- bzw. Maximalwerte) abhängen. Während bei den Einspeisetarifen die unmittelbare Umsetzung in ein Schema relativ einleuchtend ist, ist die Sache bei den Zertifikaten durch die Handelbarkeit und das Vorhandensein einer Quote etwas komplizierter. So wäre etwa eine Vorgangsweise denkbar, bei der man die Technologie mit der höchsten SEE-Bewertung als Referenztechnologie heranzieht, und alle anderen Technologien entsprechend den SEE-Ergebnissen „entwertet“. Dies hätte allerdings zur (politisch wichtigen) Folge, dass die Quote entsprechend der Zertifikate-Entwertungen ansteigt. Die Handelbarkeit der Zertifikate auf einem einzigen Markt könnte man dadurch weiterhin sicherstellen, in dem man mit Hilfe einer den SEE-Werten entsprechenden Umrechnungstabelle eine Art „Wechselkurs“ verwendet, und zwar entweder während des Handelsvorganges selbst, oder aber im Zuge des Nachweises der Quotenerreichung. Hier ist noch ein gewisser Forschungsbedarf gegeben.

## 6. Fazit

In diesem Beitrag haben wir uns mit dem sozio-ökologisch-ökonomischen Blickwinkel des Einsatzes von handelbaren Zertifikatsystemen und Systemen mit garantierten Einspeisetarifen für Ökostrom beschäftigt. Insbesondere haben wir uns der Aufgabe gewidmet, wie die herkömmlichen Förderinstrumente modifiziert werden könnten, um sozio-ökologisch-ökonomische Kriterien in geeigneter Weise entsprechend zu berücksichtigen. Eine erste Operationalisierung der Bewertung nach sozio-ökologisch-ökonomischen Kriterien wurde gezeigt.

Für die Einsetzbarkeit als Grundlage politischer Entscheidungen sind jedoch noch einige Erweiterungen erforderlich: Kriterien wie Arbeitplatzeffekte und regionale

Wertschöpfung müssten unbedingt noch berücksichtigt werden. Das Kriterium der Flächeninanspruchnahme sollte um eine qualitative Dimension erweitert werden. Und schließlich muss die Gewichtung der einzelnen Kriterien mit den EntscheidungsträgerInnen und einschlägigen ExpertInnen erarbeitet werden. Die von uns präsentierten empirischen Ergebnisse aus einem laufenden Forschungsprojekt sind deshalb auch lediglich vorläufiger Natur, und sollten nur mit entsprechend großer Vorsicht interpretiert werden.

Obwohl die Differenzierung der Förderung von Technologien für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern nach ökologischen Gesichtspunkten die Qualität der Förderung beträchtlich zu erhöhen vermag, wird die Wahl zwischen den beiden Instrumenten nach wie vor stark davon abhängen, ob man der Steigerung der ökonomischen Effizienz und der Erreichung eines bestimmten Mengenzieles, oder aber einer gewissen Diversität und Regionalisierung des Energiesystems höhere Priorität einräumt.

Die praktische Anwendbarkeit des von uns vorgestellten Konzeptes hängt vom Umfang der verwendeten Kriterienliste und den Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Kriterien zusammen und ist daher bis zu einem bestimmten Grad beeinflussbar. Da die aus einem sozio-ökologisch-ökonomischen Blickwinkel beste Technologie jedoch nicht unbedingt die kostengünstigste sein muss, dürfte es in der Praxis trotz der erzielbaren qualitativen Verbesserung der Förderinstrumente schwieriger sein, die notwendige politische Akzeptanz für deren Umsetzung zu erreichen.

### Literaturverzeichnis

- Abbasi, S.A.; Abbasi, N. (2000); The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources, in: Applied Energy, Vol. 65, S. 121-144.
- Berry, T.; Jaccard, M. (2001); The renewable portfolio standard – design considerations and an implementation survey, Energy Policy, Vol. 29, No. 4, S. 263-277.
- Brans, J.-P., Mareschal, B. (2000); How to decide with PROMETHEE, ULB/VUB Freie Universität Brüssel, Charleroi.
- De Montis, A.; De Toro, P.; et al. (2000); Multicriteria decision aid and sustainable development – a comparison of methods. World Meeting, Man and City towards a human and sustainable development, "Federico II" University of Naples.
- Drillisch, J. (1998); Quotenregelung für erneuerbare Energien und Zertifikathandel auf dem niederländischen Elektrizitätsmarkt, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 22, Nr. 4, S. 247-263.
- Drillisch, J. (1999); Quotenregelung für regenerative Stromerzeugung, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 23, Nr. 4, S. 251-274 (s.a. Schriftenreihe des energiewirtschaftlichen Instituts, Bd. 55, Oldenburg Verlag, München).
- EEG (2000); Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes. Bundesgesetzblatt Jg. 2000 Teil I Nr. 13, Bonn, 31. März 2000.
- Europäische Kommission (1998); Draft Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on access of electricity from renewable energy sources to the internal market in electricity. Europäische Kommission, Brussels, 13. Oktober 1998.
- Europäische Kommission (1999); Working Paper of the European Commission. Electricity from renewable sources and the internal electricity market. Europäische Kommission, Brüssel, März 1999.
- Europäische Kommission (2000); Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of electricity from renewable energy sources in the internal electricity market. Europäische Kommission, Brüssel, COM(2000) 279 endg., 10. Mai 2000.
- Grubb, M.; Vigotti, R. (1997); Renewable Energy Strategies for Europe: Vol. II: Electricity Systems and Primary Electricity Sources. Royal Institute of Economic Affairs/Earthscan, London.
- Guitouni, A.; Martel, J.-M. (1998); Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research, Vol. 109, S. 501-521.
- Karni, R.; Feigin, P.; Breiner, A. (1992); Multicriterion issues in energy policy making, in: European Journal of Operational Research, Vol. 56, S. 30-40.

- Kühn, I.; Schaeffer, G.J.; Voogt, M.; Crookall-Fallon, C. (1999); Evaluation of Incentive Schemes for Renewable Sources of Energy in the Electricity Sector. REALM Working Group III Final Paper, Mannheim/Petten/Bath, Oktober.
- Kühn, I.; Bräuer, W. (2000); Quotenmodelle – was können sie leisten, wo sind ihre Grenzen. In: Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien im Strombereich, Workshop zur Förderung erneuerbarer Energien im liberalisierten Strommarkt, Stuttgart, 13.4.2000, S. 41-50.
- Madlener, R. (2000); Handelbare Zertifikate für Strom aus erneuerbaren Energieträgern: Perspektiven für Österreich, in: K. Friedrich/W. Wallner (Hrsg.), Energieinnovation im liberalisierten Markt, ÖVE-Schriftenreihe Nr. 21, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Wien, S. 137-143.
- Madlener, R.; Fouquet, R. (1999); Markets for Tradable Renewable Electricity Certificates: Dutch Experience and British Prospects, 1999 BIEE Conference „A New Era for Energy? Price signals, industry structure and environment“, St. John’s College, Oxford, 20-21 Sept. 1999 (in Drucklegung bei Oxford University Press, Oxford).
- Madlener, R.; Stagl, S. (2000); Promoting Renewable Electricity Generation through Guaranteed Feed-in Tariffs vs Tradable Certificates: An Ecological Economics Perspective, 3<sup>rd</sup> Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics (ESEE), Vienna, 3.-6. Mai 2000.
- Markard, J. (1998); Green Pricing – Welchen Beitrag können freiwillige Zahlungen von Stromkunden zur Förderung regenerativer Energien leisten? Öko-Institut-Verlag, Freiburg.
- Markard, J.; Truffer, B. (1999); Der lange Weg zu einem Euro-Label für Ökostrom, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 49, Nr. 11, S. 724-728.
- Menges, R. (1998); Staatlich garantierte Preise oder regenerativer Quotenhandel? Elemente eines Fördermodells für die erneuerbaren Energien in Deutschland, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 48, Heft 11, S. 687-693.
- Mitchell, C. (1996); Future support of renewable energy in the UK – options and merits, Energy and Environment, 7(3).
- Mitchell, C. (1999); Renewable Energy in the UK – the beginning of a new era, 1999 BIEE Conference “A New Era for Energy? Price Signals, Industry Structure and Environment“, St. John’s College, Oxford, 20.-21. Sept. 1999 (in Drucklegung bei Oxford University Press, Oxford).
- Morthorst, P.E. (2000a); Scenarios for the use of GHG-reduction instruments – how can policy-instruments as carbon emission trading and tradable green certificates be used simultaneously to reach a common GHG-reduction target? Energy and Environment, Vol. 11, No. 4, S. 423-438.
- Morthorst, P.E. (2000b); The development of a green certificate market, Energy Policy, Vol. 28, S. 1085-1094.
- Morthorst, P.E. (2001); Interactions of a tradable green certificate market with a permits market, Energy Policy, Vol. 29, No. 5, S. 345-353.
- Munda, G. (1995); Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment: Theory and Applications in Ecological Economics. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Öko-Institut (1998); Kurz-Information zu Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme – eXtended version (GEMIS 3.x). Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen, Öko-Institut, Darmstadt/Freiburg/Berlin, Dezember ([www.oeko.de/service/gemis](http://www.oeko.de/service/gemis)).
- Öko-Institut (1999); Entwicklung eines Zertifizierungsverfahrens für “Grünen Strom”, Studie im Auftrag der Bremer Energie-Konsens GmbH (Hrsg.), Bremen. Endbericht. Darmstadt/Freiburg/Berlin, August.
- Rader, N.; Norgaard, R. (1996); Efficiency and sustainability in restructured electricity markets: The Renewables Portfolio Standard, in: The Electricity Journal, July, S. 37-49.
- Saaty, T.L. (1980); The Analytic Hierarchy Process for Decision in a Complex World. RWS Publications, Pittsburgh, PA.
- Saaty, T.L. (1992); Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process. RWS Publications, Pittsburgh, PA.
- Saaty, T.L.; Alexander, J.M. (1989); Conflict Resolution - The Analytic Hierarchy Process. Praeger, New York.
- Schaeffer, G.J.; Boots, M.G.; Martens, J.W.; Voogt, M.H. (1999); Tradable green certificates. A new market-based incentive scheme for renewable energy: introduction and analysis. Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten, S. 39.

- Voß, A.; Dicke, N. (2000); Liberalisierter Strommarkt – Effiziente Förderung erneuerbarer Energien, in: Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien im Strombereich, Workshop zur Förderung erneuerbarer Energien im liberalisierten Strommarkt, Stuttgart, 13. April 2000, S. 51-63.
- Weller, T. (1998); Green Pricing: kundenorientierte Angebote der Elektrizitätswirtschaft, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 22, Nr. 1, S. 58-70.
- Wohlgemuth, N.; Madlener, R. (2000); Financial Support of Renewable Energy Systems: Investment vs Operating Cost Subsidies, NAEE Conference “Towards an Integrated European Energy Market”, Bergen/Norwegen, 31. Aug. - 1. Sept. 2000.

## Anhang: Kurzbeschreibung der analysierten Technologien

- A Wasserkraft klein** - kleines Laufwasser-Kraftwerk, (ws.\*) o. THG-Emissionen  
100 kW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 50 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad
- B Wasserkraft klein – reaktiviert** - kleines Laufwasser-Kraftwerk, o. THG-Emissionen  
10 kW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 50 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad
- C Wasserkraft klein – saniert** - kleines Laufwasser-Kraftwerk, o. THG-Emissionen  
10 kW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 50 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad
- D Wasserkraft groß** - großes Laufwasser-Kraftwerk, o. THG-Emissionen  
50 MW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 50 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad.
- E Windkraft klein**  
Windturbinen als Park mit 10 Anlagen a 100 kW, exkl. Kabel u. Transformatoren  
1 MW, 2000 Jahresbetriebsstunden, 20 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad, 33 % gesicherte Leistung.
- F Windkraft mittel**  
Windturbinen als Park mit 10 Anlagen a 500 kW, exkl. Kabel u. Transformatoren  
5 MW, 2000 Jahresbetriebsstunden, 20 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad, 33 % gesicherte Leistung.
- G Windkraft groß**  
Windturbinen als Park mit 10 Anlagen a 1 MW, exkl. Kabel u. Transformatoren  
10 MW, 2000 Jahresbetriebsstunden, 20 J. Lebensdauer, 100 % Nutzungsgrad, 33 % gesicherte Leistung.
- H (feste) Biomasse klein A** – kleines Gasturbinen-Kraftwerk für Holzgas  
10 MW, 6000 Jahresbetriebsstunden, 15 J. Lebensdauer, 28 % Nutzungsgrad, 200 m<sup>2</sup> Flächenbedarf.
- I (feste) Biomasse klein B** – kleines Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk für Holzgas  
50 MW, 6000 Jahresbetriebsstunden, 15 J. Lebensdauer, 45 % Nutzungsgrad, 2500 m<sup>2</sup> Flächenbedarf.
- J (feste) Biomasse klein C** – kleines Dampfturbinen-Kraftwerk für Stückholz  
2 MW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 20 J. Lebensdauer, 15 % Nutzungsgrad, kein (ws.\* im Sinne von vernachlässigbarer) Flächenbedarf.
- K (feste) Biomasse groß** – großes Dampfturbinen-Kraftwerk für Stückholz  
20 MW, 5000 Jahresbetriebsstunden, 20 J. Lebensdauer, 22,5 % Nutzungsgrad, kein (ws.\* im Sinne von vernachlässigbarer) Flächenbedarf.
- L PV mono** - monokristallines PV-Modul  
50 W<sub>p</sub>, Einstrahlung 1000 kWh/m<sup>2</sup>/yr (guter Standort), 990 Jahresbetriebsstunden, 30 J. Lebensdauer, 11,56 % Nutzungsgrad, 0,43 m<sup>2</sup> Flächenbedarf, System inkl. Aluminium-Rahmen und Aufständering nach DIN.
- M PV multi** – multikristallines PV-Modul  
50 W<sub>p</sub>, Einstrahlung 1000 kWh/m<sup>2</sup>/yr (guter Standort), 990 Jahresbetriebsstunden, 30 J. Lebensdauer, 9,66 % Nutzungsgrad, 0,52 m<sup>2</sup> Flächenbedarf, System inkl. Aluminium-Rahmen und Aufständering nach DIN.
- N PV amorph** – amorphes PV-Modul  
50 W<sub>p</sub>, Einstrahlung 1000 kWh/m<sup>2</sup>/yr (guter Standort), 990 Jahresbetriebsstunden, 30 J. Lebensdauer, 6 % Nutzungsgrad, 0,84 m<sup>2</sup> Flächenbedarf, System inkl. Aluminium-Rahmen und Aufständering nach DIN.

(alle Angaben für deutsche Verhältnisse)

\* keine Angaben