

## **DIE ENERGETISCHE NUTZUNG VON BIOMASSE – TECHNISCHE, ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE ERFAHRUNGEN ANHAND AUSGEWÄHLTER EUROPÄISCHER BEISPIELE**

*Helmuth-M. Groscurth<sup>1</sup> und Isabel Kühn\**

\*Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Postfach 10 34 43, 68034 Mannheim;  
Tel.: +49 / 621 / 1235-216; Fax +49 / 621 / 1235-226; E-Mail: kuehn@zew.de

### **1. Ziele und Methoden**

Biomasse gilt als die erneuerbare Energiequelle mit dem höchsten Potential, um mittelfristig den Energiebedarf der Europäischen Union zu decken [LTI-Research Group, 1998]. Sie erreicht schon heute Anteile am Primärenergieeinsatz von 23% in Finnland, 18% in Schweden und 12% in Österreich. Die Biomasse hebt sich von anderen erneuerbaren Energiequellen ab durch die Vielfalt an festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen, die aus ihr gewonnen werden können, und die höchst unterschiedlichen Umwandlungstechniken, die zu ihrer Nutzung eingesetzt werden.

Ziel des von der Europäischen Kommission (DG XII) geförderten „BioCosts“-Projekts<sup>2</sup> war es, die energetische Nutzung von Biomasse anhand ökonomischer und ökologischer Kriterien umfassend zu analysieren. Dabei wurde eine repräsentative Auswahl von Brennstoffen und Techniken zur Strom- und Wärmeerzeugung untersucht.<sup>3</sup> Die verschiedenen Fallstudien, die in fünf europäischen Ländern durchgeführt wurden, sind in Tab. 1 zusammengestellt. In dem meisten Fällen handelt es sich um existierende Anlagen, für die Betriebserfahrungen vorliegen, lediglich in Ausnahmefällen wurden geplante Anlagen betrachtet. Jede Biomasse-Technologie wurde mit einer Referenztechnologie verglichen, für die fossile Brennstoffe eingesetzt werden.

Für die ökonomische und ökologische Bewertung wurden die jeweiligen Brennstoffzyklen in drei Stufen unterteilt: Brennstoffherstellung, Energieumwandlung und Entsorgung von

---

<sup>1</sup> Seit April 1999: Hamburgische Electricitätswerke AG (HEW), Überseering 12, 22297 Hamburg.

<sup>2</sup> Dieser Artikel basiert auf dem „Publishable Report“ des Forschungsprojektes „Total Costs and Benefits of Biomass in Selected Regions of the European Union (BioCosts)“, das von der Europäischen Kommission im Rahmen des Forschungsprogramms JOULE III unter der Nummer JOR3-CT95-0006 gefördert wurde. Beteiligt an diesem Projekt waren A. de Almeida (e), A. Bauen (b), F.B. Costa (e), S.-O. Ericson (c), J. Giegrich (h), G. Gosse (i), N. von Grabczewski (a), H.-M. Groscurth (Projektleiter – a), D.O. Hall (b), O. Hohmeyer (a), K. Jörgensen (g), C. Kern (f), I. Kühn (a), B. Leviel (i), R. Löfstedt (g), J. da Silva Mariano (e), P.M.G. Mariano (e), N.I. Meyer (d), P.S. Nielsen (d), C. Nunes (e), A. Patyk (h), E. Poitrat (j), G.A. Reinhardt (h), F. Rosillo-Calle (b), I. Scrase (b), C. Vergé (i) und B. Widmann (f) aus folgenden Institutionen: (a) Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW, Projekt-Koordination); (b) King's College, University of London, Division of Life Sciences; (c) Vattenfall Utveckling AB, Bioenergy Programme; (d) Technical University of Denmark, Department of Buildings and Energy; (e) University of Coimbra, Instituto de Sistemas e Robotica; (f) Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München-Weihenstephan; (g) University of Surrey, Centre for Environmental Strategy; (h) Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu); (i) Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Unite de Bioclimatologie; (j) Agence de L'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

<sup>3</sup> Die ebenfalls untersuchte Herstellung und Nutzung flüssiger Treibstoffe für Transportzwecke kann hier aus Platzgründen nicht dargestellt werden. Es wird daher auf den Projektbericht verwiesen.

Tab. 1: Fallstudien des BioCosts-Projekts.

Fallstudie	Anlage / Ort	Kurzbezeichnung	
		Biomasse	Referenzfall
– Nutzung von Restholz aus der Forstwirtschaft in einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung mit Rauchgaskondensation im Heizkraftwerk Nässjö, Schweden, im Vergleich zur Nutzung polnischer Kohle in derselben Anlage (ohne Rauchgaskondensation)	Heizkraftwerk Nässjö, Schweden 9 MW <sub>el</sub> , 27 MW <sub>th</sub> (Referenz: 21 MW <sub>th</sub> )	s1-o	s1-r
– Industrielle Kraft-Wärme-Kopplung mit Kessel und Turbine im Vergleich zu einem Dieselmotor-Blockheizkraftwerk (BHKW) betrieben mit schwerem Heizöl	Fabrik für Pressspanplatten, Mangualde, Portugal		
– Fall 1: Holzabfälle (Rinde, Sägemehl)	3 MW <sub>el</sub> , 23 MW <sub>th</sub>	p1-o	p1-r
– Fall 2: Holz aus Kurzumtriebsplantagen	3,3 MW <sub>el</sub> , 12 MW <sub>th</sub> r: 6,3 MW <sub>el</sub> , 7,6 MW <sub>th</sub>	p2-o*	p2-r
– Nutzung von Biogas aus Gülle in einem Motor-BHKW im Vergleich zur Nutzung von Erdgas aus einem dänischen Erdgasfeld in derselben Anlage	Kommunale Kraft-Wärme-Kopplung, Häs-høj, Dänemark 0,8 MW <sub>el</sub> , 1.4 MW <sub>th</sub>	dk-o	dk-r
– Physikalisch-chemische Vergasung von Holz			
– Hochdruck-Vergasung von Restholz aus der Forstwirtschaft im Vergleich zum Kohle-Heizkraftwerk in Nässjö (s1-r)	Kommunale Kraft-Wärme-Kopplung, Värnamo, Schweden 6 MW <sub>el</sub> , 9 MW <sub>th</sub>	s2-o	s2-r ≈ s1-r
– Vergasung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen bei Atmosphärendruck im Vergleich zu einem typischen britischen Kohlekraftwerk	Kraftwerk in Eggborough, Großbritannien 10 MW <sub>el</sub>	uk-o*	uk-r
– Produktion von kaltgepresstem Rapsöl zur Nutzung in einem adaptierten Dieselmotor-BHKW im Vergleich zur Nutzung von leichtem Heizöl (Diesel) in einer vergleichbaren Anlage	Kommunale Kraft-Wärme-Kopplung in Weißenburg, Deutschland 0,22 MW <sub>el</sub> , 0,22 MW <sub>th</sub>	d1-o	d1-r

\* Rein konzeptionelle Fallstudien.

Reststoffen. Im Mittelpunkt der ökonomischen Analyse standen die Bestimmung der anlagen-spezifischen Gestehungskosten von Strom und Wärme sowie die Abschätzung von Arbeitsplatzeffekten. Die Gestehungskosten wurden bestimmt als Summe von Investitions-, Personal- und Brennstoffkosten sowie den Kosten für Betrieb und Wartung. Länderspezifische Faktoren wie Steuern und Subventionen wurden soweit wie möglich korrigiert, um die Vergleichbarkeit der Fallstudien zu verbessern. Der direkte Arbeitseinsatz für die Biomasse-Brennstoffzyklen wurde bei den Betreibern erhoben. Indirekte Arbeitsplatzeffekte, die bei der Produktion der Biomasse-Anlagen selbst entstehen, sowie die Effekte bei der Nutzung fossiler Brennstoffe wurden mit Hilfe des Input-Output-Modells EMI 2.0 des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) berechnet.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Input-Output Tabellen beschreiben die Verflechtung einer Volkswirtschaft, indem sie die gegenseitigen Lieferungen und Bezüge der Wirtschaftssektoren in Geldeinheiten festhalten. Daneben existieren Koeffizienten, die den Arbeitsaufwand in den einzelnen Sektoren beschreiben und es ermöglichen, Vorleistungen auch in Form von Arbeitsstunden zu errechnen. Das I/O-Modell EMI 2.0 des ZEW verfügt darüber hinaus über Emis-

Für jede Stufe der Biomasse-Brennstoffzyklen und die jeweiligen fossil befeuerten Referenzfälle wurden detaillierte Emissionsinventare erstellt. Indirekte Emissionen aus der Produktion der Anlagen wurden dabei wiederum mit dem I/O-Modell EMI 2.0 abgeschätzt.

Eine wichtige Aufgabe des BioCosts-Projekts war die Bestimmung der sog. „externen Kosten“ der Biomasse-Nutzung. Darunter versteht man in der neoklassischen ökonomischen Theorie diejenigen Kosten eines Produktes oder einer Dienstleistung, die nicht vom Nutzer, sondern von (unbeteiligten) Dritten getragen werden. Zu diesem Thema sind in den letzten Jahren zahlreiche umfassende Studien durchgeführt worden.<sup>5</sup> Dennoch bleibt die Abschätzung externer Kosten mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, die zum einen aus fehlendem Wissen resultieren, zum anderen jedoch auch aus methodischen und ethischen Problemen, die grundsätzlich nicht lösbar sind. Diese Diskussion hier aufzurollen, würde zu weit führen [vgl. dazu z.B. IPCC 1996, 9]. Viele Forscher kommen jedoch zu dem Schluß, daß das traditionelle Ziel der neoklassischen Theorie der Ökonomie – nämlich einen pareto-optimalen Zustand der Wirtschaft zu erreichen, in dem niemand besser gestellt werden kann, ohne daß jemand anderes schlechter gestellt wird – zu ambitioniert ist im Hinblick auf Umweltprobleme.

Trotzdem benötigen Entscheidungsträger Unterstützung bei der Lösung von schwerwiegenden Umweltproblemen. Wir stimmen daher mit Miser und Quade [1985, 15] überein, für die „Systemanalyse ein multi-disziplinärer Problemlösungsansatz ist, der entwickelt wurde, um komplexe Probleme zu behandeln, die in öffentlichen und privaten Unternehmungen und Organisation entstehen.“<sup>6</sup> Da wissenschaftliche Fakten für viele komplexe (Umwelt-) Probleme nur in begrenztem Umfang ermittelt werden können, ist das Ziel der Systemanalyse in erster Linie, mit einem begrenzten Budget an Zeit und Geld sinnvolle Maßnahmen und Entscheidungen vorzuschlagen, auch wenn das Wissen über das zugrunde liegende System noch unvollständig ist. In diesem Sinne wurden im BioCosts-Projekt eine Reihe von Indikatoren erarbeitet, mit deren Hilfe Entscheidungsträger die ökologische und ökonomische Leistungsfähigkeit von Biomasse als Energieträger beurteilen können. Indem wir methodische Probleme offenlegen, möchten wir Entscheidungsträger in die Lage versetzen, eine eigene Wahl zwischen den zugrunde liegenden Annahmen und Werturteilen zu treffen und die Konsequenzen dieser Wahl zu verstehen.

Wir machen ausdrücklich darauf aufmerksam, daß insbesondere die im Folgenden genannten Kosten für Schäden an der menschlichen Gesundheit auf gesellschaftlichen Werturteilen basieren, die den Präferenzen der heutigen Generation entsprechen (soweit diese überhaupt sinnvoll meßbar sind) und die sich in Zukunft durchaus ändern können. Wir stellen nur diejenigen Effekte dar, die das Gesamtergebnis merklich beeinflussen, und wir nennen Schadenskosten nur für Effekte, bei denen zumindest die naturwissenschaftliche Komponente des Schadens mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann.

In diesem Sinne konnten im BioCosts-Projekt externe Kosten lediglich für die Auswirkungen der Emissionen von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Partikeln (TSP) auf die menschliche Gesundheit ermittelt werden. Dabei wurde das Computermodell EcoSense

---

sionskoeffizienten, mit deren Hilfe sich indirekte Emissionen aus der Produktion von Gütern und Dienstleistungen im Laufe der Vorleistungskette ermitteln lassen [Hohmeyer und Walz 1992].

<sup>5</sup> Vgl. dazu u.a. CEC 1998 und 1995, Friedrich und Krewitt 1997, Hohmeyer, Ottinger und Rennings 1996, ORNL/ RFF 1994, RCG/ Tellus 1993-1995.

<sup>6</sup> Sinngemäße Übersetzung, eigene Hervorhebung.

verwendet, das im Rahmen des EU-Projekts ExternE entwickelt wurde [CEC 1995 und 1998]. Dieses Modell folgt der sogenannten Wirkungspfad-Analyse, bei der

- die Ausbreitung von Schadstoffen aus einer einzelnen stationären Quelle (Schornstein),
  - die Entstehung sekundärer Schadstoffe (wie z.B. Nitraten und Sulfaten),
  - die Änderung der Schadstoffkonzentration im Untersuchungsgebiet (hier ganz Europa),
  - der physikalische Schaden mit Hilfe sogenannter Dosis-Wirkungs-Beziehungen, sowie
  - der monetäre Wert dieser Schäden
- nacheinander berechnet werden.

Die ökonomische Theorie der externen Kosten und die darauf basierende Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse ist unseres Erachtens auf das Problem globaler Klimaänderungen nicht anwendbar. Weder die Schäden einer Klimaänderung noch die volkswirtschaftlichen Kosten ihrer Vermeidung lassen sich auch nur annähernd bestimmen [IPCC 1996, 9]. Wir schlagen daher vor, das Konzept der „starken Nachhaltigkeit“ (strong sustainability) anzuwenden [vgl. dazu z.B. Daly 1996]. Dabei werden Schädigungen der natürlichen Lebensgrundlagen nicht länger gegen ökonomische Vorteile aufgerechnet, sondern müssen auf ein von der Gesellschaft akzeptiertes Maß beschränkt werden. Die Festlegung solcher Grenzen erfolgt idealerweise in einem offenen Diskurs. Zu ihrer Umsetzung können dann, anstelle der bisher dominierenden ordnungsrechtlichen Vorschriften, durchaus ökonomische Instrumente wie Steuern oder handelbare Zertifikate eingesetzt werden. Als Indikator für die Kosten, die durch die Einführung und Umsetzung einer solchen Strategie entstehen, können die Vermeidungskosten für die Emission einer zusätzlichen Einheit klimaschädlicher Gase (also hier hauptsächlich Kohlendioxid und Methan) dienen.

Bei der Definition der verschiedenen Stufen des Brennstoffzyklus muß besonderer Wert auf die Festlegung der Systemgrenzen und des Zurechnungsverfahrens gelegt werden. Die Systemgrenzen definieren, welche Effekte der Brennstoffnutzung zuzurechnen sind und welche außer Betracht bleiben. Das Zurechnungsverfahren legt fest, wie die verursachten Effekte aufzuteilen sind, wenn mehrere Güter und/ oder Dienstleistungen gemeinsam erbracht werden.

Eine Grundregel im BioCosts-Projekt war, die Biomasse-Nutzung mit einem fossil gefeuerten Referenzfall zu vergleichen und alle Veränderungen, seien sie positiv oder negativ, vorteilhaft oder schädlich, der Biomasse zuzurechnen. Die Systemgrenzen mußten entsprechend weit gefaßt werden. Der Anbau von Energiepflanzen, zum Beispiel, wurde mit der unmittelbar konkurrierenden Nutzung desselben Bodens verglichen, also konventioneller Landwirtschaft von Lebens- oder Futtermitteln oder der Teilnahme am Flächenstilllegungsprogramm der EU. Auf der Umwandlungsstufe wurden Energieeffizienz, Kosten und Emissionen der Biomasse-Nutzung mit denen fossiler Brennstoffe verglichen. Dabei wurden mittels Input-Output-Analyse auch indirekte Effekte berücksichtigt. Zusätzlich wurden indirekte Effekte, die nicht mit dem I/O-Modell erfaßt werden konnten, einbezogen, sofern sie signifikant zum Gesamtergebnis beitrugen. Dies gilt besonders für die Nutzung von Düngemitteln für Energiepflanzen, deren Herstellung sehr energieintensiv ist und die somit auch erhebliche Emissionen verursacht [Patyk und Reinhardt 1997].

In fast allen Fallstudien mußte ein sinnvoller Weg gefunden werden, um die Umwelteffekte und Kosten den verschiedenen Gütern und Dienstleistungen, die produziert werden, zuzurechnen. In erster Linie handelt es sich dabei um Wärme und Strom, in einigen Fällen aber auch um marktfähige Nebenprodukte wie Presskuchen aus der Rapsproduktion, der als Futtermittel verwendet werden kann. Dabei gibt es keine eindeutige Lösung ohne Nachteile. Die

beste Vorgehensweise ist der Systemansatz, bei dem zwei Systeme verglichen werden, die einen identischen Satz an Gütern und Dienstleistungen bereitstellen. Deren Umwelteffekte und Kosten können dann auf Systemebene direkt miteinander verglichen werden. Dieser Ansatz konnte im BioCosts-Projekt nicht gewählt werden, da alle Ergebnisse bezogen auf die Energieform, also Strom oder Wärme, darzustellen waren. Nach intensiver Diskussion wurde im Projekt entschieden, alle ökologischen und ökonomischen Effekte in erster Linie nach dem Energiegehalt und, wo dies wie beim Presskuchen nicht sinnvoll ist, nach den Massen aufzuteilen. Somit wird eine Kilowattstunde Strom als äquivalent zu einer Kilowattstunde Wärme betrachtet, obwohl die energetische Qualität (gemessen an der Arbeitsfähigkeit der Energiemenge) unterschiedlich ist. Auf diese Weise können jedoch alle Projektergebnisse gut miteinander verglichen werden. Allerdings muß diese Zurechnungsregel im Hinterkopf behalten werden, wenn die Ergebnisse mit denen anderer Projekte oder mit den Marktpreisen von Strom und Wärme verglichen werden. Weitere Auswirkungen von Nebenprodukten, etwa vermiedene Emissionen bei der Herstellung der durch den Presskuchen ersetzten Futtermittel, wurden nicht weiter verfolgt.

## 2. Fallstudien zur Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse

### 2.1. Ökonomische Kriterien: Gestehungskosten und Arbeitsmarkteffekte

Die Gestehungskosten für Strom und Wärme, die für die einzelnen Fallstudien aus Tab. 1 ermittelt wurden, sind in Abb. 1 zusammengestellt.<sup>7</sup> Lediglich für zwei Fallstudien liegen die Kosten der Biomasse-Nutzung niedriger als für die Nutzung der entsprechenden fossilen Brennstoffe. Dies sind die industrielle Kraft-Wärmekopplung in Mangualde, Portugal (Fall p1-o: 3,0 mEURO/kWh) und das Heizkraftwerk in Nässjö, Schweden (Fall s1-o: 19 mEURO/kWh). Beide nutzen Restholz aus der Forst- bzw. Holzwirtschaft.

Die Projekte zur Vergasung von Holz (s2-o, uk-o) weisen hohe Investitionskosten für die Umwandlungstechnik auf. Dies ist etwas überraschend, da die eigentlich innovative und daher teure Vergasungstechnik in den Brennstoffkosten enthalten ist. Es handelt sich jedoch hier um hoch-integrierte Anlagen, so daß es oft schwierig war, die einzelnen Anlagenteile von einander abzugrenzen und den Stufen des Brennstoffzyklus zuzuweisen. Außerdem sollten für diese Demonstrationsanlagen auf jeden Fall noch erhebliche Kostenreduzierungen möglich sein.

Die Nutzung von Biogas in Dänemark (dk-o) ist vergleichsweise teuer, aber nicht wesentlich teurer als der Referenzfall mit Erdgas (dk-r). Das hohe Kostenniveau wird zum Teil verursacht durch den dezentralen Charakter der Anlage und durch die Tatsache, daß Erdgas teurer ist als andere fossile Energieträger. Die Biogaserzeugung selbst ist teuer, da es sich um eine neue Technik handelt, die sich zumindest teilweise noch im Demonstrationsstadium befindet.

Die zweite portugiesische Fallstudie (p2-o), die auf der Anpflanzung von Kurzumtriebshölzern basiert, kann wirtschaftlich werden, wenn es gelingt, die Kosten der Brennstoffproduktion deutlich zu senken oder wenn fossile Brennstoffe teurer werden.

Der Einsatz von Rapsöl in einem BHKW (d1-o) erscheint dagegen wirtschaftlich wenig sinnvoll, auch wenn man eine wesentlich längere Nutzungsdauer annimmt als die derzeit

<sup>7</sup> Alle Kostenangaben erfolgen in EURO bzw. MilliEURO (1 mEURO = 10<sup>-3</sup> EURO). Dabei wird 1 EURO = 1 ECU gesetzt. Basisjahr für alle Kostenangaben ist 1990.

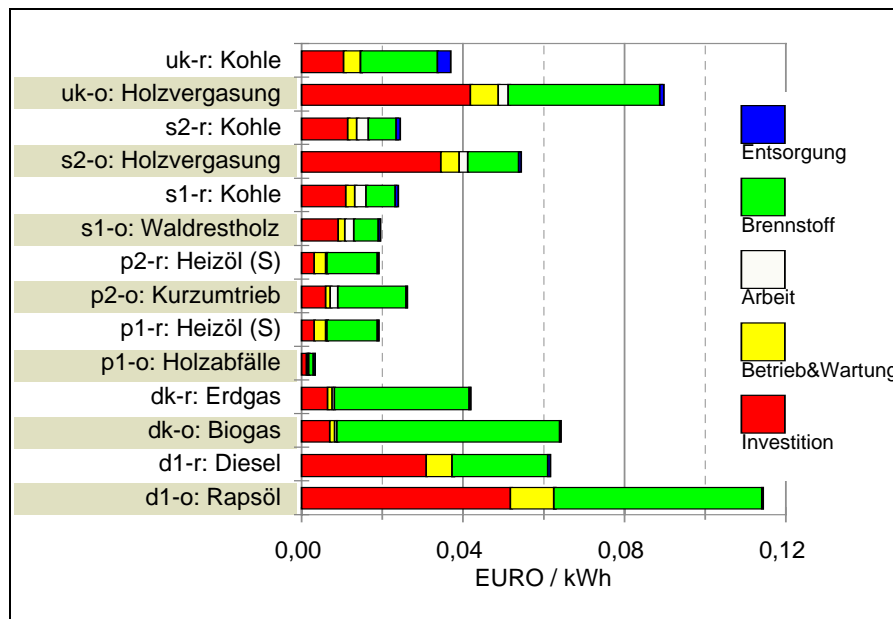


Abb. 1: Gestehungskosten für die Produktion von Strom und Wärme. Die Kosten der Umwandlungsstufe wurden unterteilt in Investitionskosten, Arbeitskosten sowie Kosten für Betrieb und Wartung. Zur Definition der Fallstudien vgl. Tab. 1.

erreichten rund 1300 Vollaststunden pro Jahr. Das Potential zur Kostensenkung ist hier jedoch begrenzt, da der arbeitsintensive Rapsanbau auf lange eingeführten Verfahren beruht.

Die hier gemachten Kostenangaben dürfen nicht mit Marktpreisen verwechselt werden, zum einen weil keine Steuern berücksichtigt wurden und zum anderen weil die Kostenaufteilung zwischen Strom und Wärme nach Projekterfordernissen einheitlich vorgenommen wurde und nicht dem – höchst unterschiedlichen – Vorgehen in der Praxis entspricht. Es handelt sich eher um eine volkswirtschaftliche als eine betriebswirtschaftliche Perspektive.

Die Arbeitsmarkteffekte der einzelnen Techniken sind in Abb. 2 zusammengefasst. Dabei ist der spezifische Arbeitseinsatz in Bezug auf die Gestehungskosten von Strom und Wärme sowie auf die bereitgestellte Energiemenge dargestellt. Die Zahlen zu Arbeitsmarkteffekten sind mit Vorsicht zu behandeln, da sich die verschiedenen Fallstudien in unterschiedlichen Entwicklungsphasen befinden und ihre Kosten und Effizienzen erheblich variieren.

Für den Rapsanbau (d1-o) müssen nach den oben beschriebenen Regeln 65% des Arbeitseinsatz dem Presskuchen – und somit nicht der Energiegewinnung – zugerechnet werden. Deshalb ist die Arbeitsintensität des Rapsöl-Zyklus nur wenig höher als die des Referenzfalls, wenn man die Ergebnisse auf die Gestehungskosten bezieht. Die höhere Arbeitsintensität des Rapsöls wird durch die ebenfalls höheren Kosten kompensiert. Bezieht man die Zahlen dagegen auf die erzeugte Energiemenge, dann benötigt Rapsöl einen etwa doppelt so hohen Arbeitseinsatz in Deutschland wie Heizöl bzw. Diesel. Der hohe Anteil indirekter Effekte in dieser Fallstudie wird durch die außergewöhnliche Einsatzweise dieses BHKW verursacht. Erhöht man dessen Vollaststunden von derzeit 1 260 auf den üblicheren Wert von 5 000 Stunden, dann liegen die indirekten Effekte in der gleichen Größenordnung wie für die vergleichbare Technik der dänischen Fallstudie (dk).

Auch im dänischen Fall (dk-o) ist der Arbeitseinsatz für die Biomasetechnik höher als im Referenzfall. Allerdings ist der spezifische Arbeitseinsatz für die Biogasproduktion geringer als für die Rapsölproduktion, weil keine arbeitsintensiven landwirtschaftlichen Aktivitäten

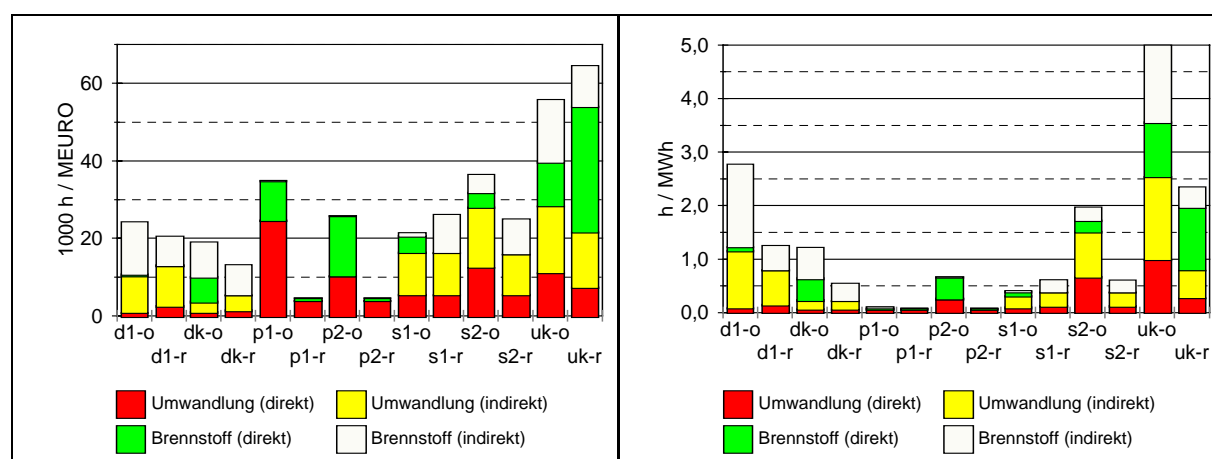


Abb. 2: Spezifische Arbeitsmarkteffekte bezogen auf die Gesteungskosten (in 1000 h/MEURO) und auf die erzeugte Endenergie (in h/MWh). Die Abkürzungen sind in Tab. 1 definiert.

involviert sind. Der substituierte Brennstoff ist Erdgas aus dänischen Gasfeldern. Der Arbeitseinsatz für dessen Gewinnung kann unterschätzt worden sein, da keine direkten Daten verfügbar waren. Die Ergebnisse des I/O-Modells weisen erhebliche Unsicherheiten auf, da die zugrunde gelegte I/O-Tabelle für Dänemark keine getrennten Sektoren für Gas, Öl und Kohle hat.

Für die portugiesischen Fallstudien (p1 und p2) konnten keine indirekten Effekte ermittelt werden, da keine geeignete I/O-Tabelle verfügbar war. Die direkten Arbeitsmarkteffekte der Biomasse-Nutzung sind deutlich höher als im Referenzfall, wenn man sie auf die – sehr niedrigen – Gesteungskosten bezieht. Bezieht man die Effekte dagegen auf die bereitgestellte Energiemenge, dann verschwinden die positiven Effekte fast völlig.

Für die Nutzung von Restholz aus der Forstwirtschaft in Schweden (s1-o) ergab sich ein 20% niedrigerer Arbeitseinsatz als für die Nutzung von polnischer Kohle (s1-r). Dabei wurde die Werte für die fossile Energie wiederum mit dem I/O-Modell bestimmt. Das Ergebnis läßt sich erklären mit dem geringen Arbeitsaufwand für die sehr effizient organisierte Einsammlung und Zerkleinerung des Holzes und dem höheren Energieausstoß der Biomasse-Version des Heizkraftwerkes. Bei der Feuerung mit Holzhackschnitzeln kann der im Rauchgas enthaltene Wasserdampf kondensiert und so zusätzliche Nutzwärme gewonnen werden.

Die Vergasung von Holz in Schweden (s2-o) benötigt mehr Arbeitseinsatz als der Referenzfall (s2-r), da die Brennstoffherstellung aufwendig ist. Außerdem erfordert die Technologie noch hohe Investitionen, die im I/O-Modell hohe indirekte Arbeitsmarkteffekte auslösen. Da diese Kosten aber bei einem Erfolg der Technologie deutlich sinken dürften, würde dann auch der Arbeitseinsatz zurückgehen. Ähnliches gilt für die Holzvergasung in Großbritannien (uk-o). Allerdings weist der Kohleinsatz (uk-r) hier einen höheren spezifischen Arbeitseinsatz auf, da die Kohle – im Gegensatz zu Schweden – im Land und mit im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren niedriger Produktivität gewonnen wird. Der spezifischen Arbeitseinsatz liegt in beiden Fällen (uk-o, uk-r) insgesamt deutlich höher als für die anderen Fallstudien, da nur Strom gewonnen wird und die insgesamt bereitgestellte Energiemenge somit deutlich kleiner ist.

Für Deutschland wurde abgeschätzt, daß zur Bereitstellung von 5% des Energiebedarfs aus Biomasse etwa 60 bis 120 Tausend Arbeitsplätze nötig wären [Groscurth 1998]. Allerdings handelt es sich dabei nicht notwendigerweise um zusätzliche Arbeitsplätze. Zunächst würden

die Arbeitsplätze für die Bereitstellung der ersetzten fossilen Energie entfallen. Da die Biomasse-Nutzung teurer ist als die Nutzung fossiler Energiequellen, stünde das hier zusätzlich eingesetzte Geld für andere Zwecke wie z.B. den Konsum nicht mehr zu Verfügung und es würden Arbeitsplätze in der Produktion von Konsumgütern verloren gehen. Insgesamt ergibt sich ein kleiner, aber positiver Nettoeffekt für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Dieser Effekt reicht aber nicht aus, um einen nennenswerten Beitrag zur Lösung des Arbeitslosigkeitsproblems zu leisten [LTI-Research Group 1998].

## 2.2. Ökologische Effekte: Emissionen, externe Kosten, Klimaproblem

Abb. 3 zeigt die spezifischen Emissionen an konventionellen Schadstoffen und CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für die einzelnen Fallstudien bezogen auf die bereitgestellten Energiemenge, d.h. die Summe von Strom und Wärme. Für die britische Fallstudie (uk) liegen diese Werte höher als für die anderen Fälle, da hier ausschließlich Strom erzeugt wird.

Die höchsten VOC Emissionen weist die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung in Portugal auf. Die Werte liegen zwischen 0,4 und 0,8 g/kWh. Die Brennstoffzyklen mit Dieselmotoren (d1-o, d1-r, p1-r, p2-r) haben VOC Emissionen zwischen 0,1 und 0,2 g/kWh, die im wesentlichen durch die Umwandlungstechnologie und nicht durch den Brennstoff bestimmt werden. Der VOC Ausstoß des Biogas-Zyklus (dk-o) und der Holzvergasung in Großbritannien (uk-o) sowie des britischen Referenzfalls (uk-r) liegen in der gleichen Größenordnung. In diesem Fall werden die Emissionen aber durch die Brennstoffherstellung bestimmt und nicht durch die Umwandlungstechnologie. Die Kraft-Wärme-Kopplung mit Erdgas in Dänemark (dk-r) und alle schwedischen Fallstudien (s1-o, s1-r, s2-o, s2-r) haben sehr geringe VOC Emissionen, die deutlich niedriger als 0,05 g/kWh liegen.

Die BHKW mit Dieselmotoren in Deutschland (d1-o, d1-r) und Portugal (p1-r = p2-r) weisen die bei weitem höchsten NO<sub>x</sub> Emissionen aller Fallstudien auf. Dies ist wiederum nicht auf den Brennstoff, sondern auf die Umwandlungstechnologie zurückzuführen. Das Problem kann durch eine Abgasreinigung (z.B. mittels Katalysator) vermindert werden. Die schwedischen Fallstudien zeigen, daß es möglich ist, die NO<sub>x</sub>-Emissionen von Biomasse-Brennstoffzyklen sehr niedrig zu halten.

Der Einsatz von Biomasse hat grundsätzlich Vorteile bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen, da der Brennstoff fast keinen Schwefel enthält und der Beitrag fossiler Brennstoff während der Gewinnung der Biomasse-Brennstoffe klein ist. Die einzige Ausnahme bildet das Biogas in der dänischen Fallstudie (dk-o), da das konkurrierende Erdgas ebenfalls fast keinen Schwefel enthält und nicht mit LKWs transportiert wird.

Eine Reihe von Biomasse-Anwendungen zeigt vergleichsweise hohe CO-Emissionen (d1-o, d1-r, p1-o, p2-o, uk-o), die ebenfalls eher auf die Umwandlungstechnologie als auf den Brennstoff zurückzuführen sind. Der hohe Schadstoffausstoß ist die Folge von wenig anspruchsvollen Emissionsstandards bzw. der geringen Aufmerksamkeit, die diesem Problem zu Teil wurde. Die britische Vergasungsanlage wurde bisher in dieser Hinsicht nicht optimiert, da es sich um eine Demonstrationseinheit handelt, mit der zunächst die grundsätzliche Machbarkeit der Technik nachgewiesen werden soll. Ähnliches gilt für die Partikelemissionen, die zwar für alle skandinavischen Fälle gering sind, sonst aber auf hohem Niveau liegen.



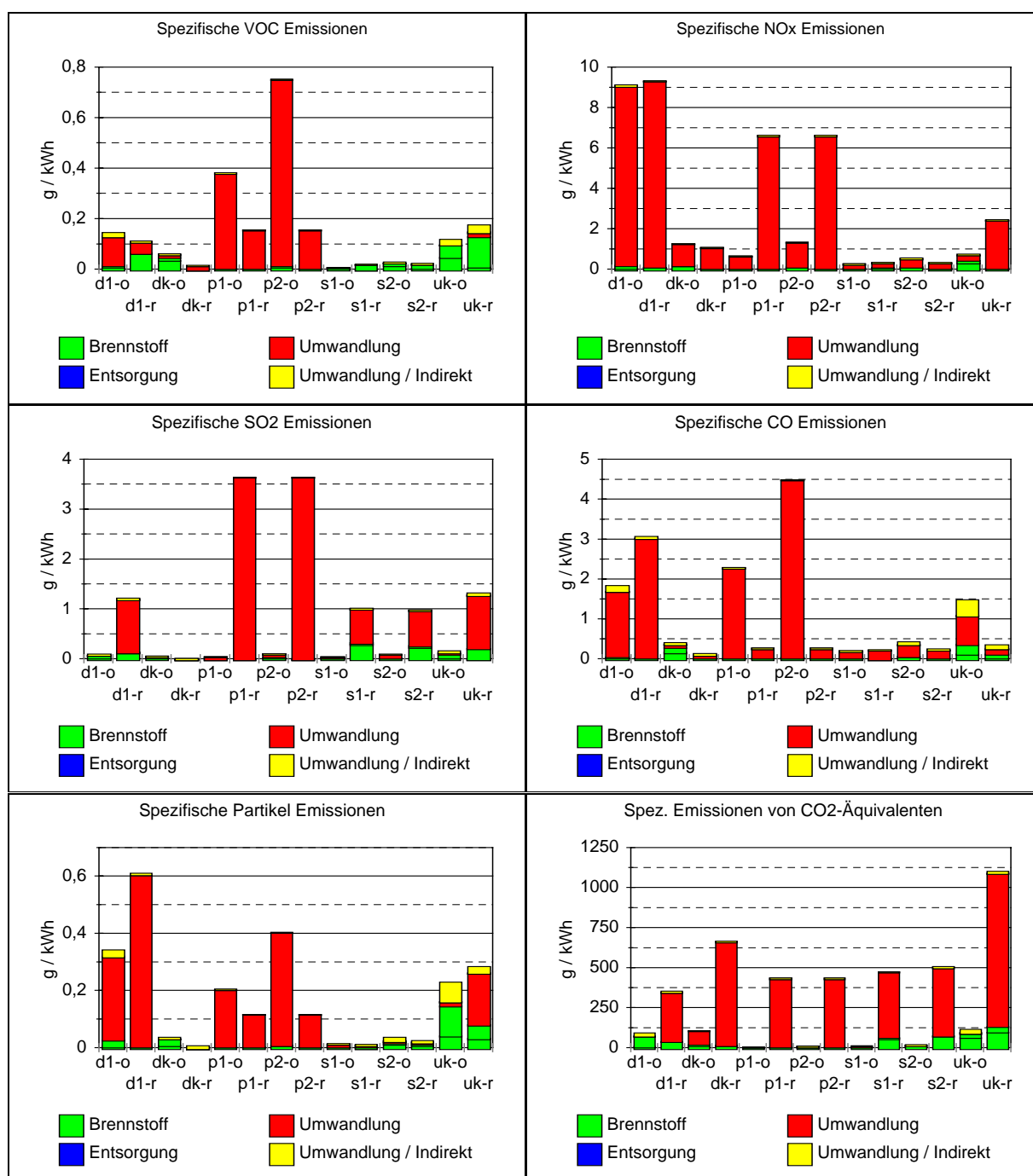


Abb. 3: Zusammenfassung der spezifischen Emissionen von Luftschadstoffen der BioCosts-Fallstudien. Abkürzungen sind in Tab. 1 definiert. Emissionen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bezeichnen CO<sub>2</sub> Emissionen aus fossilen Quellen plus gewichtete Emissionen von Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O).

Abb. 3 zeigt auch, daß die Emissionen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten<sup>8</sup> durch den Einsatz von Biomasse anstelle fossiler Brennstoffe typischer Weise um einen Faktor 10 reduziert werden

<sup>8</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalente fassen die Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und anderen klima-relevanten Gasen wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) zusammen, wobei letztere anhand ihrer Klimawirksamkeit auf die entsprechende Menge CO<sub>2</sub> umgerechnet werden.

können. Lediglich Rapsöl (d1-o) und Biogas (dk-o) weichen hier ab. Für Biogas liegt der Reduktionsfaktor nur bei 6, da der Verbrennungsmotor erhebliche Mengen unverbrannten Methans emittiert. Dies ließe sich durch den Einsatz einer Gasturbine vermeiden, was auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen verringern würde. Beim Rapsöleinsatz ergibt sich lediglich ein Reduktionsfaktor von 4, da bei der Herstellung der beim Rapsanbau benötigten Düngemittel große Mengen fossiler Brennstoffe eingesetzt werden.

Abb. 4 vergleicht die Gesteungskosten für Strom und Wärme (interne Kosten) mit den ermittelten externen Kosten. Letztere beziehen sich auf Gesundheitsschäden durch NO<sub>x</sub>-, SO<sub>2</sub>- und Partikel-Emissionen, die mit dem Modell EcoSense berechnet wurden. In allen Fällen werden die Ergebnisse dominiert durch die chronische Mortalität, die durch sekundäre Schadstoffe (Nitrate, Sulfate) aufgelöst wird. Die Berechnungen basieren auf der Dosis-Wirkungs-Funktion von Pope et al. [1995]. Die Effekte wurden monetarisiert durch eine Bewertung der „verlorenen Lebensjahre“ (years-of-life-lost – YOLL) basierend auf dem „Wert eines statistischen Menschenlebens“ von 3,1 Millionen EURO und einer Diskontrate von 0% [CEC 1995 und 1998]. Diese Bewertung stützt sich auf sogenannte Zahlungsbereitschaftsanalysen, in die natürlich die aktuellen Werturteile der Befragten einfließen. Andere relevante Schäden ergeben sich durch chronische Bronchitis, Asthma, akute Mortalität, sowie „Tage mit verminderter Leistungsfähigkeit“. Alle anderen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit, die in dem Modell abgebildet sind, Schäden an Getreideernten und in der Forstwirtschaft sowie Materialschäden an Gebäuden führten in den Modellrechnungen nicht zu signifikanten Beiträgen.

Die externen Kosten sind in Abb. 4 zum einen für den tatsächlichen Standort der jeweiligen Technik und zum anderen für den Fall angegeben, daß diese Technik in Lauffen (Deutschland) installiert würde. Letzteres ist wichtig, um die Techniken ohne Einflüsse aus der Standortwahl vergleichen zu können. Wie Abb. 4 zeigt, sind die Modellergebnisse äußerst sensitiv gegenüber der Bevölkerungsdichte in den Gebieten, die von der Rauchfahne überstrichen werden. So erhöhen sich beispielsweise die externen Kosten der schwedischen Anlagen – unabhängig vom Brennstoff – um bis zu 400%, wenn für dieselbe Anlage der Standort Lauffen in Deutschland angenommen wird.

Die externen Kosten der untersuchten Fallstudien weisen große Unterschiede auf. Sie reichen von unter 1 bis über 150 mEURO/kWh. Mit Ausnahme des Vergleichs von Biogas mit Erdgas schneiden die Biomasse-Brennstoffzyklen dabei besser ab als die jeweiligen fossilen Referenzfälle. Die Nutzung von Restholz aus der Forstwirtschaft, direkt (s1-o) oder mittels Vergasung (s2-o), ist die vorteilhafteste Option. In einer Reihe von Fällen ergaben sich externe Kosten, die in der gleichen Größenordnung liegen wie die internen Kosten. Dies gilt besonders für die Dieselmotor-BHKWs und Kohlekraftwerke (sowohl in Großbritannien als auch in Deutschland). Von den Biomasse-Zyklen sind dabei, neben dem Rapsölmotor (d1-o), nur die beiden portugiesischen Fallstudien (p1-o, p2-o) betroffen. Der 2. portugiesische Fall (p2-o) ist der einzige, der durch die Internalisierung der hier berechneten externen Kosten wirtschaftlich würde.

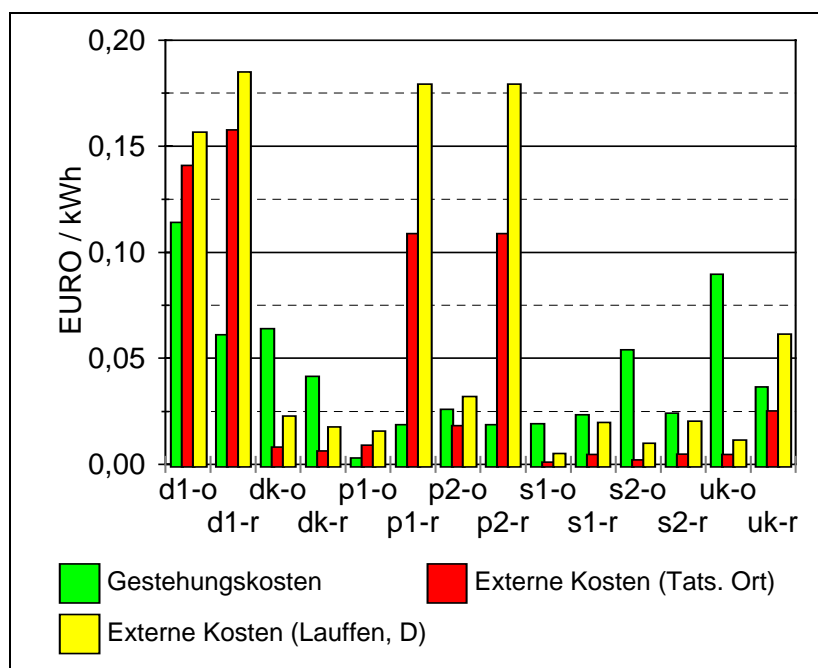


Abb. 4: Gestehungskosten (interne Kosten) und externe Kosten der BioCosts-Fallstudien für Strom und Wärme. Die externen Kosten sind für den tatsächlichen Standort der Anlage und für den Vergleichsort Lauffen in Deutschland angegeben.

Abb. 5 zeigt die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der BioCosts-Fallstudien. Die Vermeidungskosten sind definiert als das Verhältnis der spezifischen Kostendifferenz zur Differenz der spezifischen Emissionen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von Biomasse-Nutzung und Referenzfall. Wenn dabei nur die internen Kosten berücksichtigt werden, dann wird die gesamte Kostendifferenz dem Klimaschutz zugerechnet. Zum Vergleich sind deshalb auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für den Fall angegeben, daß man die Summe von internen und externen Kosten zugrunde legt und somit (bis auf den dänischen Fall) den Kostenvorteil der fossilen Energieträger verringert.

Wir halten die vorliegenden Abschätzungen der Schadenskosten von Klimaänderungen, die aus der Emission von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten resultieren, für zu unsicher, um sie hier direkt in die externen Kosten einzurechnen. Deshalb haben wir in Abb. 5 lediglich zum Vergleich drei Abschätzungen aus der Literatur eingetragen, die zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Zu einer der niedrigsten Abschätzungen gelangt Nordhaus [1991] mit seinem DICE Modell. Er erhält Wert von 1,8 EURO/t CO<sub>2</sub> (7.3 US-\$/t C). Azar und Sterner [1996] haben jedoch gezeigt, daß dieses Ergebnis vor allem darauf beruht, daß eine relativ hohe Diskontrate von 3% auch für langfristige Schäden verwendet wurde, daß die Verweildauer des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre sehr niedrig angesetzt ist, und daß die absolute Schadenshöhe in Industrieländern und Entwicklungsländern als gleichwertig angesehen wird. Mit demselben Modell, aber unter anderen Annahmen zu den drei genannten Punkten gelangen Azar und Sterner zu Werten von bis zu 127 EURO/t CO<sub>2</sub>. Das ExternE Projekt der EU nennt Werte von 15-42 EURO/t CO<sub>2</sub>, die mit Hilfe des FUND Modells berechnet wurden [CEC 1998, Eyre et al. 1997].

Die BioCosts-Fallstudien lassen sich in drei Kategorien einteilen. Zunächst gibt es zwei Fallstudien deren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten negativ sind, da sie ohnehin wirtschaftlich sind (p1-o, s1-o). In diesen Fällen besteht eine klassische „win-win“ Situation selbst unter den

momentanen ökonomischen Bedingungen. Dann gibt es eine Fallstudie mit sehr hohen Vermeidungskosten, nämlich die Rapsölnutzung. Da die finanziellen Ressourcen für den Klimaschutz begrenzt sind, sollte diese Techniken nicht vorrangig zum Einsatz kommen. Die übrigen Fallstudien (dk-o, p2-o, s2-o and uk-o) haben mittlere CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, die in der gleichen Größenordnung liegen wie die im ExternE-Projekt ermittelten Schadenskosten. Die-

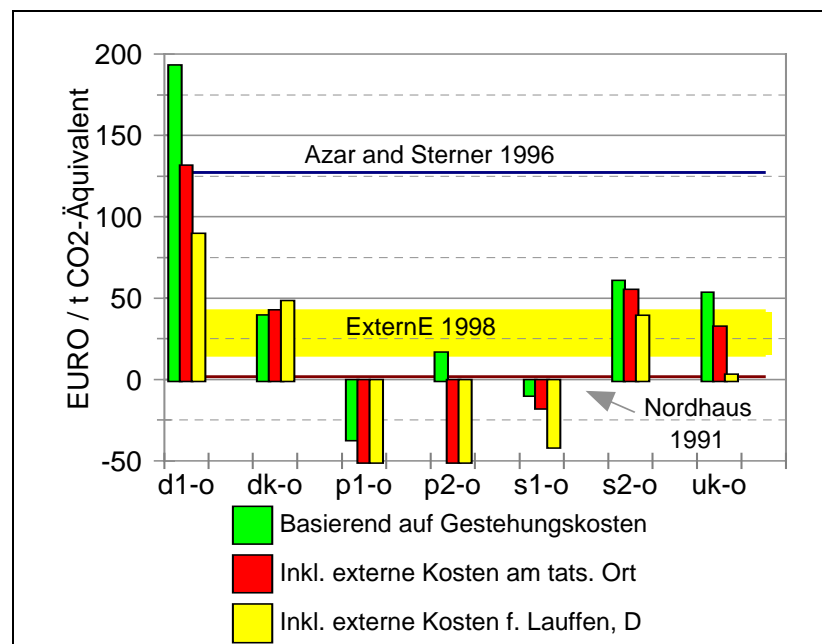


Abb. 5: CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der BioCosts-Fallstudien mit und ohne Berücksichtigung der externen Kosten konventioneller Schadstoffe im Vergleich zu Schadenskosten-Schätzungen aus der Literatur [CEC 1998, Eyre et al. 1997, Nordhaus 1991, Azar und Sterner 1996].

se Techniken sind die interessantesten Optionen für die zukünftige Forschungsförderung und für Markteinführungsprogramme. Außerdem ist zu unterstreichen, daß drei dieser Techniken zwei Umweltvorteile gleichzeitig bieten, Klimaschutz und eine Reduzierung von Gesundheitsschäden durch konventionelle Schadstoffe. Lediglich beim Biogas wird der Klimaschutz mit einem geringen Anstieg der konventionellen Schadstoffe erkaufte, allerdings auf insgesamt niedrigem Niveau.

### 3. Schlußfolgerungen

Auch wenn man die vielen Unsicherheiten berücksichtigt, die mit den quantitativen Ergebnissen des BioCosts-Projektes verbunden sind, lassen sich eine Reihe von Schlußfolgerungen ableiten, die durch verschiedene Indikatoren gestützt werden und die mehr oder weniger unabhängig sind von der verwendeten Untersuchungsmethode.

Die sachgerechte energetische Nutzung von Biomasse kann erhebliche ökologische Vorteile haben gegenüber der Verwendung fossiler Brennstoffe.

Zweifellos ist die Biomasse-Nutzung eine wichtige Option zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Vorteile der untersuchten Biomasse-Brennstoffzyklen gegenüber den fossilen Referenzfällen sind hier eindeutig, variieren aber in der Höhe und den Kosten.

Für konventionelle Schadstoffe wie  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{VOC}$  und Partikel ergibt sich ein differenzierteres Bild. Während die Biomasse mit einer Ausnahme eindeutig geringere spezifische  $\text{SO}_2$ -Emissionen aufweist, sind andere Emissionen zum Teil höher als bei fossilen Brennstoffen. Allerdings sind die Unterschiede meist klein oder das Emissionsniveau ist ohnehin sehr niedrig. Betrachtet man die externen Kosten aus Gesundheitsschäden, die durch die angeführten Schadstoffe verursacht werden, so hat die Biomasse deutliche Vorteile gegenüber Öl und Kohle, aber leichte Nachteile gegenüber Erdgas.

Die starke implizite Fokussierung des ExternE-Projektes auf Gesundheitsschäden, die auf die verwendeten Dosis-Wirkungs-Beziehungen und auf die monetäre Bewertung der Schäden zurückzuführen ist, suggeriert, daß die Verringerung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen ein Schwerpunkt zukünftiger Umweltpolitik sein sollte. Das gilt aber nicht nur für die Biomasse-Nutzung, sondern auch für fossile Brennstoffe, da die  $\text{NO}_x$ -Emissionen im wesentlichen von der verwendeten Technik bestimmt werden. Für dieses Problem gibt es eine Reihe von Lösungsansätzen, so daß niedrige  $\text{NO}_x$ -Emissionen ein wichtiges Kriterium bei der Einführung neuer Technologien bilden sollten. Gleiches gilt im übrigen auch für die Kohlenmonoxid-Emissionen.

Die Emissionsinventare werden eindeutig von der Umwandlungsstufe des Brennstoffzyklus dominiert. Die Entsorgung hat keinen signifikanten Einfluß. Der Beitrag der Brennstoffherstellung ist im allgemeinen klein, aber um so größer, je komplizierter der Herstellungsprozeß ist.

Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme hat erhebliche Vorteile gegenüber einer getrennten Bereitstellung dieser Energieformen, wenn Angebot und Nachfrage zeitlich aufeinander abgestimmt werden können. Gasturbinen sowie herkömmliche Kessel-Turbinen-Anlagen sind den zunehmend verwendeten Verbrennungsmotoren überlegen, da letztere Probleme bei den Emissionen von  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{CH}_4$  aufweisen. Allerdings erzwingen die ökonomischen Randbedingungen bei kleinen Anlagen oft den Einsatz eines kostengünstigen Motor-BHKWs, gerade in Gebieten mit geringen Anschlußdichten. Hier besteht eine Zielkonkurrenz zwischen Energieeffizienz und Klimaschutz einerseits und der Verminderung konventioneller Schadstoffen andererseits.

Die Nutzung von Reststoffen hat Vorteile gegenüber dem Anbau von Energiepflanzen. Außerdem sind mehrperiodige Pflanzen wie Kurzumtriebshölzer einperiodigen wie Getreide vorzuziehen. Letzteres ist bedingt durch den Aufwand für den Anbau von einperiodigen Pflanzen und den komplexen Prozeß, der mit der Aufbereitung der Biomasse zu einem leicht handhabaren Brennstoff verbunden ist.

Es gibt eine Reihe weiterer, im BioCosts-Projekt qualitativ analysierter, Vorteile der Biomasse-Nutzung. Die Nutzung von Restholz aus der Forstwirtschaft kann beispielsweise dazu beitragen, die Versauerung der Böden zurückzuführen. Dies ist insbesondere in Schweden ein wichtiger Punkt, für den auch eine erhebliche Zahlungsbereitschaft in der Bevölkerung besteht, wie die breite Zustimmung zu einschlägigen Umweltsteuern zeigt. In einigen Fällen hilft die energetische Biomasse-Nutzung auch, ein Abfallproblem zu lösen, so etwa bei der Verwertung von Gülle, die sonst gelagert werden müßte, bzw. bei der Düngung von Kurzumtriebsplantagen mit Klärschlamm.

Die Effekte der untersuchten Fallstudien auf Biodiversität sowie Wasser- und Bodenqualität sind vernachlässigbar. Dies kann sich aber durchaus ändern, wenn die Techniken in großem Stil genutzt werden. Negative Konsequenzen können unserer Einschätzung nach aber weitgehend vermieden werden, wenn die Techniken mit der nötigen Umsicht eingeführt werden und wenn entsprechende Vorsorgemaßnahmen rechtzeitig getroffen werden. So sollten Energie-

pflanzen keinesfalls in Gebieten angepflanzt werden, die Naturschutzgebiete sind oder werden könnten. Umgewidmete Landwirtschaftsflächen bieten sich hier eher an. Die Ausbringung von Düngemitteln sollte unbedingt auf die Menge beschränkt werden, die von den Pflanzen auch tatsächlich aufgenommen wird. Pflanzenschutzmittel sollten so sparsam wie irgend möglich verwendet werden.

Die Konkurrenz verschiedener Nutzungsmöglichkeiten um die knappen Bodenressourcen sollte frühzeitig als ernstes Problem verstanden werden. Andernfalls können Entwicklungen wie der wachsende Anteil der ökologischen Landwirtschaft in Dänemark das Potential für die energetische Biomasse-Nutzung empfindlich reduzieren. Andererseits könnte eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten hin zu einem geringeren Fleischkonsum in erheblichem Umfang Flächen frei werden lassen für den Anbau von Energiepflanzen.

Die Untersuchung der lokalen Bedingungen, unter denen Biomasse-Projekte heute arbeiten müssen, hat ergeben, daß die örtlichen Betroffenen so früh wie möglich an den Planungen beteiligt werden sollten. Nur so läßt sich eine Blockierung eigentlich vielversprechender Projekte durch lokale Widerstände vermeiden. Außerdem kann auf diese Weise die Erarbeitung und Einhaltung von Richtlinien zur sachgerechten Biomasse-Nutzung unterstützt werden.

Die untersuchten Fallstudien haben sehr unterschiedliche Energiegestehungskosten. Zwei Fallstudien sind selbst bei heutigen Brennstoffpreisen wirtschaftlich, da die Biomasse zu sehr niedrigen Kosten verfügbar ist. Andere Fallstudien sind um bis zu 100% teurer als die entsprechenden Referenzfälle. Allerdings sind in diesen Fällen erhebliche Kostensenkungen durch gezielte Forschung und Entwicklung bzw. durch Markteinführungsprogramme zu erwarten.

Für eine Reihe von Techniken, wie etwa Biogas und Holzvergasung, liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in der gleichen Größenordnung wie die im Rahmen des ExternE-Projektes der EU-Kommission angegebenen Schadenskosten einer Klimaänderung. Zusammen mit den externen Kosten der Gesundheitsschäden, die von konventionellen Schadstoffen verursacht werden, sehen wir einen deutlichen Anreiz, die energetische Nutzung von Biomasse voranzutreiben. Dies gilt um so mehr, wenn man die Strategie der „starken Nachhaltigkeit“ zur Leitlinie der Politik macht. In diesem Fall können die höheren Kosten der Brennstoffe aus Biomasse (und anderer erneuerbarer Energiequellen) als Versicherungsprämie angesehen werden gegen Umweltschäden im allgemeinen und gegen gravierende Klimaänderungen im besonderen.

Nichtsdestotrotz sollten marktwirtschaftliche Instrumente zur Förderung der Biomasse-Nutzung eingesetzt werden, um so die Auswahl der besten Alternative dem Markt zu überlassen. Solche Anreize können beispielsweise in Energie-, Emissionssteuern oder -zertifikate bestehen, die sich durch die Internalisierung externer Kosten rechtfertigen lassen. Aufgrund der großen Unsicherheiten der einschlägigen Berechnungen sollte sich die Höhe derartiger Steuern aber eher an den verfolgten Politikzielen als an den berechneten Werten orientieren.

Die energetische Nutzung von Biomasse kann in geringem Umfang zu zusätzlichen Arbeitsplätzen führen. Die aus ökonomischen Gründen erforderliche Rationalisierung bei der Herstellung und dem Einsatz der Umwandlungstechniken und der Brennstoffe wird jedoch den benötigten Arbeitseinsatz noch deutlich reduzieren. Deshalb wird die Biomasse-Nutzung keinen signifikanten Beitrag zur Lösung des Arbeitslosigkeitsproblems leisten können. Allerdings können sich auf lokaler Ebene im Einzelfall durchaus erhebliche Vorteile ergeben.

Sorgfältig ausgewählte und sachgerecht betriebene Biomasse-Brennstoffzyklen stellen eine wichtige, wenn nicht unverzichtbare, Option für eine nachhaltige Energienutzung in der Europäischen Union dar.

## Literatur

- Azar, C., Sterner, T. (1996): Discounting and Distributional Considerations in the Context of Global Warming. *Ecological Economics* 19, 169-184.
- CEC – Commission of the European Communities, DG XII (Ed., 1998): Final Reports of ExternE Phase III. Vol. 1-6, forthcoming (preliminary versions available at <http://ExternE.jrc.es>).
- CEC – Commission of the European Communities (1997): Energy for the Future – Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan. COM(97)599, Brussels.
- CEC – Commission of the European Communities, DG XII (Ed., 1995): ExternE: Externalities of Energy. Vol. 1-6. Office for Official Publications of the European Communities, Brussels Luxembourg.
- Daly, H. (1996): *Beyond Growth. The Economics of Sustainable Development*. Beacon Press, Boston.
- Eyre, N., Downing, T., Hoekstra, R., Rennings, K., Tol, R.S.J. (1997): ExternE – Global warming damages. Final Report of the Global Warming Sub-Task of the Project JOS3-CT95-0002. Brussels.
- Friedrich, R., Krewitt, W. (Hrsg., 1997): *Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung. Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Groscurth, H.-M., Vögele, S. (1999). Fallstudie Biomasse. In: *Beschäftigungswirkungen des Übergangs zu integrierter Umwelttechnik*. In: F. Pfeifer und K. Rennings (Hrsg.). *Beschäftigungswirkungen des Übergangs zu integrierter Umwelttechnik*. Physica-Verlag, Heidelberg, S. 93-104.
- Hohmeyer, O., Ottinger, R.L., Rennings, K. (Ed., 1996): *Social Costs and Sustainability. Valuation and Implementation in the Energy and Transport Sector*. Proceedings of an International Conference held at Ladenburg, Germany, May 27-30, 1995. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Hohmeyer, O., Walz, R. (1992): The analysis of indirect emissions due to intermediate production. In: OECD / IEA (Eds., 1992): *Proceedings on an Expert Workshop on Life-Cycle Analysis – Methods and Experiences*, Paris, May 21-22, 1992. OECD, Paris, 228-237.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996): *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.
- LTI-Research Group (Ed., 1998): *Long-Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System*. Physica, Heidelberg.
- Miser, H.J., Quade, E.S. (Ed., 1985): *Handbook of Systems Analysis*. North-Holland, New York, Amsterdam.
- Nordhaus, W.D. (1991): To Slow or Not to Slow. *The Economics of the Greenhouse Effect*. *The Economic Journal* 101, 920-937.
- ORNL/ RFF – Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future Inc. (1994): *External Costs and Benefits of Fuel Cycles. A Study by the US-DOE and the Commission of the European Communities*. Report No. 1-8. McGraw-Hill/ Utility Data Institute, Washington DC.
- Patyk, A., Reinhardt, G.A. (1997): *Düngemittel – Energie und Stoffstrombilanzen*. Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden.
- Pope, C.A. III, et al. (1995): Particulate air pollution as predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am J Resp Crit Care Med* 151, 669-674.

RCG/ Tellus – RCG/Hagler, Bailly, Inc. and Tellus Institute (1993-1995): New York State Environmental Externalities Cost Study. Final Reports EP 91-50. Prepared for the Empire State Electric Energy Research Corporation. Reports 1-4. Albany, New York.