

Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Uwe Remme
geboren in Ibbenbüren

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Göde
Tag der Einreichung: 13. September 2004
Tag der mündlichen Prüfung: 01. Dezember 2005

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Abteilung Energiewirtschaft und Systemtechnische Analysen (ESA)
Dr. rer. pol. U. Fahl

2006

ISSN 0938-1228

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|--------------|
| Inhaltsverzeichnis | i |
| Abbildungsverzeichnis | v |
| Tabellenverzeichnis | ix |
| Abkürzungsverzeichnis | xiii |
| Formelverzeichnis | xvii |
| Kurzfassung | xxiii |
| Abstract | xxv |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung und Zielsetzung | 1 |
| 1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 Erneuerbare Energien in der deutschen Energiewirtschaft | 7 |
| 2.1 Entwicklungen in der deutschen Energieversorgung | 8 |
| 2.1.1 Entwicklung des Energieverbrauchs..... | 8 |
| 2.1.2 Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft..... | 12 |
| 2.1.3 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft | 18 |
| 2.1.4 Fazit | 24 |
| 2.2 Heutiger Stand und Perspektiven bei der Nutzung erneuerbarer Energien..... | 24 |
| 2.2.1 Wasserkraft | 24 |
| 2.2.2 Windkraft | 27 |
| 2.2.3 Solarthermie..... | 34 |
| 2.2.4 Photovoltaik..... | 37 |
| 2.2.5 Umgebungswärme und oberflächennahe Erdwärme | 41 |
| 2.2.6 Geothermie..... | 44 |
| 2.2.7 Biomasse | 49 |
| 2.2.8 Potenziale erneuerbarer Energieträger | 59 |
| 2.3 Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien..... | 65 |
| 2.3.1 Theoretische Ansätze zur Förderung erneuerbarer Energien..... | 65 |
| 2.3.2 Existierende Rahmenbedingungen in Europa und Deutschland..... | 67 |
| 2.4 Erneuerbarer Energien aus dem Blickwinkel der Systemanalyse | 70 |
| 2.4.1 Wechselwirkungen innerhalb des Energiesystems | 71 |
| 2.4.2 Konkurrenz alternativer Nutzungsmöglichkeiten der Ressourcen | 73 |
| 2.4.3 Regionale und zeitliche Schwankungen in der Verfügbarkeit..... | 74 |
| 2.4.4 Vergleichssystem | 75 |
| 2.4.5 Fazit | 76 |
| 3 Das Energiesystemmodell TIMES - Ein Instrument zur langfristigen Planung in der Energiewirtschaft | 77 |
| 3.1 Energiesystemanalyse | 77 |
| 3.2 Energiemodelle..... | 78 |
| 3.2.1 Klassifizierung von Energiesystemmodellen..... | 79 |
| 3.2.2 Vertreter von Energiesystemmodellen..... | 81 |
| 3.3 Beschreibung des Energiesystemmodells TIMES | 84 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.1 Modellstruktur | 85 |
| 3.3.2 Implementierung | 90 |
| 3.3.3 Mathematische Beschreibung | 92 |
| 4 Methoden der Sensitivitätsanalyse und der parametrischen Programmierung..... | 119 |
| 4.1 Dualität in der Linearen Programmierung | 120 |
| 4.1.1 Das primale und das duale Optimierungsproblem | 120 |
| 4.1.2 Kernaussagen der Dualität | 122 |
| 4.1.3 Graphentheoretische Betrachtung des primalen und dualen Problems | 126 |
| 4.1.4 Duale Gleichungen und Variablen im Energiesystemmodell | 131 |
| 4.2 Sensitivitätsanalyse | 139 |
| 4.2.1 Sensitivität bezüglich der rechten Seite | 140 |
| 4.2.2 Sensitivität bezüglich der Kostenparameter | 143 |
| 4.2.3 Sensitivität bezüglich der Matrixkoeffizienten | 145 |
| 4.3 Parametrische Programmierung | 147 |
| 4.3.1 Variation der rechten Seite | 147 |
| 4.3.2 Variation der Kostenparameter | 149 |
| 4.3.3 Variation mehrerer unterschiedlicher Parameter | 151 |
| 5 Quantitative Analyse der zukünftigen Rolle erneuerbarer Energien..... | 153 |
| 5.1 Das TIMES Deutschland Modell | 153 |
| 5.2 Rahmenannahmen | 154 |
| 5.2.1 Sozioökonomische Rahmenannahmen | 155 |
| 5.2.2 Energiepolitische Annahmen | 157 |
| 5.2.3 Annahmen hinsichtlich der Stromerzeugung aus fluktuierenden Quellen | 158 |
| 5.3 Technisch-ökonomische Beschreibung der Technologien | 159 |
| 5.3.1 Fossile und nukleare Stromerzeugungstechnologien | 159 |
| 5.3.2 Wasserstoffbereitstellung und -nutzung | 162 |
| 5.4 Charakterisierung der Szenarien und Variationsrechnungen | 166 |
| 5.5 Das Referenzszenario | 168 |
| 5.5.1 Endenergieverbrauch | 168 |
| 5.5.2 Strombereitstellung | 170 |
| 5.5.3 Primärenergieverbrauch | 171 |
| 5.5.4 Emissionen | 172 |
| 5.5.5 Kosten und Strompreise | 176 |
| 5.6 Das Zielszenario Treibhausgasminderung (THG-Minderung) | 186 |
| 5.6.1 Endenergieverbrauch | 186 |
| 5.6.2 Strombereitstellung | 188 |
| 5.6.3 Primärenergieverbrauch | 190 |
| 5.6.4 Emissionen | 191 |
| 5.6.5 Kosten und Strompreise | 197 |
| 5.6.6 THG-Minderungskostenkurve | 202 |
| 5.6.7 Variante CO ₂ -Abtrennung und -Deponierung (THG-DEP) | 207 |
| 5.6.8 Variante THG-Minderung und Kernenergiezubau (THG-KE) | 210 |
| 5.7 Das Zielszenario Erneuerbare Energien (EE) | 214 |
| 5.7.1 Endenergieverbrauch | 214 |
| 5.7.2 Strombereitstellung | 215 |
| 5.7.3 Primärenergieverbrauch | 217 |
| 5.7.4 Emissionen | 218 |
| 5.7.5 Kosten und Strompreise | 220 |

| | |
|---|------------|
| 5.7.6 Angebotskurve Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien | 227 |
| 5.7.7 Variation der Obergrenze der Netzeinspeisung aus fluktuierenden Quellen.... | 230 |
| 5.8 Simultane Variation der EE-Quote, des Minderungsziels und des Erdgaspreises | 231 |
| 5.8.1 Variation des Minderungsziels und der EE-Quote | 232 |
| 5.8.2 Variation des Minderungsziels und des Erdgas-/Rohölpreises..... | 236 |
| 5.9 Zusammenfassende Bewertung der Analysen..... | 240 |
| 5.9.1 Regenerativer Endenergieverbrauch..... | 240 |
| 5.9.2 Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern | 241 |
| 5.9.3 Primärenergieverbrauch erneuerbarer Energieträger..... | 244 |
| 5.9.4 Emissionen und Systemkosten..... | 245 |
| 6 Schlussbetrachtung | 251 |
| Literaturverzeichnis..... | 255 |
| Anhang A: Ergebnistabellen der Szenariorechnungen | 279 |

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund eines zunehmenden globalen Energiebedarfs und der Gefahr einer anthropogenen Störung des Klimasystems durch die Emission von Treibhausgasen gilt es, tragfähige Strategien und Perspektiven für eine nachhaltige Energieversorgung zu entwickeln. Der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien wird dabei vielfach eine Schlüsselrolle zur Bewältigung dieser Herausforderungen zugesprochen. Einer weit verbreiteten Ausschöpfung der auch in Deutschland in großem Maße verfügbaren Potenzialen an regenerativen Energieträgern stehen jedoch häufig noch die damit verbundenen hohen Kosten im Vergleich zu fossilen Energieträgern entgegen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher zu untersuchen, welchen Beitrag erneuerbare Energieträger in einem wettbewerblichen Marktumfeld langfristig zur Energieversorgung leisten können und in welchem Umfang erneuerbare Energieträger durch die Internalisierung der Treibhausgasvermeidungskosten in den Energiepreisen profitieren können.

Zur Bewertung der Rolle erneuerbarer Energieträger sind mit Blick auf das Gesamtenergiesystem Interdependenzen zwischen der Nutzung erneuerbarer Energieträger und den übrigen Sektoren des Energiesystems zu berücksichtigen. Neben der Vernetzung des Energiesystems in horizontaler Richtung durch Prozessketten über Sektoren hinweg und in vertikaler Richtung durch die Konkurrenz regenerativer mit fossilen Energietechnologien sind dabei auch Kopplungen über Energiepreise, deren Höhe über die Wettbewerbsfähigkeit einer regenerativen Energietechnologie entscheidet, sowie die energie- und preisseitigen Effekte durch Einführung energiepolitischer Instrumente zu beachten. Aufgrund dieser Systemzusammenhänge wird daher ein auf dem Ansatz der linearen Programmierung basierendes intertemporales Energiesystemmodell verwendet, in dem die Energiewirtschaft Deutschlands von der Primär- bis zur Nutzenergie technologisch detailliert abgebildet und hinsichtlich der Systemkosten optimiert wird. Um die Wechselwirkungen innerhalb des Energiesystems aufzuzeigen, werden sich z. T. ergänzende methodische Verfahren entwickelt und eingesetzt. Neben einem Bilanzierungsmodell zur Ermittlung von die Prozessvorketten berücksichtigender Indikatoren zählen hierzu ein auf der Dualitätstheorie beruhendes Verfahren zur Dekomposition der Energie- und Zertifikatspreise, Methoden der Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der fundamentalen preisbestimmenden Faktoren und Techniken der parametrischen Programmierung, um neben Variationen der Modelleingangsdaten Treibhausgasvermeidungskostenkurven und Angebotskurven regenerativ erzeugten Stroms unter Berücksichtigung der systemaren Zusammenhänge im Energiesektor abzuleiten.

Mit Hilfe des entwickelten Energiesystemmodells und der Analysemethoden werden die zukünftigen Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien im deutschen Energiesystem bis zum Jahr 2050 szenariogestützt untersucht. In den Szenarien werden einerseits die mit einer Quote erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung verbundenen energie-, kosten- und emissionsseitigen Auswirkungen betrachtet und andererseits der Beitrag erneuerbarer Energien in Konkurrenz mit alternativen Minderungsoptionen zur Erreichung von Treibhausgasminderungszielen dargestellt. Weiterhin werden in simultanen Variationen die Wechselwirkungen zwischen beiden Instrumenten und ihre Auswirkungen speziell auf die Stromerzeugungsstruktur und die Strompreise beleuchtet.

Abstract

Against the background of an increasing global energy demand and the danger of an anthropogenic disturbance of the climate system by the emission of greenhouse gases, it is necessary to develop sustainable strategies and perspectives for the future energy system. The increased usage of renewable sources is identified from many sides as a key element in strategies to overcome these challenges. However, a widely utilisation of the also in Germany large existing potentials of renewable energy carriers is currently still opposed by the associated high costs relative to fossil energy sources.

The intention of the submitted thesis is to analyse the contribution of renewable energy sources in the long-run under competitive market conditions to the energy supply and to study the extent to which renewable energy sources can benefit from the internalisation of greenhouse gas abatement costs in the energy prices.

To assess the role of renewable energy sources in the context of the entire energy system, interdependencies between the utilisation of renewable energy sources with other aspects and sectors of the energy system have to be taken into account. In addition to the interconnectedness of the energy system in the horizontal direction by process chains across sectors and in the vertical direction by the competition of renewable with conventional fossil technologies also the linkage by energy prices, which serve as benchmark for the competitiveness of a renewable energy technology, and the energy and price related effects caused by the introduction of policy instruments have to be considered. Due to these interactions within the system, a linear programming based dynamic energy system model is used, which depicts technologically detailed the German energy sector from the primary energy supply to the end-use energy demand side and optimises the energy system with respect to its total costs. In order to reveal the interactions and dependencies within the energy system, several partially complementary methodologies have been developed and applied to the model. Apart from a balance model that allows the calculation of specific indicators under consideration of previous process chains, the methodology comprises a method for decomposing energy and certificate prices based on the duality theory, the method of sensitivity analysis to identify the fundamental price-determining activities and parametric programming techniques to derive greenhouse gas abatement cost curves and renewable electricity supply cost curves.

With the help of the developed energy system model and analysis tools, the future development perspectives of renewable energy in the German energy system until the year 2050 are studied in various scenarios. In these scenarios, on the one side the energy-, cost- and emission related effects associated with a quota for the electricity production from renewable sources are studied, on the other side the contribution of renewable energy sources to given greenhouse gas abatement targets in competition with alternative abatement measures is examined. Furthermore the interdependencies between these two policy instruments on each other and their effects on the structure of the electricity sector and on the electricity prices are highlighted.

1 Einleitung

Die europäische und deutsche Energieversorgung sieht sich in der Zukunft vor neue Herausforderungen gestellt. Von der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages werden die Globalisierung und Liberalisierung der Energiemärkte, der anthropogene Klimawandel und die Entwicklung der weltweiten Energienachfrage und Ressourcenverfügbarkeit unter Berücksichtigung ihrer geographischen Verteilung und der daraus erwachsenen geopolitischen Implikationen als die wichtigsten neuen Rahmenbedingungen und Herausforderungen für die Energiepolitik und Energiewirtschaft genannt /Enquete 2001/.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen sind große Hoffnungen mit dem zukünftigen Beitrag erneuerbarer Energien in der Energieversorgung verknüpft. Trotz des durch die Liberalisierung ausgelösten erhöhten ökonomischen Drucks auf die größtenteils heute ohne Förderung nicht wirtschaftlich nutzbaren regenerativen Energien werden sie als ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Strategien zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und insbesondere zur Erreichung von Klimaschutzzielen angesehen. So erklärten die Minister der Mitgliedsländer der Internationalen Energieagentur (IEA) im Jahr 2001 im Zusammenhang mit den Aspekten Energieversorgungssicherheit und nachhaltiger Entwicklung „We intend that renewable energy should play an increasing role...“ /IEA 2001/. Im Weißbuch „Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger“ der Europäischen Union /EU 1997/ werden erneuerbaren Energien als ein wichtiger Baustein zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Vision einer so genannten Wasserstoffwirtschaft (engl. *hydrogen economy*) werden erneuerbare Energien als eine Quelle zur Bereitstellung des Wasserstoffs angesehen /Shell 2002/. Von der aktuellen Bundesregierung werden erneuerbare Energien neben dem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und der Energieeinsparung durch Effizienzverbesserungen als ein Weg zur Umsetzung der deutschen Klimaschutzziele protegiert. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion von 6,3 % im Jahr 2000 auf 12,5 % im Jahr 2010 zu erhöhen. Darüber hinaus hat die Bundesregierung erklärt, dass in der Mitte des Jahrhunderts die Hälfte des Energieverbrauchs Deutschlands aus erneuerbaren Energien gedeckt werden soll /BMU 2002b/. Zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wurde in Deutschland mit dem Gesetz zum Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) im April 2000 eine Abnahmeverpflichtung bei gleichzeitig garantierter Einspeisevergütung eingeführt. Neben solchen Garantiepreismodellen werden als weitere Instrumente zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien Quotenmodelle, Ausschreibungsmodelle und Angebote für sog. grünen Strom diskutiert bzw. in einigen Ländern bereits angewandt.

Neben dieser sehr optimistischen Einschätzung bezüglich der Zukunft regenerativer Energieträger in der Energieversorgung gibt es jedoch auch Stimmen /WEC 2003/, die zu Bedenken geben, dass erneuerbare Energien zwar eine bedeutsame Rolle im zukünftigen Energiesystem spielen können, sie jedoch nicht ein Allheilmittel zur Lösung der Energieversorgungsprobleme darstellen, da z. B. bei der von Natur aus fluktuierenden Stromerzeugung aus Windkraft und Sonnenenergie Reservekapazität vorzuhalten ist sowie überschüssige Erzeugung, mit ent-

sprechenden Umwandlungsverlusten begleitet, zwischengespeichert werden muss. Es wird ebenfalls eingewandt, dass die ökologische Bewertung einer erneuerbare Energieträger nutzenden Technologie über ihren gesamten Lebenszyklus zu erfolgen hat, da die Herstellung der Technologie unter Umständen, wie im Falle der Solarzellen, mit einem nicht zu vernachlässigenden Energieverbrauch und Ausstoß von Emissionen verbunden sein kann. Von /Bossel und Eliasson 2003/ wird der Einwand erhoben, dass in der vielfach propagierten auf regenerativen Energieträgern basierenden Wasserstoffwirtschaft im Vergleich zu anderen Energieträgern der Energiebedarf für den Transport und die Verteilung des Wasserstoffs sehr hoch ist, so dass Lösungen zur Verbesserung der Transport- und Verteilungseffizienz gefunden werden müssen (z. B. durch Umwandlung des Wasserstoffs in Methanol).

Vor dem Hintergrund dieser divergierenden Einschätzungen im Hinblick auf die Zukunft erneuerbarer Energien soll in dieser Arbeit quantitativ untersucht werden, welche Rolle erneuerbare Energien in der deutschen Energieversorgung bis zum Jahr 2050 spielen können. Hierbei soll das Energiesystem aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden, einerseits soll analysiert werden, welche energie-, kosten- und emissionsseitigen Auswirkungen eine forcierte Nutzung erneuerbarer Energien hat, andererseits soll untersucht werden, wie sich die Verfolgung einer Klimaschutzpolitik auf die Nutzung regenerativer Energieträger auswirkt, d. h., die Frage beantwortet werden, welche regenerativen Energieträger einen positiven Beitrag zum Erreichen von Klimaschutzziele in Deutschland leisten können.

Zu den Aspekten, die bei der Analyse zu berücksichtigen sind, zählt die Vernetzung innerhalb des Energiesystems. In vertikaler Richtung existieren innerhalb des Energiesystems alternative Möglichkeiten zur Bereitstellung eines Energieträgers, so dass, wie im Stromsektor, verschiedene Technologien miteinander konkurrieren. In horizontaler Richtung sind Technologien und Energieträger zu Prozessketten verknüpft. Durch diese beiden Dimensionen der Verknüpfung ergibt sich selbst bei kleineren Energiesystemen eine Vielzahl komplexer, kombinatorischer Möglichkeiten zur Deckung einer Energienachfrage. Bei der Bewertung einer regenerativen Technologie sind diese Zusammenhänge zu berücksichtigen. So wird zum Betrieb einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe im Haushaltssektor Strom benötigt, dessen Bereitstellung mit Emissionen im Stromerzeugungssektor verbunden sein kann. Ob durch die Nutzung einer Wärmepumpe Emissionen vermieden werden, hängt somit neben den Emissionen der substituierten Wärmebereitstellungssysteme im Haushaltssektor auch von der Struktur des Stromerzeugungssektors ab.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass alternative Verwendungsmöglichkeiten für einen regenerativen Energieträger existieren. So kann Biomasse auf vielfältige Weise im Energiesystem genutzt werden, sie kann z. B. in einem Heizkraftwerk verbrannt oder aber auch nach einer Vergasung und Reinigung als Wasserstoff in einer Brennstoffzelle genutzt werden. Eine Konkurrenzsituation besteht z. T. auch bei den Flächenpotenzialen für regenerative Energieträger. Auf einer landwirtschaftlichen Fläche können beispielsweise Energiepflanzen angebaut oder aber auch Photovoltaikanlagen oder Solarkollektoren installiert werden.

Der Einsatz regenerativer Energieträger stellt eine Möglichkeit zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen dar. Daneben können Treibhausgasminderungen auch durch Energieeinsparungen im Gebäudebereich, Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung, Nutzung der Kernenergie oder Ausbau der Kohleverstromung in Kombination mit einer CO₂-Abtrennung sowie -Deponierung im Bereich der Stromerzeugung erreicht werden. Als Maßstab zum Vergleich und zur Bewertung der Kosteneffektivität einer Minderungsmaßnahme können die marginalen

Treibhausgasermittlungskosten herangezogen werden. Bei der Ermittlung dieser Kosten ist jedoch zu berücksichtigen, dass sie neben den Kosten der betrachteten regenerativen Technologie sehr stark vom Zustand des Energiesystems (z. B. Kosten alternativer Technologien, Emissionsintensität des Energiesystems), das sich zudem dynamisch im Zeitverlauf verändert, abhängen.

Zur Beantwortung der Frage, ob eine regenerative Stromerzeugungstechnologie kostendeckend betrieben werden kann, entscheidet bei gegebenen Gestehungskosten letztlich der Strompreis, der, wenn man zusätzliche Einnahmen ausschließt, der Vergütung entspricht, die der Betreiber der Technologie für den regenerativ erzeugten Strom erhält. Liegen die Gestehungskosten unterhalb des Strompreises, ist der Betrieb kostendeckend. Übersteigen dagegen die Kosten den Strompreis, wäre ohne eine zusätzliche Vergütung oder Subvention der Betrieb nicht wirtschaftlich. Die Entwicklung des Strompreises ist daher eine wichtige Größe zur Bewertung der Einsatzchancen von Stromerzeugungstechnologien. Ein weiterer wichtiger zu untersuchender Aspekt ist somit die Frage, wie sich langfristig der Strompreis entwickelt und welche Faktoren ihn zukünftig beeinflussen.

Vielfach ist der Betrieb regenerativer Stromerzeugungstechnologien heute noch nicht wirtschaftlich, so dass, wenn energiepolitisch ein Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erwünscht ist, Förderinstrumente notwendig sind, wie z. B. durch eine Einspeisevergütung (EEG) oder die Einführung eines Quotenhandelssystems (sog. *green certificates*). Werden noch andere energiepolitische Ziele verfolgt, beispielsweise Minderung der Treibhausgasemissionen zum Klimaschutz, stellt sich die Frage, wie sich die zu den verschiedenen Zielen gehörigen Instrumente, z. B. Quotensystem für erneuerbare Energien und Zertifikathandelssystem für Treibhausgase, gegenseitig beeinflussen und welche Implikationen die gleichzeitige Anwendung dieser Instrumente auf das Energiesystem hat.

1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit

Aufgrund der zahlreichen Alternativen zur Bereitstellung und Umwandlung eines Energieträgers, der Verknüpfung des Energiesystems über verschiedene Technologieketten und Sektoren sowie der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen umweltpolitischen Maßnahmen und Zielen stellt sich die Energiewirtschaft eines Landes als ein sehr komplexes System dar. Zu einer fundierten Analyse der oben angeführten Fragen ist daher eine modellgestützte Vorgehensweise empfehlenswert. Da unter Berücksichtigung von technischen Restriktionen und energiepolitischen Vorgaben, wie die eines Treibhausgasermittlungsziels oder die einer Mindestnutzung erneuerbarer Energien, eine möglichst kostengünstige Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems aus der Vielzahl von möglichen Alternativen gesucht ist, wird ein analytischer Optimierungsansatz gewählt, der zudem den Vorzug bietet, dass im Rahmen der Optimierung auch eine monetäre Bewertung knapper Ressourcen, Energieträger oder Restriktionen in Form von Preisen vorgenommen wird.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wird zunächst ein Überblick über die deutsche Energiewirtschaft und ihrer politischen Rahmenbedingungen gegeben, bevor detailliert auf die Nutzung erneuerbarer Energien, die hierfür eingesetzten Technologien und die zur Verfügung stehenden Potenziale eingegangen wird. Unterschiedliche Modelle und in Deutschland bereits umgesetzte Maßnahmen zur Förderung regenerativer Energien werden diskutiert und systemanalytische Aspekte bei der Untersuchung erneuerbarer Energien in einem Energiesystem beleuchtet.

Anschließend wird in Kapitel 3 ein Überblick über die Modellbildung in der Energiewirtschaft gegeben. Darauf aufbauend wird das in dieser Arbeit entwickelte und verwendete Optimierungsmodell TIMES (The Integrated Markal Eform System) in seiner Struktur und mathematischen Formulierung vorgestellt. Zusätzlich wird für die Ergebnisanalyse ein Bilanzierungsmodell zur Ermittlung durchschnittlicher spezifischer Größen für die Energieträger, z. B. spezifischer Primärenergieverbrauch oder spezifische Emissionen der Bereitstellungskette, dargestellt.

Im Kapitel 4 werden Verfahren entwickelt, die dazu dienen, die Wechselwirkungen und Zusammenhänge innerhalb des Energiesystemmodells sowie zwischen den Eingabedaten und der Lösung des Modells aufzuzeigen. Insbesondere der letzte Punkt, die vermeintlich geringe Transparenz der sich ergebenden Lösung, ist ein häufiger im Zusammenhang mit optimierenden Energiesystemmodellen geäußerter Vorwurf. Zur Modellanalyse werden zu Beginn des Kapitels 4 die Grundlagen der Dualität in der linearen Programmierung und die Beziehungen zwischen dem so genannten linearen und dualen Optimierungsproblem vorgestellt. Handelt es sich bei dem primalen Optimierungsproblem um die kostenminimale Ausgestaltung eines Energiesystems unter Berücksichtigung diverser technischer und politischer Nebenbedingungen, beschreibt das zugehörige duale Optimierungsproblem dasselbe Energiesystem mit Hilfe von Beziehungen zwischen Schattenpreisen und Kosten. Die Entscheidungsvariablen des primalen Problems (im Falle des Energiesystemmodells Energieflüsse und Zubauvariablen) werden als primale Variablen bezeichnet, analog werden die Entscheidungsvariablen des dualen Problems (im Fall des Energiesystemmodells Energieträgerpreise und Opportunitätskosten) als duale Variablen bezeichnet. Darauf aufbauend wird eine graphische Darstellung des primalen und dualen Problems vorgestellt, um anschließend die Interpretation der dualen Variablen und dualen Gleichungen im Energiesystemmodell TIMES zu diskutieren. Weiterhin werden Verfahren der Sensitivitätsanalyse entwickelt, mit deren Hilfe sich der Einfluss von Eingangsdaten des Modells auf die Lösung untersuchen lässt. Insbesondere lässt sich mit den entwickelten Methoden bestimmen, welche Aktivitäten für eine duale Variable, z. B. für den Strompreis, verantwortlich sind und welche Kostenparameter den größten Einfluss auf diese duale Variable haben. Analog kann für die primalen Verfahren bestimmt werden, welche Restriktionen, z. B. Energienachfrage oder Emissionsobergrenze, den größten Einfluss auf den Wert einer primalen Variablen haben. Ebenso kann der Einfluss von Matrixkoeffizienten der Modellgleichungen, z. B. einer Quote für die regenerative Stromerzeugung, auf die primalen und dualen Variablen bestimmt werden. Abschließend werden in Kapitel 4 Verfahren der parametrischen Programmierung behandelt, mit denen sich die Auswirkungen von Änderungen in den Eingangsdaten auf die dualen und primalen Variablen über größere Wertebereiche in einer systematischen und effizienten Weise analysieren lässt.

Mit Hilfe des in Kapitel 3 vorgestellten Energiesystemmodells TIMES und der in Kapitel 4 erarbeiteten Analysemethoden wird in Kapitel 5 die zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland quantitativ untersucht. Hierbei werden zunächst die Rahmenannahmen und die technisch-ökonomische Charakterisierung der Technologien vorgestellt. Aufbauend auf einem Referenzszenario wird zuerst untersucht, welchen Beitrag erneuerbare Energien ohne eine direkte Förderung zur Energieversorgung leisten können. Es wird insbesondere dargestellt, wie der Einsatz regenerativer Energieträger und damit deren Wettbewerbsfähigkeit durch Klimaschutzziele und durch die Preise fossiler Energieträger beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang wird mit Hilfe des dualen Optimierungsproblems eine detaillierte Analyse der

langfristigen Strompreise durchgeführt. Die Zusammenhänge zwischen den Schattenpreisen und Kosten innerhalb des Energiesystems werden aufgezeigt. Weiterhin werden Bandbreiten für die marginalen Treibhausgasvermeidungskosten unterschiedlicher Technologien abgeleitet, Angebotskurven für regenerativ erzeugten Strom erstellt sowie das Energiesystem und speziell der Einsatz regenerativer Energien als Funktion eines Treibhausgasminderungsziels dargestellt. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Effekte einer Förderung erneuerbarer Energien auf die Energiewirtschaft erörtert. Hierbei werden einerseits die Effekte auf den Energieverbrauch, die Versorgungssicherheit, die Emissionen sowie die Preise der Energieträger und Emissionsrechte untersucht, andererseits wird analysiert, wie die Fördermaßnahmen von anderen Größen im Energiesystem, z. B. Importpreise, Klimaschutzziele, beeinflusst werden.

Schlussfolgerungen bezüglich des Beitrags erneuerbarer Energien in der zukünftigen Energieversorgung werden in Kapitel 6 zusammengefasst. Weiterhin wird dort ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

6 Schlussbetrachtung

Ein Schwerpunkt der energie- und umweltpolitischen Diskussion in Deutschland bildet die Frage, wie sich in Zukunft vor dem Hintergrund der Globalisierung und Liberalisierung der Energiemärkte die für den Klimawandel verantwortliche Emission von Treibhausgasen bei der Energienutzung mindern lässt. Neben Maßnahmen zur Energieeinsparung, zur effizienteren Energieumwandlung sowie der Substitution emissionsintensiver durch emissionsärmere Energieträger stellt die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger eine Option zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen dar. Weiterhin lässt sich im Hinblick auf die vergleichsweise geringen fossilen Energieressourcen in Deutschland durch den Ausbau der regenerativen Energienutzung die Abhängigkeit von Energieimporten mindern. Deutschland besitzt prinzipiell auch ausreichende Potenziale, um einen Großteil der jetzigen Energieversorgung aus erneuerbaren Energieträgern zu decken, jedoch ist ihre Nutzung heute in den meisten Fällen unter den Wettbewerbsbedingungen der liberalisierten Energiemärkte noch nicht konkurrenzfähig, so dass Förderinstrumente, die die Kostendifferenz zwischen der Energieversorgung aus regenerativen und konventionellen Quellen reduzieren, für eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger in der Energieversorgung erforderlich sind.

Vor diesem Hintergrund wurde in der Arbeit untersucht, welchen Beitrag erneuerbare Energieträger in Deutschland zur zukünftigen Energieversorgung bis zum Jahr 2050, insbesondere in der Stromerzeugung, und zur Minderung von Treibhausgasemissionen leisten können. Zur Bewertung der Rolle erneuerbarer Energieträger sind mit Blick auf das Gesamtenergiesystem Interdependenzen zwischen der Nutzung erneuerbarer Energieträger und den übrigen Bereichen und Sektoren des Energiesystems zu berücksichtigen. Zu den zu beachtenden Wechselwirkungen zählen u. a.:

- die energetische und sektorale Kopplung der Technologien innerhalb des Energiesystems, aus der sich durch die kombinatorisch hohe Zahl an denkbaren Technologieketten zur Deckung einer Energienachfrage ein komplexes System ergibt,
- die dynamische Kopplung durch Investitionsentscheidungen, die abhängig von der Lebensdauer die Struktur des Energiesystems langfristig beeinflussen können,
- die Kopplung durch Energieträgerpreise, die sowohl von Faktoren der Produktions- als auch von der Nachfrageseite des Energieträgers sowie weiteren globalen Bedingungen (z. B. Treibhausgasminderungsverpflichtung) abhängen und als Benchmark für die Wirtschaftlichkeit der die Energieträger bereitstellenden Technologien herangezogen werden kann,
- die Kopplung durch umweltpolitische Instrumente, z. B. einer THG-Minderungsverpflichtung, die durch Berücksichtigung der im Energiesystem globalen marginalen THG-Vermeidungskosten bzw. THG-Zertifikatspreises in den Erzeugungskosten einer Technologie zu einer weiteren preisseitigen Kopplung zwischen verschiedenen Technologien und Energieträgern führt,
- die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen umweltpolitischen Instrumenten, wie beispielsweise einer THG-Minderungsverpflichtung und einer Quote für die Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern,

- die Konkurrenz alternativer Nutzungsmöglichkeiten einer regenerativen Ressource, wie der landwirtschaftlichen Fläche, die zur photovoltaischen Stromerzeugung, zur solarthermischen Nahwärmegewinnung oder dem Energiepflanzenanbau genutzt werden kann.

Die intermittierende Natur der Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie, die die Bereitstellung von Reserveleistung verlangt, stellt einen weiteren Aspekt dar, der bei der Analyse erneuerbare Energieträger zu berücksichtigen ist.

Um die genannten Aspekte bei der Untersuchung berücksichtigen zu können, wurde in dieser Arbeit eine systemanalytische und modellgestützte Vorgehensweise gewählt. Mit Hilfe des Energiesystemmodellgenerators TIMES wurde ein technologisch detailliertes Modell des deutschen Energiesystems von der Primärenergiebereitstellung über die Umwandlungs- und Endenergiesektoren bis zur Nutzenergienachfrage entwickelt. Die technischen Angebotspotenziale der Windenergie, der Photovoltaik, der Solarthermie und des Energiepflanzenanbaus wurden im Modell über Flächenpotenziale abgebildet, so dass sich die konkurrierenden Verwendungsmöglichkeiten der begrenzten Fläche darstellen und im Fall der Windkraft Repowering-Maßnahmen abbilden lassen. Weiterhin wurde das Gleichungssystem um Gleichungen zur Beschränkung der maximalen Verfügbarkeit von Entnahmekondensations-KWK-Anlagen im Gegendruck- und Kondensationsbetrieb erweitert, so dass sich Biomasse-HKW realitätsgetreuer im Modell beschreiben lassen. Des Weiteren wurde an den Modellgenerator ein Bilanzierungsmodell gekoppelt, das ausgehend von der optimalen Lösung z. B. die Berechnung des spezifischen Primärenergieverbrauchs, der spezifischen Emissionen und der spezifischen Gesteungskosten von Energieflüssen und Energieträgern unter Berücksichtigung der Prozessketten ermöglicht.

Die geringe Transparenz der Lösung ist ein häufig geäußerter Vorwurf an optimierende Energiesystemmodelle, die von Kritikern daher auch als „Black box“ Modelle bezeichnet werden. Zur besseren Untersuchung der Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen den Instrumenten einer Quote für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern und einer THG-Minderungsverpflichtung sowie zur Analyse der Auswirkungen dieser Instrumente auf das Energiesystem wurden in dieser Arbeit drei sich z. T. ergänzende methodische Ansätze betrachtet und implementiert: die Analyse des dualen Optimierungsproblems, das Verfahren der Sensitivitätsanalyse und die Methode der parametrischen Programmierung.

Die in der dualen Formulierung des linearen Optimierungsproblems verwendeten dualen Variablen ermöglichen eine monetäre Bewertung von knappen Ressourcen (z. B. Energieträgern, Kraftwerkskapazitäten) sowie von Restriktionen (z. B. THG-Minderungsziel) durch Preise, während die dualen Gleichungen die Relationen zwischen den verschiedenen Preisen beschreiben. Durch Betrachtung des dualen Problems konnten in die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Technologie neben den Gesteungskosten der durch Restriktionen induzierte Wert oder die mit ihnen verbundenen Kosten quantitativ integriert werden. Die Preise für Emissionsrechte oder für Zertifikate regenerativ erzeugten Stroms sind anschauliche Beispiele für die Bewertung einer THG-Minderungsverpflichtung oder einer Quote an regenerativ erzeugtem Strom.

Die Sensitivitätsanalyse, die den Effekt von marginalen Parameteränderungen auf die optimale Lösung des Energiemodells ermittelt, wurde hier dazu verwendet, um zu untersuchen, welche Größen die dualen Variablen bestimmen. Hierdurch lässt sich die Frage beantworten,

welche Entscheidungen und Technologien bestimmend für die Strompreise, die THG-Zertifikatspreise oder die Preise von Zertifikaten grünen Stroms sind.

Während die Formulierung des dualen Energiesystemmodells und die Sensitivitätsanalyse dazu dienen, das Modellverständnis zu vertiefen, die Interdependenzen innerhalb des Energiesystems aufzuzeigen und die sich aus der Optimierung ergebenden Strategien zu analysieren, wird die parametrische Programmierung zur Variation von exogen vorgegebenen Parametern über größeren Wertebereichen genutzt, um so die Auswirkungen von beispielsweise unterschiedlich hohen THG-Minderungszielen auf das Energiesystem zu untersuchen. Für diese Variationen wurde wie auch schon für die Sensitivitätsanalysen ein auf der optimalen Partition der Problematrix beruhendes Verfahren verwendet, so dass sich Variationen der Parameter der rechten Seite und der Kostenparameter effizient berechnen ließen. Für die Variation der Matrixkoeffizienten erwies sich die direkte Variation der Koeffizienten einer zuvor jedoch reduzierten Modellmatrix als praktikablere Vorgehensweise.

Mit Hilfe des entwickelten TIMES Modells für Deutschland sowie der Analysemethoden wurde untersucht, welche Rolle erneuerbare Energieträger in der deutschen Energieversorgung bis zum Jahr 2050 spielen können. Die Fragestellung wurde dabei aus zwei Blickwinkeln betrachtet, zum einen wurde untersucht, welche Auswirkungen eine durch eine Quote vorgegebene verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung hat (Zielszenario Erneuerbare Energien), zum anderen wurde analysiert, welchen Beitrag erneuerbare Energien zur Erreichung eines vorgegebenen Klimaschutzziels leisten können (Zielszenario Treibhausgasminderung). Weiterhin wurde eine Kombination der beiden Instrumente betrachtet sowie untersucht, ob aufgrund der hohen Importabhängigkeit Deutschlands eine Erhöhung der Importpreise, insbesondere für Erdgas die Konkurrenzfähigkeit der erneuerbaren Energieträger verbessert.

Zusammenfassend zeigt die quantitative Analyse, dass die Nutzung erneuerbarer Energien insbesondere in der Stromerzeugung, wie der Zeitraum 2030 bis 2050 im Zielszenario THG zeigt, durch die in diesen Jahren vergleichsweise hohen THG-Zertifikatskosten eine kosteneffektive Maßnahme zur Emissionsminderung darstellen kann. Zu den erneuerbaren Energieträgern, die unter diesen Bedingungen in Deutschland in der Stromerzeugung ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden, zählen die Wasserkraft, die Umgebungswärme, die Geothermie, die Biomasse und die Windenergie. Das gegenüber der Nutzung im Jahr 2002 zusätzliche Ausbaupotenzial der Wasserkraft ist jedoch mit 3,8 TWh vergleichsweise gering. Im Jahr 2050 wird im Zielszenario THG das geothermische Stromerzeugungspotenzial von 8,7 TWh vollständig genutzt, während in der Windstromerzeugung 58 % des Onshore-Potenzials (143 TWh) und 11 % des Offshore-Potenzials (14 TWh) ausgeschöpft werden. Voraussetzung dafür, dass diese Potenziale zu dem ökonomisch sinnvollen Zeitpunkt aktiviert werden, ist jedoch, dass sich die Kosten der THG-Vermeidung in den Energiepreisen niederschlagen, wie dies bei einem Zertifikatshandelssystem der Fall ist. Entscheidende Größe für die Bewertung der Rolle erneuerbarer Energieträger hinsichtlich ihrer Kosteneffektivität zur THG-Minderung sind die marginalen Vermeidungskosten (THG-Zertifikatskosten) des Energiesystems. Die Option der CO₂-Abtrennung und -Deponierung in der Variante THG-DEP und die Möglichkeit des Ausbaus der Kernenergienutzung in der Variante THG-KE haben deutlich niedrigere Zertifikatskosten zur Folge, so dass aufgrund der niedrigeren Energiepreise ein Großteil der erneuerbaren Energiepotenziale nicht mehr kostendeckend genutzt werden kann. Als vergleichsweise robust gegenüber diesen veränderten Rahmenannahmen erweist sich die Nutzung der Wasserkraft, der Bio-

masse, der Geothermie und der Umgebungswärme, während die Windstromerzeugung an schlechten Festlandstandorten und dem Meer unter den veränderten Rahmenbedingungen der Varianten THG-KE und THG-DEP nicht mehr wettbewerbsfähig ist. Der Einfluss von Veränderungen in den Importpreisen für Erdgas und Öl auf die Nutzung erneuerbarer Energieträger ist, wie die untersuchten Variationen zeigen, vergleichsweise gering, da selbst bei Verfolgung von THG-Minderungszielen Erdgas in der Stromerzeugung durch Stein- und Braunkohle und nicht durch erneuerbare Energieträger substituiert wird.

Die mit Hilfe der vorgestellten Methoden und Modelle durchgeführten Analysen erheben nicht den Anspruch, die zukünftige Entwicklung des Energiesystems zu prognostizieren, sondern es soll vielmehr aufgezeigt werden, wie sich verschiedene Größen und Entscheidungen in dem aufgrund der energieseitigen, preisseitigen, intertemporalen und instrumentalen Kopplungen komplexen Energiesystem gegenseitig beeinflussen. Die durch die Optimierung gewonnenen Strategien basieren zum Teil auf Prognosen, die über einen so langen Zeitraum mit Unsicherheiten behaftet sind, wie z. B. die Energiepreisentwicklung, oder auf Annahmen, die die von der Gesellschaft in Zukunft zu treffenden Entscheidungen, z. B. in der Klimaschutzpolitik, durch die vollständige Voraussicht des Modellansatzes vorwegnehmen. Mit Hilfe der hier entwickelten Methoden der Sensitivitätsanalyse und der parametrischen Programmierung kann untersucht werden, wie robust oder sensitiv die mit dem Energiesystemmodell gewonnenen Strategien hinsichtlich der Annahmen sind. Um die Unsicherheit bezüglich der die Entscheidungen besonders stark beeinflussenden Parameter in die Lösung einfließen zu lassen, könnte die Endogenisierung von Unsicherheiten in den Modellgenerator TIMES, z. B. mittels der stochastischen Programmierung /Birge und Louveaux 1997/, ein zukünftiges Forschungsgebiet darstellen.