

F&E-Vorhaben

Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse

Verbundprojekt gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms (ZIP) der Bundesregierung

Projektträger: Forschungszentrum Jülich

- Endbericht -

Autorenteam:



Uwe R. Fritsche, Günther Dehoust, Wolfgang Jenseit, Katja Hünecke, Lothar Rausch, Doris Schüler, Kirsten Wiegmann



Andreas Heinz, Markus Hiebel, Markus Ising, Stephan Kabasci, Christoph Unger



Institut für Energetik und Umwelt

Daniela Thrän, Nicolle Fröhlich, Frank Scholwin



Guido Reinhardt, Sven Gärtner, Andreas Patyk



Frank Baur, Ulrich Bemann, Bodo Groß, Marylin Heib, Claudia Ziegler



Michael Flake, Meike Schmehl

Institut für Geoökologie



Sonja Simon

Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus

Darmstadt, Berlin, Oberhausen, Leipzig, Heidelberg,
Saarbrücken, Braunschweig, München

überarbeitete Version, Dezember 2004

Einleitung

Seit 1998 erfahren die Erneuerbaren Energien einen enormen Aufschwung. Dieser ist vorwiegend dem Einsatz der Bundesregierung für eine Wende hin zu einer nachhaltigeren Energieversorgung zu verdanken. Deren Zielvorgaben für die Zukunft sind anspruchsvoll: Bis 2010 werden mindestens 12,5 % Strom und mindestens 4,2 % Primärenergie aus erneuerbaren Energien angestrebt. In 2020 sollen dann über 20 % des Stroms und in 2050 sogar 50 % des gesamten Energieverbrauchs mit erneuerbaren Energien erzeugt werden. Diese Ziele dienen aber nicht nur dem Klimaschutz.

Erneuerbare Energien verringern auch die Abhängigkeit von Importen fossiler Energieträger und schaffen Arbeitsplätze in Deutschland. Neben Wind, Wasser und Sonne ist die verstärkte Nutzung von *Biomasse* von großer Bedeutung. Von ihr werden die höchsten Potenziale für die regenerative Energieerzeugung und damit mittelfristig ein enormer Ausbau erwartet. Diese Hoffnungen werden sich aber nur erfüllen, wenn bereits heute durch Forschung und Investitionen die Innovationen angestoßen werden, durch die die Biomasse in Zukunft wettbewerbsfähig wird.

Für eine *nachhaltige* Energiezukunft ist aber nicht nur der beschleunigte Ausbau wichtig, er muss auch umwelt-, wirtschafts- und sozialverträglich erfolgen. Denn die Biomasseerzeugung kann sich erheblich auf die Landnutzung, die Beschäftigung und die Kosten auswirken. Biomasse bietet zahlreiche Variationen für Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung zur Auswahl an. Für einen nachhaltigen Ausbau muss eine Strategie entwickelt werden, die den Einsatz der verschiedenen Technologien hinsichtlich Klima- und Naturschutz, Arbeitsplätzen und Wirtschaftlichkeit optimiert.

Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes steht für Politik und Forschung ein Werkzeug zur Verfügung, das die Entwicklung einer solchen Strategie unterstützt. In den detaillierten Informationen zur ökologischen Bewertung und Wirtschaftlichkeit zahlreicher Technologien wird erstmals auch deren Weiterentwicklung bis zum Jahr 2030 berücksichtigt. Ebenso werden in die Potenzialerhebung zum ersten Mal die zukünftigen Entwicklungen in Land-, Forst- und Abfallwirtschaft mit der zukünftigen Nachfrage nach Lebensmitteln integriert. Dies erlaubt einen Blick in die Zukunft für den gesamten Biomassektor.

Mit dem Werkzeug lassen sich nicht nur heutige Spitzenkandidaten der Biomassenutzung identifizieren. Gleichzeitig werden zukünftig mögliche Effizienzgewinne und Kostenvorteile für Technologien aufgedeckt, die erst noch weiterentwickelt werden müssen.

Um diese Entwicklung anzustoßen müssen wir aber jetzt schon investieren. Dafür benötigt die Biomasse differenzierte Förderinstrumente wie das EEG und das Markteinführungsprogramm, um langfristig die Wirtschaftlichkeitsschwelle für Strom, Wärme oder Kraftstoffe zu erreichen.

Dieser Endbericht zum Forschungsprojekt „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ zeigt, dass es sich lohnt. Werden die Potenziale an Reststoffen und Flächen zum Anbau von Energiepflanzen konsequent genutzt, können wir bis 2030 gut 15 % des Stroms, 10 % der Wärme und 15 % des Treibstoffs für Pkw aus Biomasse erzeugen und den Ausstoß an Treibhausgasen drastisch vermindern. Und das, ohne auf einen ausgewogenen Naturschutz zu verzichten. Langfristig kann die Biomasse ihre Bedeutung unter den erneuerbaren Energien zum Spitzenreiter hinsichtlich Menge und Wettbewerbsfähigkeit ausbauen und damit über 200.000 neue Arbeitsplätze schaffen. Vor allem für den strukturschwachen ländlichen Raum bestehen hier große Chancen, mit der Bereitstellung von Biomasse zur Energieerzeugung neue Beschäftigungsfelder zu erschließen. Biomasse muss daher ein zentraler Bestandteil eines umfassenden Konzepts für eine nachhaltige Energieversorgung im 21. Jahrhundert sein.

Danksagung

Das Verbundforschungsprojekt wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Zukunfts-Investitions-Programms (ZIP) der Bundesregierung unter dem Förderkennzeichen 0327575 gefördert und durch den Projektträger PTJ im Forschungszentrum Jülich betreut, wofür beiden Einrichtungen herzlich zu danken ist.

Das Umweltbundesamt (UBA), vertreten durch Marina Köhn und Bernhard Dreher (bis Mitte 2003), begleitete das Vorhaben aus wissenschaftlicher Sicht und gab wertvolle Hinweise und Rückmeldungen.

Das Vorhaben wurde zudem durch Anregungen, Daten und Kritik verschiedener Einrichtungen und Personen insbesondere im projektbegleitenden Beirat¹ und bei mehreren Expertenworkshops² aktiv unterstützt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Die Übernahme von ausgewählten Daten aus den BMU- bzw. UBA-Vorhaben zu Brennstoffzellen und „Ökologisch optimierter Ausbau erneuerbarer Energien“ wurde durch die freundliche Unterstützung von Joachim Nitsch und Wolfram Krewitt (DLR) möglich.

Zudem erfuhr das Projekt Unterstützung durch inhaltliche Teilbeiträge mehrerer Personen³ und die Projektassistenz im Öko-Institut⁴. Wir stehen schließlich für Mitarbeit, Diskussionsbereitschaft und kritische Begleitung des Projekts in der Schuld unserer KollegInnen in den beteiligten Instituten.

Unser spezieller Dank gilt Wolfhart Dürrschmidt (Referatsleiter BMU Z III 1) für die Leitung des Projektbeirats und Gisela Zimmermann (BMU Ref. Z III 1) für die enge Kooperation und kritische Begleitung des Vorhabens.

Die Verantwortung für die Ergebnisse liegt jedoch allein bei den Verfassern.

Dezember 2004

Die Autoren

-
- ¹ Als Beiratsmitglieder waren aktiv: Kathrin Ammermann (BfN), Claudius da Costa Gomez (FV Biogas), Bernhard Dreher (UBA/BMU), Arnold Frühwald (BFH), Bernd Geisen (BBE), Nina Griesshammer (WWF), Folkhard Isermeyer (FAL), Birger Kerckow (FNR), Marina Köhn (UBA), Gerd-Dieter Krieger (VDMA), Markus Kurdziel (dena), Joachim Kutscher (PTJ), Bettina Meyer (Umweltministerium Schleswig-Holstein), Frank Musiol (NABU), Jürgen Ohlhoff (BMVEL), Josef Pellmeyer (FV Biogas), Helmut Pfrüner (EU-Kommission), Andreas Schütte (FNR).
 - ² Bei den Experten-Workshops erhielt das Projekt wertvolle Hinweise und Kritik von einer Reihe von Einrichtungen, darunter Volker Appel (BMVEL), Ludger Eltrop (IER), Martina Henning (FAL), Karl-Heinz Hoffmann (HMULV), Sebastian Kilburg (CARMEN), Manfred Klein (BfN), Peter Kreins (FAA), Rolf-Dieter Linden (DENARO), Eberhard Oettel (FEE), Florian Schöne (NABU), Michael Specht (ZSW), Peter Viebahn (DLR), Armin Werner (ZALF).
 - ³ Im Rahmen eines Unterauftrags erarbeitete Birgit Jahraus (Fichtner) eine Übersicht zu Daten für Biomasse-Technologien und Johann Köppel sowie Wolfgang Peters (TU Berlin) eine vom BMU finanzierte Ausarbeitung zu Naturschutzfragen bei der energetischen Biomassenutzung (vgl. Anhangband auf beigefügter CDROM). Im Rahmen eines BfN-geförderten Vorhabens trug auch Karl Scheurlen (IUS Potsdam) zur Diskussion um Naturschutzfragen bei und kooperierte hier eng mit dem TU-Berlin-Team. Weiterhin leistete Nils Thamling als Diplomand am Öko-Institut eine Analyse der Holzpotenziale und bearbeitete – zusammen mit Astrid Grell als Praktikantin am Öko-Institut – die Frage der nachhaltig nutzbaren Strohpotenziale.
 - ⁴ Hier ist Sabine Poetzsch und Julia Reppening für die engagierte Mitarbeit zu danken und Ursula Draude für die projektbezogene Sekretariatsarbeit; die Projektassistenz im Bereich GEMIS wurde durch Klaus Schmidt geleistet.

Zusammenfassung

Die von der Bundesregierung eingeleitete *Energiewende* zielt darauf, parallel zur Steigerung der Energieeffizienz den Anteil erneuerbarer Energien an der Energieversorgung erheblich zu erhöhen. Der Stellenwert der *Biomasse* ist hier – neben Sonne und Wind – mittelfristig am höchsten.

Wie in Zukunft die Biomasse als Energiequelle nachhaltig und im Einklang mit den Ansprüchen der Agrarwende und einer nachhaltigen Forst- und Abfallwirtschaft genutzt werden kann, war die Kernfrage dieses Forschungsprojekts, das auf Basis einer integrierten *Stoffstromanalyse* die künftig möglichen Entwicklungen durch Szenarien analysierte und ein ökologisch verträgliches Konzept zur energetischen Nutzung von Biomassepotenzialen in Deutschland entwickelte. Die Basis hierzu bildet die Analyse des Entwicklungsstands zur Biomassenutzung und ökonomischer und ökologischer Verbesserungspotenziale durch marktnahe Fortentwicklungen.

Das Öko-Institut führte dieses Verbundforschungsprojekt in Kooperation mit wissenschaftlichen Partnern⁵ vom Oktober 2001 bis Mai 2004 durch und wurde hierbei durch das BMU gefördert.

Frage- und Aufgabenstellung des Verbundprojekts

Das Forschungsvorhaben verfolgte im Einzelnen folgende Aufgaben:

- Systematische Erfassung der *Stoffströme* und damit verbundener Umwelt-, Kosten- und Beschäftigungswirkungen für energetisch genutzte Biomasse in Deutschland.
- Erstellung einer öffentlich zugänglichen und fortschreibbaren *Technologiedatenbasis* für energetische Nutzungstechnologien von Biomasse insbesondere für stationäre Anwendungen, die technische, ökonomische und ökologische Daten umfasst und auch vorgelagerte Prozessketten einbezieht.
- Durchführung von *Lebenswegvergleichen* von Biomassenutzungstechniken zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Effekte.
- Ermittlung von *Potenzialen* zur verstärkten energetischen Biomassenutzung unter Berücksichtigung von Umwelt- und Naturschutzfragen, wobei auch Restriktionen der nachhaltigen Forst- und Landwirtschaft berücksichtigt wurden.
- Erstellung von *Szenarien* zu künftigen energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse in Deutschland mit einem dynamischen *Stoffstrommodell*.
- Entwicklung von *Handlungsempfehlungen* für die Politik im Hinblick auf Klimaschutz und Nachhaltigkeit auf Basis von Szenarioanalysen.

⁵ FhI-UMSICHT (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen), IE (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig), IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg), IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken), TU Braunschweig (Institut für Geoökologie/Abt. Umweltsystemanalyse), TU München (Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues). Im Zuge des Vorhabens wurden mehrere Fachgespräche geführt und die Methodik, Datengrundlagen und Ergebnisse mit einem projektbegleitenden Beirat diskutiert. Weiterhin erstellte Birgit Jahraus (Fichtner, Stuttgart) im Rahmen eines Unterauftrags eine Ausarbeitung zu Daten von Bioenergie-Techniken, und Johann Köppel sowie Wolfgang Peters (TU Berlin, Institut für Landschafts- und Umweltplanung) arbeiteten im Rahmen eines BMU-Auftrags zu Naturschutzfragen der Biomassenutzung mit.

Die Analysen umfassten dabei

- *Rest-* und Durchforstungsholz (Forst- und Holzwirtschaft) sowie *Altholz* (Baustellenabfälle usw.),
- landwirtschaftliche *Reststoffe* (Stroh, Gülle, Ernterückstände), nutzbare Biomasse aus der Lebensmittelindustrie sowie *Zoomasse-Reststoffe*,
- Reststoffe aus der Abfallwirtschaft (Bioabfall, Klärschlamm und Klär-/Deponiegas),
- Energiepflanzen (Kurzumtriebsholz, Pflanzenöl, Getreide, Gräser usw.).

Kurzbeschreibung der Szenarien

Das Projekt erstellte Szenarien zur verstärkten energetischen Biomassenutzung in Deutschland, um deren Umwelteffekte, Kosten und orientierende Beschäftigungsbilanzen zu ermitteln.

Als Basis wurde ein *energiewirtschaftliches* REFERENZ-Szenario erstellt, das eine ungestörte Fortschreibung *ohne aktive* Politik reflektiert. Dieses Szenario beruht auf den Annahmen der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energiepolitik“ des Deutschen Bundestags.

Hierzu kontrastierend wurden drei Szenarien aufgestellt, die gezielt Energieeinsparoptionen nutzen und regenerative Energien ausbauen – darunter insbesondere die Biomasse:

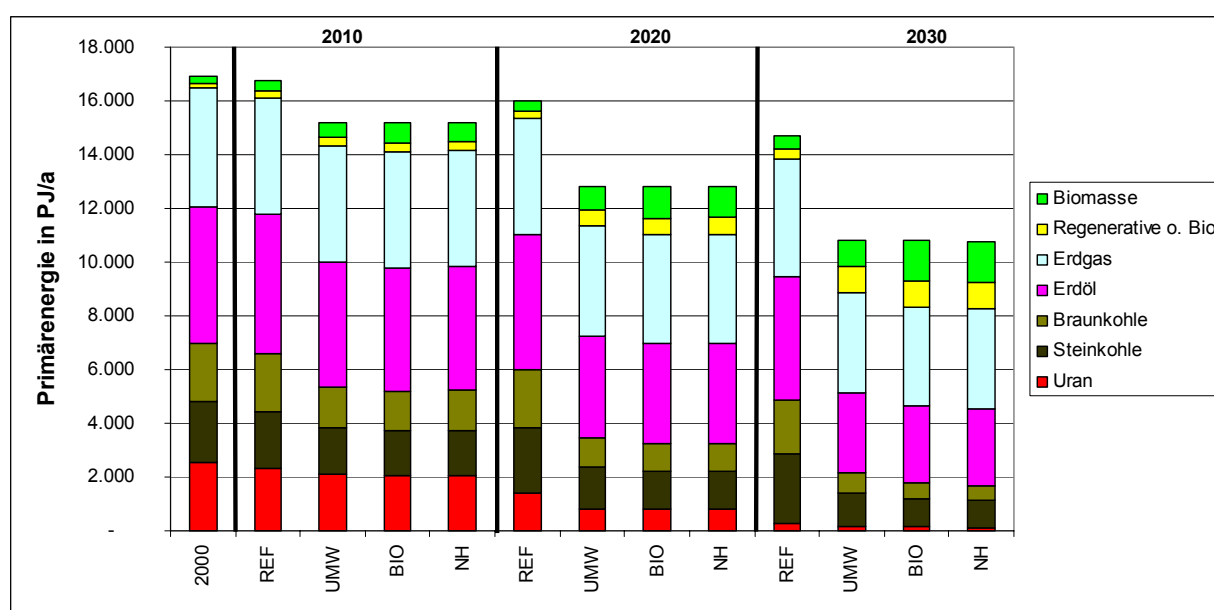
- Das erste dieser Szenarien wird UMWELT genannt und stellt den *eigentlichen Vergleichsfall* im Projekt dar. Sein energiewirtschaftlicher Teil (Energienachfrage, Angebotsmix) beruht auf der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (DLR/IFEU/WI 2004). Es dient als *untere Grenze* zur Größenordnung der Biomassebeiträge unter den Bedingungen einer *massiven Effizienzsteigerung* und des Ausbaus der erneuerbaren Energien insgesamt, die bei starken umwelt- und naturschutzbedingten Restriktionen möglich ist.
- Demgegenüber werden im Szenario BIOMASSE die *Obergrenzen* der Biomassepotenziale – ohne weitergehende Naturschutz-Restriktionen - genutzt und der maximale technische Fortschritt bei der Anlagentechnik sowie eine massive Unterstützung der Biomasse in Bezug auf Förderung der Bereitstellung und Investition in die Nutzungstechniken unterstellt. Das Szenario reduziert stärker die Anteile fossiler Energien als das Umwelt-Szenario, während andere regenerative Energieträger nicht variiert werden.
- Die Ergebnisse der Umwelt- und Biomasse-Szenarien spannen einen *Korridor* auf, der die mögliche Biomassenutzung unter ökologischen und naturschutzmäßigen Restriktionen bei Gewinnung und Nutzung von Biomasse aufzeigt. Die Analyse der in den Szenarien unterstellten Biomassenutzung und Technologiewahl hinsichtlich ihrer *ökologisch-ökonomischen tradeoffs* und der jeweiligen Beschäftigungswirkungen wurde dann genutzt, um ein konsolidiertes Szenario zur nachhaltigen Biomassenutzung zu entwerfen, in dem „robuste“ und effiziente Technologien und Nutzungsformen sowie entsprechende Instrumente zur ihrer Umsetzung maßgeblich sind. Dieses NACHHALTIG-Szenario orientiert sich bei den Biomassepotenzialen an BIOMASSE und beim Anbaumix für Energiepflanzen an UMWELT, wobei die Technologiewahl *insbesondere Beschäftigungseffekte* berücksichtigt und gegenüber BIOMASSE eine höhere Technologievielfalt unterstellt wird.

Zusammenfassung der Szenario-Ergebnisse: Primärenergie

Die Szenario-Teilergebnisse zu Strom, Wärme und Verkehr führen über die Umrechnung der Endenergie- und Brennstoffbedarfe auf den *Primärenergiebedarf*⁶ zu den Gesamtergebnissen der Szenarien, die neben Kosten auch Emissions- und Beschäftigungsbilanzen betreffen.

Bei den Emissionsbilanzen sind die gesamten Lebenswege zur Bereitstellung der Strom-, Wärme- und Kraftstoffnachfragen einbezogen, d.h. alle Herstellungsaufwendungen für die Energieträger und auch für die Anlagen sowie Infrastrukturen.

Bild 1 Primärenergie in den Szenarien insgesamt



REF = REFERENZ-Szenario, UMW = UMWELT-Szenario, BIO = BIOMASSE-Szenario, NH = NACHHALTIG-Szenario; Daten inkl. Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Gaspipelines)

Deutlich sichtbar ist der Effekt der Energieeffizienz, die gegenüber REFERENZ in den anderen Szenarien bis 2020 gut ein Fünftel und bis 2030 mehr als ein Viertel einsparen kann und damit mehr „NegaWatt“ bereitstellt als alle Regenerativen zusammen⁷.

In allen Szenarien wird das Auslaufen der Atomenergienutzung unterstellt, wobei geringe Restanteile nach 2020 durch den Import von Energieträgern aus dem Ausland verbleiben, die aus Atomstromanteilen am Strommix der Exportländer bestehen.

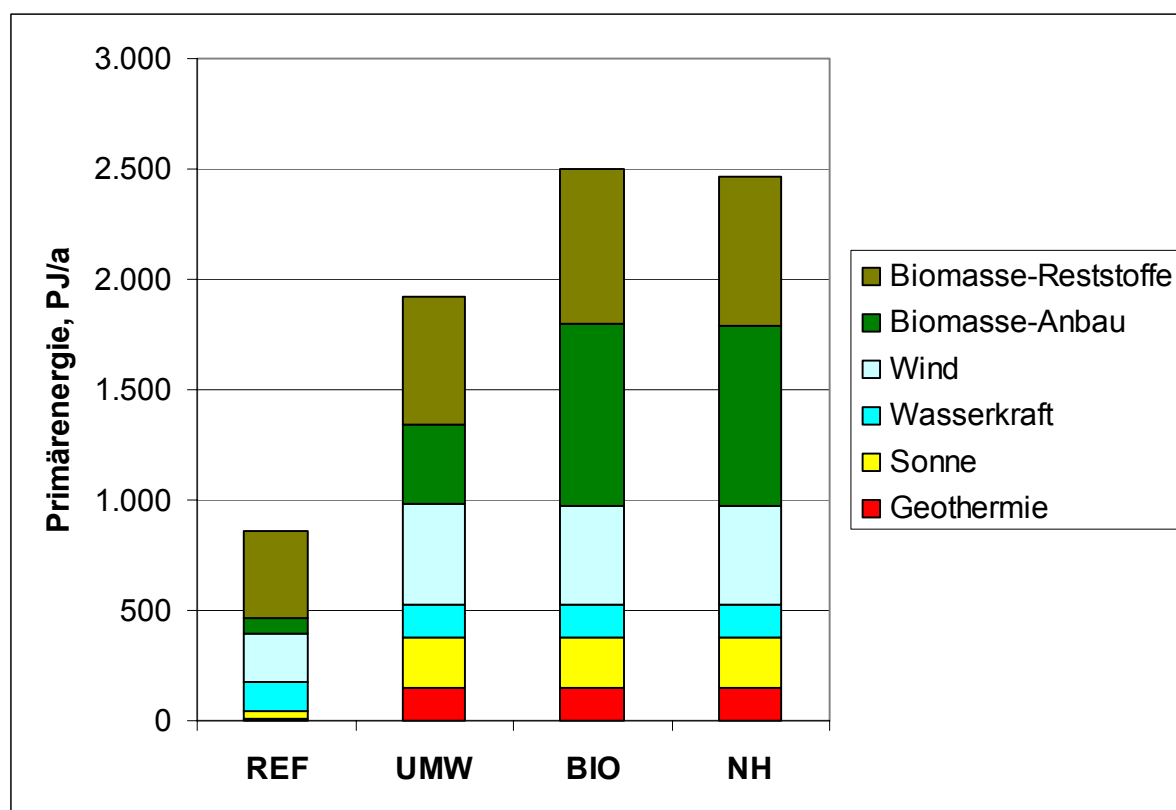
Die folgende Gegenüberstellung zeigt, dass im Szenario NACHHALTIG bis 2030 die Biomasse einen *größeren* Anteil erreichen kann als die anderen regenerativen Energien *zusammen*.

⁶ Der Primärenergiebedarf stellt die Summe der Nachfragen nach Energierohstoffen dar, d.h. er bilanziert die „geförderte“ Energiemenge (z.B. Output von Kohleminen). Bei den Erneuerbaren wird die bereitgestellte Energie (z.B. Strom aus Wasser- oder Windkraft, Warmwasser aus Solarkollektoren) gleich der Primärenergie gesetzt. Bei Biomasse wird der Energieinhalt (Heizwert) von Energiepflanzen bzw. Reststoffen (z.B. Holzackschnitzel, Stroh) bilanziert.

⁷ Die Daten zur Energieeffizienz sowie den erneuerbaren Energien außer Biomasse (d.h. Geothermie, Solarenergie, Wasser- und Windkraft) wurden in den Projekt-Szenarien nicht eigens untersucht, sondern die Daten hierzu aus der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (DLR/IFEU/WI 2004) übernommen.

Bild 2

Regenerative Primärenergie in den Szenarien im Jahr 2030



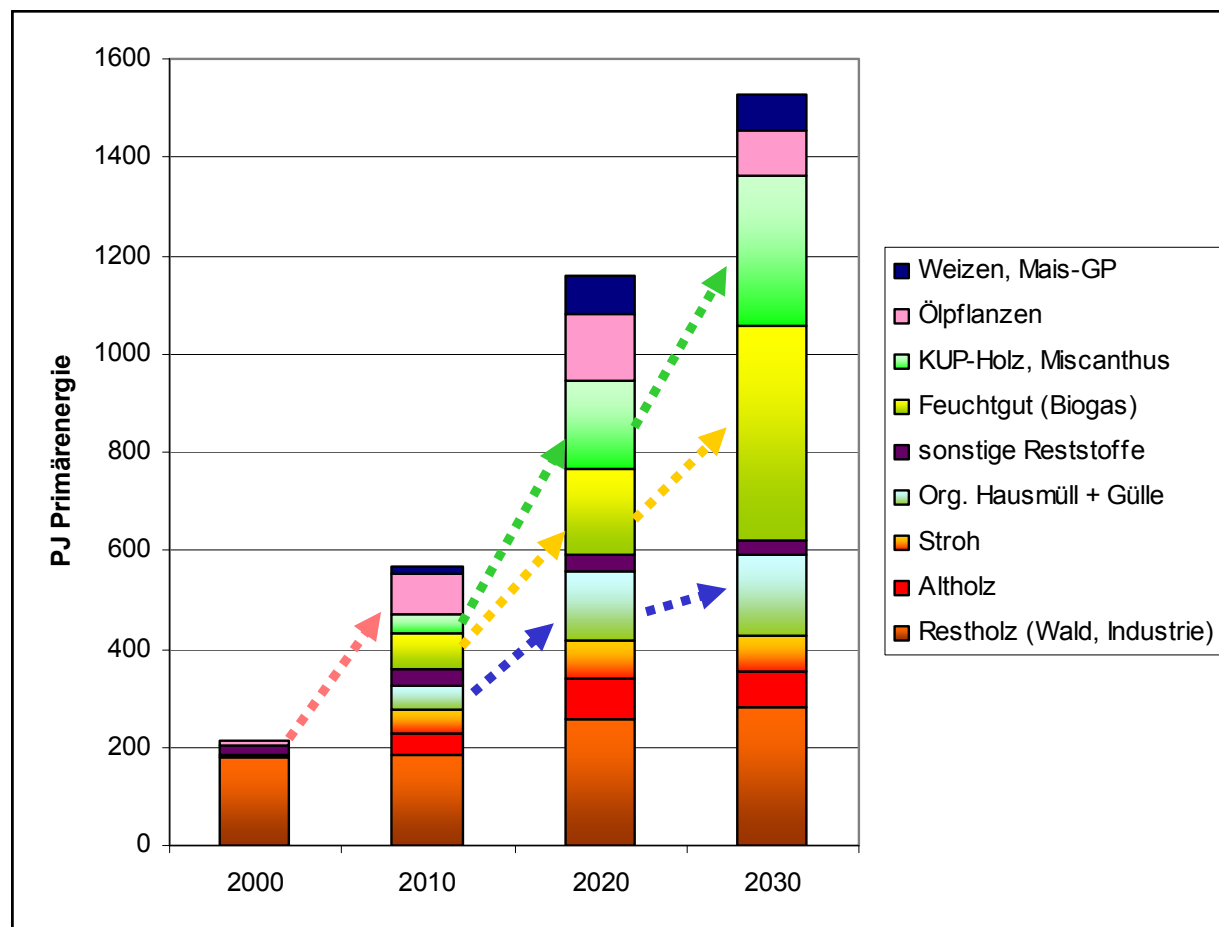
REF = REFERENZ-Szenario, UMW = UMWELT-Szenario, BIO = BIOMASSE-Szenario, NH = NACHHALTIG-Szenario; Daten inkl. Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Gaspipelines)

Die Anteile von biogenen Reststoffen liegen etwa gleich hoch wie die aus Energiepflanzen, wobei letztere bis 2030 leicht überwiegen. Biogene Reststoffe bringen etwas mehr Primärenergie als die Windkraft, während die Energiepflanzen mehr als Wasserkraft, Geothermie und Solarenergie zusammen bereitstellen.

Im Szenario NACHHALTIG liefert Biomasse *alleine* genauso viel an Primärenergie wie Stein- und Braunkohle *gemeinsam* – dies unterstreicht die große potenzielle Bedeutung der Bioenergie. Die regenerative Primärenergie wird dabei ausschließlich in Deutschland bereitgestellt – die Untersuchung potenzieller Importe erneuerbarer Energien war nicht Teil des Projekts⁸.

⁸ In den Szenarien UMW, BIO und NH sind im Jahr 2030 geringe Mengen an importiertem Wasserstoff und Strom aus regenerativer Erzeugung im europäischen und nordafrikanischen Ausland einbezogen, die zusammen unter 1% des Primärenergiebedarfs liegen. Bis zum Jahr 2050 könnte dieser Anteil auf ca. 5% der Primärenergie ansteigen (vgl. DLR/IFEU/WI 2004). Parallel oder alternativ könnten auch Bioenergieträger importiert werden. Die Anteile der „heimischen“ Regenerativen – darunter insbesondere Energiepflanzen – ließe sich weiter steigern, wenn z.B. auf den subventionierten Export von in Deutschland produzierten Lebensmitteln (Getreide, Fleisch, Zucker) künftig verzichtet würde – auf den dadurch „freiwerdenden“ Flächen könnten Energiepflanzen angebaut werden. Eine andere Möglichkeit böte der verstärkte Import von Lebensmitteln, der wiederum Flächen zum Anbau von Bioenergieträgern in Deutschland freisetzen könnte. Diese Möglichkeiten müssen insbesondere hinsichtlich der Nahrungsmittelsicherheit und der Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion in den Exportländern bewertet werden (vgl. ÖKO 2003c).

Bild 3 Künftige Entwicklung der energetischen Biomassenutzung in Deutschland im Szenario NACHHALTIG



GP= Ganzpflanzen; KUP= Kurzumtriebsplantagen

Deutlich sichtbar ist, dass neben den „klassischen“ Bioenergieträgern Restholz und Reststroh vor allem Biogas aus organischen Reststoffen und Gülle und die „neuen“ Bioenergieträger *Biogas aus Feuchtgut* sowie die *mehrfährigen Energiepflanzen* (Kurzumtriebsholz, Miscanthus) erhebliche Zunahmen aufweisen. Demgegenüber spielen die Ölpflanzen (für Biodiesel) bzw. die Ganzpflanzennutzung von Weizen und Mais (für Bioethanol bzw. Biogas) nur eine relativ geringe Rolle.

Die unterschiedliche Bedeutung der Bioenergieträger liegt in der angenommenen Verwendung:

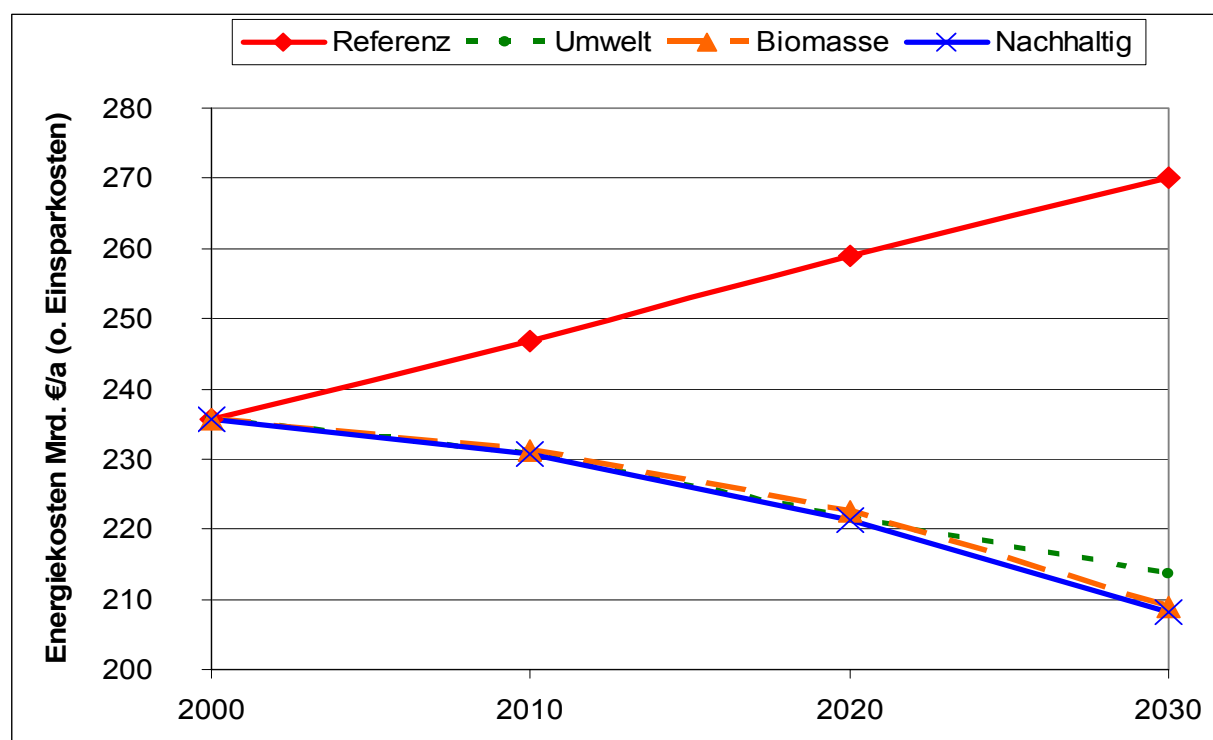
Die *Nettoflächenerträge* – also unter Einrechnung der *gesamtem Lebenswege* (inkl. Dünger usw.) - und die Naturschutzaspekte von Feuchtgutlinien und KUP-Holz sind *erheblich günstiger* als die von z.B. Raps oder Mais-Ganzpflanzen. Auf den nur beschränkt zur Verfügung stehenden Anbauflächen sollten daher vorrangig die nachhaltigsten Bioenergieträger zum Einsatz kommen.

Bei der Verwendung sind die Restbiomassen i.d.R. ökologisch und ökonomisch günstiger im stationären Bereich (Strom- und Wärmebereitstellung) einsetzbar, erst nach 2020 kann auch Reststroh und z.T. Restholz über die BtL-Route effizient als Biokraftstoff verwendet werden. Bei den Anbaubiomassen wird dementsprechend Biogas aus Feuchtgutlinien primär in dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt, während KUP-Holz vorrangig über BtL als Biokraftstoff dient.

Zusammenfassung der Szenario-Ergebnisse: Kosten

Neben der Primärenergie interessieren auch die gesamten Kosten der Energiebereitstellung in den Szenarien - hier wurden die Vollkosten (Anlagen + Brennstoffe) bei Strom und Wärme einbezogen, während im Verkehr *nur die Kraftstoffkosten* berücksichtigt sind, also nicht die Fahrzeuge und Infrastrukturen⁹.

Bild 4 *Energiekosten in den Szenarien insgesamt*



Kosten ohne Aufwendungen für Energieeinsparung

Die Kosten der Energiebereitstellung und –nutzung steigen im Referenz-Szenario bis 2030 um gut 10% an, wobei dies vor allem durch die Erneuerung des Kraftwerksparks und die moderat steigenden Preise für Erdöl und Erdgas bedingt wird¹⁰.

Demgegenüber führen die anderen Szenarien zu einer deutlichen Senkung, die vor allem auf dem massiven Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung und der Energieeinsparung beruht.

⁹ Bei den Ergebnissen zu den Kosten ist zu beachten, dass hier die Kosten für die unterstellte Energieeinsparung (Wärmedämmung, effizientere Geräte und Fahrzeuge) *nicht* mit berücksichtigt sind. Ebenso wurden die Kosten für die energiebezogene Infrastruktur (z.B. Stromnetze, Gaspipelines) nicht explizit berechnet, aber über die Energiepreisentwicklung einbezogen.

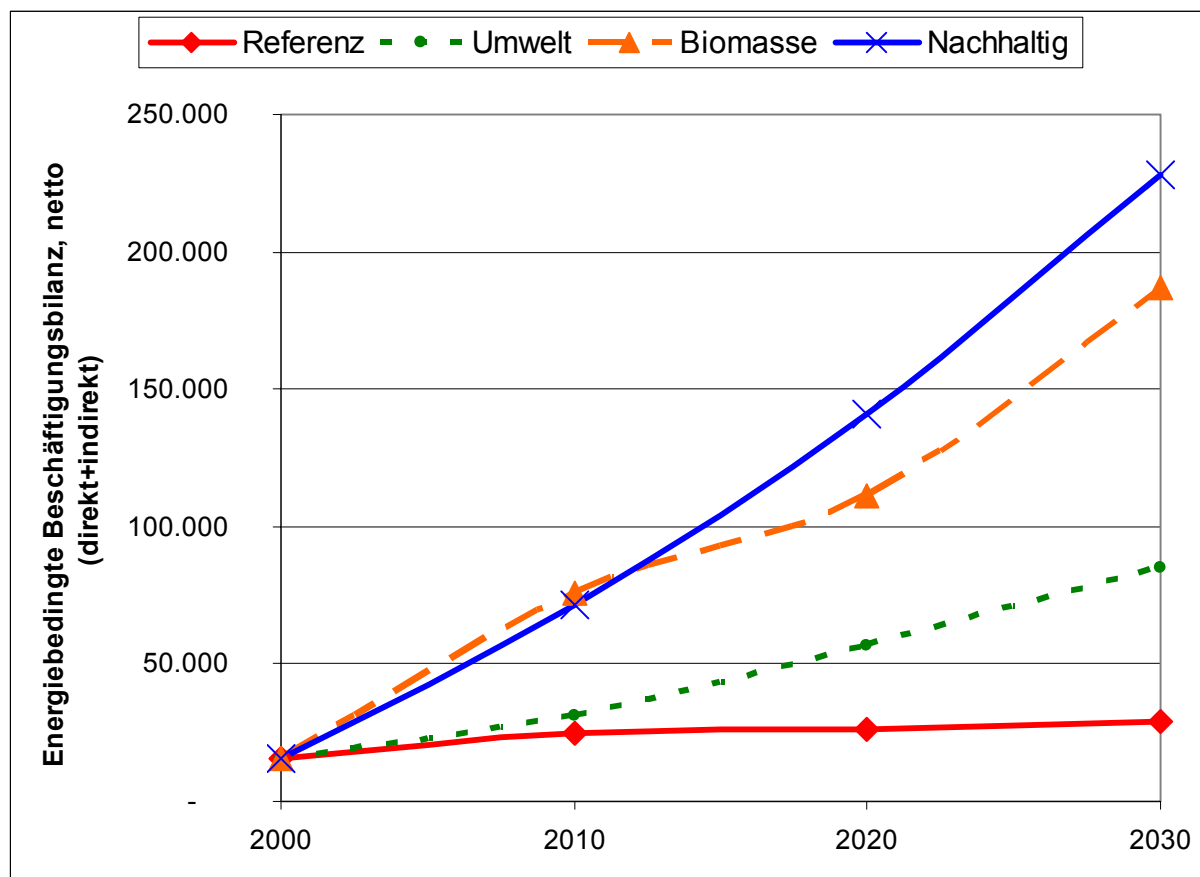
¹⁰ Die Preise für Heizöl, Benzin und Diesel steigen real bis 2030 um knapp ein Viertel gegenüber 2000, während der Erdgaspreis bis 2030 um rund die Hälfte steigt. Die Preise für Importkohle und Strom steigen dagegen bis 2030 um rund ein Drittel, ebenso wie die durchschnittlichen Kosten für Bioenergieträger. In den Preisannahmen sind nach 2003 *keine weiteren* Erhöhungen von Ökosteuer, Mehrwertsteuer o.ä. angenommen. Die Rahmendaten für die Preisentwicklung beruhen auf den Annahmen der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energiepolitik“. Für biogene Kraftstoffe wurde eine Befreiung von der Mineralölsteuer im gesamten Szenariozeitraum angenommen.

Zusammenfassung der Szenario-Ergebnisse: Beschäftigung

Neben den Kosten wurden auch die direkten und indirekten Effekte für die Beschäftigung ermittelt und die Nettobilanz der energiebedingten Beschäftigung berechnet, die auch die saldierten Effekte bei den fossilen Energieträgern in Deutschland mit umfasst.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt das folgende Bild¹¹.

Bild 5 Nettobilanz der Beschäftigung in den Szenarien insgesamt



Angaben ohne Effekte der Energieeinsparung

Im Szenario Nachhaltig ergeben sich bis 2030 gegenüber der Referenz fast eine *Viertel Million Beschäftigte zusätzlich*, wobei davon gut ein Drittel *direkte* Arbeitsplätze sind, die bei der Biomassegewinnung und -verarbeitung entstehen, d.h. im ländlichen Raum.

Auch hier ist zu beachten, dass bei den Beschäftigten die Effekte der Energieeffizienz (z.B. Wärmedämmung) hier *nicht* mit einbezogen sind¹².

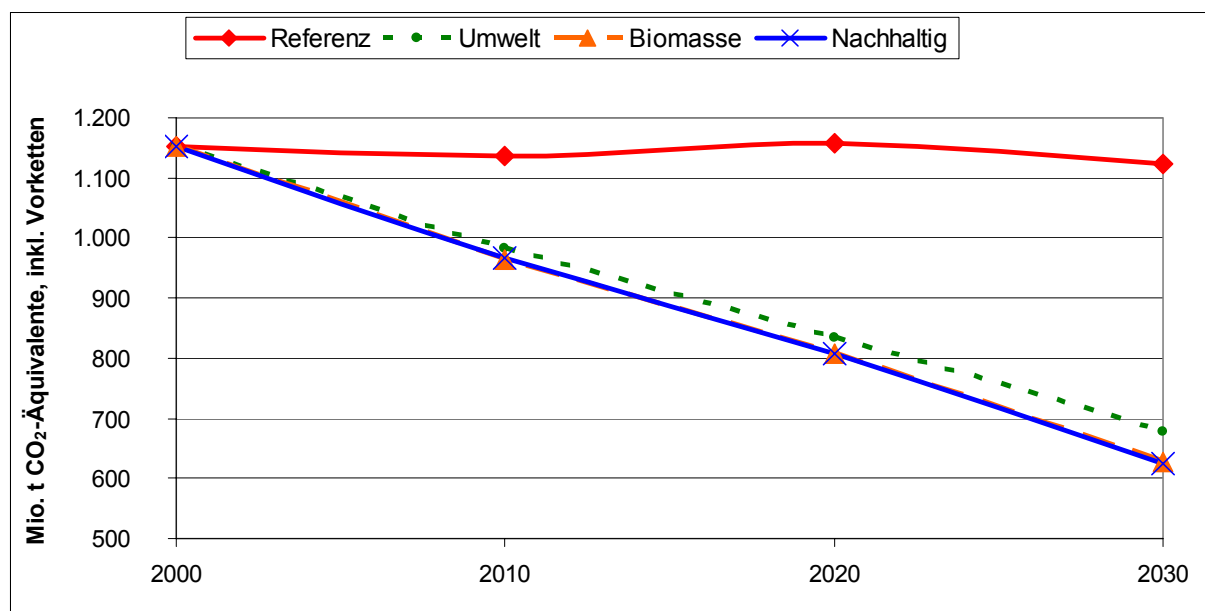
¹¹ In der Nettobilanz sind bei den *Vorketten* auch Mineralölprodukte (Heizöl, Diesel, Benzin) und Erdgas sowie die direkten und indirekten Effekte des Kohlebergbaus jeweils in Deutschland einbezogen. Ebenfalls sind vereinfachte Daten zur indirekten Beschäftigungswirkung bei Solar-, Wind- und Wasserkraft sowie Geothermie berücksichtigt.

¹² Überschlägige Berechnungen in anderen Studien zeigen, dass eine Größenordnung von netto ca. 100.000 Vollzeit-Arbeitsplätzen durch die Einsparttechnologien bis 2030 geschaffen werden könnten.

Zusammenfassung der Szenario-Ergebnisse: Klimagase

Als Indikator für die Klimawirkung wurden die Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung und –nutzung in den Szenarien bestimmt, die im Folgenden gezeigt werden.

Bild 6 Treibhausgasemissionen in den Szenarien insgesamt



THG-Emissionen inkl. Auslandsanteile der Vorketten (z.B. Ölförderung, Tankertransport, Gaspipelines)

Das Szenario REFERENZ würde bis 2030 praktisch gleich bleibende Emissionen an Treibhausgasen bewirken und damit die Kyoto-Ziele und die darüber hinaus von der Bundesregierung angestrebte 40 %-Reduzierung bis 2020 (gegenüber 1990) weit verfehlen.

Demgegenüber würden die anderen Szenarien – insbesondere BIOMASSE und NACHHALTIG – die Emissionen um gut 55 % bis 2030 (gegenüber 2000) reduzieren, dies entspricht einer Reduktion von ca. 65 % gegenüber 1990. Die internationalen Verpflichtungen sowie die längerfristigen nationalen Klimaschutzziele ließen sich somit klar erreichen.

Bei den Ergebnissen zu den Treibhausgasemissionen ist zu beachten, dass aufgrund der Lebenswegbilanzen auch ausländische Anteile (z.B. Emissionen bei der Ölförderung, Gaspipelinetransport) einbezogen sind, die das Ergebnis um ca. 15 % erhöhen. Ein direkter Vergleich mit z.B. nationalen Treibhausgasbilanzen, die allein Emissionen auf dem Territorium Deutschlands betrachten, muss dies beachten.

Zusammenfassung der Projekt-Ergebnisse: Empfehlungen

Regenerative Energien – darunter auch Biomasse - sind klimaschonende Energieträger. Darum will die Bundesregierung mit Blick auf die nationalen Verpflichtungen zur Senkung der Treibhausgase den Anteil der erneuerbaren Energien bis 2010 gegenüber 2000 verdoppeln, beim Strom auf 12,5 % und auf 4 % der Primärenergie. Langfristig sind, wie die Szenarien gezeigt haben, durchaus ehrgeizigere Ziele möglich – bis ins Jahr 2030 können erneuerbare Energien 22 % des Energiebedarfs decken. Dabei bringt die Biomasse mit gut 14 % den Löwenanteil.

Die Ergebnisse belegen zudem, dass eine nachhaltige energetische Biomassenutzung gut mit Umwelt- und Naturschutz vereinbar ist und sogar Synergiepotenziale aufweist.

Die Umsetzung dieser Möglichkeiten geschieht jedoch *nicht von selbst* – sie erfordert eine *aktive* Biomassepolitik insbesondere auf der Ebene des Bundes, aber auch der Länder, Regionen und Kommunen sowie der Wirtschaft.

Die folgenden Empfehlungen für eine solche Politik auf der nationalen Ebene wurden aus der Szenario-Analyse insbesondere des Szenarios NACHHALTIG abgeleitet.

Instrumente: Biomasse im EEG und im Emissionshandel

Die Bundesregierung setzt bei der Förderung erneuerbarer Energien auf eine ganze Reihe von Instrumenten – das EEG bildet dabei einen Schwerpunkt, während der kürzlich beschlossene Emissionshandel die erneuerbaren Energien eher indirekt fördert.

Biomasse und EEG

Das EEG deckt die Stromerzeugung aus Biomasse in kleineren und mittleren Anlagen (bis 20 MW_{el}) ab. Im EEG ist die Biomasse mit einigen speziellen Regelungen einbezogen: Entsprechend der im August 2004 in Kraft getretenen *Novelle* des EEG sind deutlich höhere Vergütungen als bisher für biogenen Strom aus Anlagen bis 150 kW_{el} enthalten. Weitere Bonusregelungen bestehen für fortschrittliche Technologien (z.B. ORC, Dampf- und Stirling-Motoren) bzw. solche mit Abwärmenutzung (KWK) und für die Nutzung „reiner“ Bioenergie aus der Land- und Forstwirtschaft.

Die im Projekt durchgeführten Analysen der Kosten von Technologien zur biogenen Stromerzeugung belegen deutlich, dass diese neuen Vergütungssätze und Bonusregelungen für eine ganze Reihe von Biomasse-Technologien wichtige Anreize darstellen, die in großem Umfang Investitionen in diese Anlagen bewirken dürften.

Die Ergebnisse belegen aber auch, dass biogener Strom *aus Energiepflanzen* kurzfristig auch bei den novellierten EEG-Vergütungssätzen nicht *ohne weitere* Förderung wirtschaftlich wird – insbesondere Strom aus Holzprodukten von Kurzumtriebsplantagen und Miscanthus könnte nur unter sehr günstigen Bedingungen an einzelnen Standorten wettbewerbsfähig werden. Gute Chancen dagegen erhält Strom aus Biogas, das aus *Feuchtgutlinien* gewonnen wird. Um die mittelfristig erwartbare Kostensenkung von biogenen Stromerzeugungsoptionen nicht zu gefährden, ist daher ein *zusätzliches Anreizprogramm* für Energiepflanzen sinnvoll, das angesichts der Kosten und potenziellen Beschäftigungseffekte volkswirtschaftliche Nettogewinne verspricht.

Die Ausgestaltung eines solchen Programms sollte gezielt auf die Land- und Forstwirtschaft als potenzielle Energielieferanten im ländlichen Raum abstellen und dabei Naturschutzaspekte aktiv einbeziehen, um die bei der Potenzialanalyse identifizierten Möglichkeiten zu Synergien zu nutzen. Wichtig sind hier Anreize bzw. Nutzungsaufgaben für Mehrjährige wie Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln und Weiden (insb. zum Erosionsschutz) sowie die Förderung von Landschaftsstrukturelementen wie Hecken, deren Schnittmasse energetisch genutzt werden könnte.

Eine ressortübergreifende Regelung, die mit dem BMVEL und seinen Programmen zur Modulation der Agrarfördermittel und den BMU-Anstrengungen im Bereich Naturschutz zu koordinieren wäre, sollte in Abstimmung mit den Ländern entworfen und als mittelfristiges Programm parallel zum EEG implementiert werden.

Ergänzend hierzu ist die Weiterentwicklung innovativer Technologien durch ein technologisches Förderprogramm anzustreben, bei dem auch die optimierte Wärmenutzung bei stromgeführten Anlagen thematisiert wird.

Biomasse und Emissionshandel

Das EEG nimmt die Stromerzeugung durch die *Mitverbrennung* von Biomasse aus, die potenziell in größeren Feuerungen und Kraftwerken auf Kohlebasis attraktiv sein könnte. Der gerade beschlossene Emissionshandel jedoch bezieht sich auf die CO₂-Emissionen aus großen Feuerungen und Kraftwerken, die mit fossilen Energien betrieben werden, und kann durch den künftigen Handel mit CO₂-Zertifikaten auch und gerade Biomasse im Bereich dieser Anlagen *indirekt* fördern.

Die Analysen am Beispiel der Mitverbrennung von Alt- und Waldrestholz sowie Stroh zeigen, dass vor allem die Mitverbrennung in bestehenden Kohle-HKW durch den Emissionshandel deutlich gefördert werden könnte und damit eine größere Verbreitung im Markt ohne staatliche Regelungen möglich wird. Der ab 2005 beginnende Emissionshandel verspricht über die monetäre Bewertung von CO₂-Einsparungen eine indirekte Förderung für den Biomasse-Einsatz in größeren Feuerungen und Kraftwerken.

Um diese Möglichkeiten kurzfristig zu fördern, ist jedoch eine Konzertierung von Akteuren unter Einbeziehung größerer Unternehmen, die Beispielanlagen realisieren, sinnvoll.

Instrumente für den biogenen Wärmemarkt

Die Technologieanalyse und die Szenario-Ergebnisse belegen, dass die Biomasse im Wärmemarkt eine große Rolle spielen kann, wenn sie zur Bereitstellung von Nah- und Fernwärme genutzt wird.

Bei der ökonomisch und ökologisch vorteilhaften KWK sind ebenso wie bei den reinen Biomasse-Heizwerken *Wärmenetze* von entscheidender Bedeutung – und genau hier fehlt derzeit ein Instrument zur Förderung.

Daher sollten die von BMU und UBA begonnenen Überlegungen zu entsprechenden Instrumenten für die Förderung von erneuerbaren Energien im Wärmesektor intensiviert und dabei die zentrale Rolle von Wärmenetzen auch für Solar- und Geothermie berücksichtigt werden. Dazu wird ein Schwerpunkt „Netzentwicklung“ vorgeschlagen, der insbesondere Möglichkeiten der finanziellen Förderung von entsprechenden Investitionen mit dem Einsatz von Biomasse, Solarenergie und Erdwärme koppelt.

Parallel hierzu wäre die mittelfristige *Fortschreibung der Ökostener* auf Erdöl und Erdgas ein wichtiger Hebel, um die Nah- und Fernwärme über die Preisentwicklung der konkurrierenden Energieträger indirekt zu befördern.

Instrumente zur Technologieentwicklung

Die EEG-Novelle, die seit August 2004 in Kraft ist, setzt mit der erhöhten Vergütung für innovative Verfahren zur Biomasse-Stromerzeugung einen ersten wichtigen Anreiz, der nach unseren Analysen bei günstigen Standortbedingungen durchaus zu entsprechenden Marktreaktionen führen kann.

Die mittelfristig aufgrund der Kostensenkungs- und Effizienzerhöhungspotenziale interessanten Biomasse-Technologien wie Dampfmotor-BHKW, ORC-Prozesse sowie insbesondere verschiedene Verfahren zur *Vergasung* von Biomasse können jedoch nur realisiert werden, wenn eine *dynamische Markteinführung* über Nischenanwendungen hinaus erfolgt.

Diese innovativen Verfahren erfordern über das EEG hinaus zusätzlich ein gezieltes *Demonstrations- und Markteinführungsprogramm*, das analog zu der früheren Investitionsförderung bei Windkraft über einen längeren Zeitraum genug Anreize bietet, um Technologie-Entwickler und Technologie-Nachfrager für entsprechende Investitionen zu gewinnen.

Mit Blick auf Bio-Kraftstoffe sollte der bereits eingeschlagene Weg (Pilotanlagen für synthetische Flüssigkraftstoffe aus Biomasse = BtL) verstärkt weitergeführt und auch für die o.g. Prozesse zur *dezentralen Vergasung* und *innovativer KWK* geöffnet werden. Bei der Konzeption dieses Programms wäre eine europäische Komponente mit einzubeziehen.

Zusätzlich sollten die schon laufenden Anstrengungen von Seiten der Ressorts BMU und BMVEL (bzw. BfN, UBA und FNR) zu Monitoring und Evaluation bestehender Anlagen fortgeführt und eine zentrale Informationsdrehscheibe für Biomasse-Technologiefragen („clearinghouse“) analog zu den US-amerikanischen Vorbildern eingeführt werden, die auch eine Forschungskoordination erlaubt.

Schließlich ist es mit Blick auf die internationale Entwicklung von Technologien und Fragen des Exports sinnvoll und notwendig, dass

- Deutschland den verschiedenen Kooperationsvereinbarungen zur energetischen Biomassennutzung im Rahmen der IEA beitrifft und
- sich im Rahmen der bi- und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit (KfW, Weltbank usw.) stärker für (deutsche) Biomasse-Technologien einsetzt.

Akteurskonzertierung

Der Emissionshandel eröffnet für die Mitverbrennung von Biomasse wichtige Anreize – hier sollte kurzfristig versucht werden, mit größeren Emittenten die Biomasse-Mitverbrennung in einigen realen Anlagen zu demonstrieren und als gutes Beispiel für die positiven Auswirkungen des Emissionshandels auszuweisen.

Eine entsprechende Konzertierung von Unternehmen wäre z.B. im Rahmen der nationalen Koordinationsstelle für den Emissionshandel (UBA) zu initiieren.

Parallel hierzu sollte die für die Umsetzung wesentliche Nutzung von Biomasse in KWK durch eine Beteiligung von z.B. Gasversorgungsunternehmen und dem Heizöl-Handel an entsprechenden Anlagen erleichtert werden, wobei auch die geforderte Demonstration innovativer Verfahren hier einbezogen werden sollte.

Als Akteur wäre hier z.B. die Deutsche Energie-Agentur zu nennen oder ein Kooperationsverbund mit Contracting-Unternehmen.

Ausblick: Anwendung der Werkzeuge und Forschungsbedarf

Über die unmittelbaren Ergebnisse des Vorhabens und die Empfehlungen für die Biomassepolitik hinaus sind abschließend noch zwei Aspekte der Projektergebnisse herauszuheben, die auf anstehende Weiterarbeiten verweisen und insoweit einen Ausblick geben.

Die im Projekt entwickelten Werkzeuge zur Stoffstromanalyse stehen nunmehr zur Verfügung, um auch außerhalb des Projektkontextes angewendet zu werden:

- Die Technologie-Datenbasis kann über das kostenlos verfügbare ComputermodeLL GEMIS sowohl bei der Technologieanalyse wie auch bei Fragen der Planung von Anlagen, Förderprogrammen u.ä. direkt genutzt werden¹³. Zusätzlich stehen die Biomasse-Daten unmittelbar über die Datenbank des UBA im Internet ohne weitere Software zur Verfügung¹⁴.
- Das Szenario-Tool mit seinen weiteren Werkzeugen zur Potenzialanalyse steht für Interessierte auf Nachfrage zur Nutzung bereit, kann jedoch aufgrund der Komplexität nicht ohne Einführung angewendet werden. Es wendet sich vorrangig an Nutzer, die Fragen der künftigen Biomasse-Entwicklung analysieren und eigene Szenarien entwerfen.

Die *Anwendung* dieser Werkzeuge kann in den unterschiedlichsten Konstellationen sinnvoll sein und erfordert je nach Fragestellung ggf. eine Anpassung der Datenbasis.

Auf der Ebene der Bundesländer und von Regionen gibt es bereits entsprechende Initiativen, so dass mittelfristig von einer breiteren Nutzung auszugehen ist.

Mit Blick auf die Datenbasis wäre eine Erweiterung für die EU bzw. die neuen Mitgliedsstaaten zumindest für einige Fragen interessant.

Die umfänglichen Arbeiten zur Datenbasis und den Potenzialen sowie Szenario-Rechnungen haben zwar insgesamt einen hohen Stand der Datengüte und Detaillierung erreicht, erlaubten jedoch aufgrund der Mittel- und Zeitrestriktionen zu einigen Fragen nur orientierende Aussagen.

¹³ Der Bezug des Programms inkl. der Biomasse-Datenbasis ist kostenlos im Internet unter www.gemis.de möglich.

¹⁴ Siehe www.probas.umweltbundesamt.de

Dies betrifft insbesondere

- *Biokraftstoffe*: die Stoffstromanalyse konnte in diesem Bereich eine gute Grundlage für die Analyse konkurrierender Optionen liefern, eine Weiterentwicklung der Datenbasis ist aber insbesondere hinsichtlich des *Güterverkehrs*, schienengebundener Systeme und der Kosten von BtL sinnvoll. Zudem ist eine *energieträgerübergreifende* Analyse der Stoffströme, Kosten und Beschäftigung sinnvoll, die neben Biomasse auch andere Erneuerbare (z.B. Strom aus Wind), Wasserstoff und Erdgas mit einbezieht und hier die jeweiligen *Infrastrukturen* berücksichtigt.
- *Naturschutzflächen* und Bioenergieträger: Im Vorhaben konnten nur sehr grobe Überlegungen zu den Kosten und Nutzungsformen von Bioenergieträgern angestellt werden, die bei der Bewirtschaftung von Naturschutzflächen anfallen. Hier wäre eine nähere Betrachtung der Technologien, Kosten und Logistiken sinnvoll.
- *Beschäftigungsbilanzen*: Aufgrund der hohen Bedeutung der Beschäftigungsaspekte sollten die bisherigen Arbeiten entsprechend ergänzt, vertieft und dabei auch der sog. „Budgeteffekt“ kritisch reflektiert werden.

Inhaltverzeichnis

Einleitung.....	i
Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
Tabellenverzeichnis	xix
Abbildungsverzeichnis	xxviii
1 Fragestellung und Überblick.....	1
2 Stoffstromanalyse für Biomasse	3
2.1 Systemgrenzen im Projekt	4
2.2 EDV-Werkzeuge zur Stoffstromanalyse	6
3 Die Datenbasis zu Biomasse-Technologien	13
3.1 Übersicht zu den Biomasse-Technologien und ihren Vorketten	14
3.2 Technologiedaten für die künftigen Szenarienjahre	17
3.3 Kompatibilität mit anderen Zukunftstechnologien	22
3.4 Lernkurven als Bewertungshilfe	26
3.5 Lernkurven für ausgewählte Energietechnologien	29
3.6 Zukünftige Marktentwicklung für ausgewählte Energietechnologien	32
3.7 Zukünftige Degressionsfaktoren für ausgewählte Energietechnologien	35
3.8 Technologiedaten für die Szenario-Zeitpunkte	36

4	Technologieauswahl für die Szenarien	43
4.1	Methodischer Ansatz zur Technologieauswahl.....	43
4.2	Datengrundlagen zur Technologieauswahl.....	46
4.3	Ergebnisse der Technologieauswahl.....	55
4.4	Qualitative Naturschutzfragen beim Energiepflanzenanbau	60
4.5	Vergleich der Stromerzeugungskosten mit dem EEG.....	63
4.6	Mögliche Effekte des Emissionshandels auf die Biomasse.....	64
4.7	Die Rolle der Einspeisung biogener Gase in Netze	65
4.8	Sensitivitätsanalyse für die Technologie-Auswahl	68
5	Potenziale zur energetischen Biomassenutzung	73
5.1	Fragestellung und Methodik der Potenzialanalysen	73
5.2	Energetische Biomassepotenziale aus landwirtschaftlichen Reststoffen.....	76
5.3	Energetische Biomassepotenziale aus forstwirtschaftlichen Reststoffen.....	96
5.4	Energetische Biomassepotenziale aus der Holzindustrie.....	114
5.5	Energetische Biomassepotenziale aus der Abfallwirtschaft	118
5.6	Energetische Biomassepotenziale aus Zoomasse	173
5.7	Flächenpotenziale zum Anbau von Energiepflanzen.....	179
5.8	Energetische Biomassepotenziale aus der Landschaftspflege.....	190
5.9	Zusammenfassung zu den energetischen Biomassepotenzialen.....	196
6	Szenarien zur energetischen Biomassenutzung	202
6.1	Fragestellung und methodischer Ansatz	202
6.2	Der Szenario-Raum	203
6.3	Gesamtergebnisse der Szenarien	206
6.4	Ergebnisse für Strom	214
6.5	Ergebnisse für Wärme	222
6.6	Ergebnisse zum Verkehr	228
6.7	Hemmnisse für die Umsetzung	236

7	Empfehlungen zur Umsetzung	244
7.1	Instrumente: Biomasse im EEG und im Emissionshandel.....	244
7.2	Instrumente für den biogenen Wärmemarkt.....	245
7.3	Instrumente zur Technologieentwicklung	246
7.4	Akteurskonzertierung: Einbeziehung der Wirtschaft.....	246
8	Ausblick.....	247
8.1	Künftige Nutzung der Werkzeuge	247
8.2	Weiterer Forschungsbedarf.....	248
	Literatur.....	249
	Abkürzungsverzeichnis	259

ANHANG (getrennter Berichtsband – siehe CDROM)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Umfang der Datenanalyse zur Bereitstellung von Bioenergieträgern.....	15
Tabelle 2	Umfang der Datenanalyse zur Nutzung der Bioenergieträger.....	16
Tabelle 3	Definition der verwendeten Begriffe „Technologie 2000“ und „Zukunftstechnologien (2010-2030)“.....	17
Tabelle 4	Kriterien für die Zuordnung von Einzeltechnologien in die Gruppen „Technologie 2000“ und „Zukunftstechnologien 2010 -2030“.....	18
Tabelle 5	Berechnete Kostendegression für IGCC-Technologien.....	29
Tabelle 6	Erläuterungen zu den zusammengefassten Stellvertreter-Technologien	30
Tabelle 7	Unterstellte Anzahl der in 2000, 2010, 2020 und 2030 in Deutschland jeweils betriebenen Anlagen ausgewählter Energietechnologien	33
Tabelle 8	Kalkulierte Anzahl der von 2000 bis 2030 in Deutschland jeweils kumuliert produzierten Anlagen ausgewählter Energietechnologien	34
Tabelle 9	Mittlere Degressionsfaktorangaben für regenerative Energietechniken.....	35
Tabelle 10	Unterstellte Degressionsfaktoren für Energietechnologien 2000 – 2030	36
Tabelle 11	Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2000.....	37
Tabelle 12	Erläuterungen zu den Technologiedaten 2000, differenziert nach Technologiegruppen	38
Tabelle 13	Erläuterungen zu den Technologiedaten 2010, differenziert nach Technologiegruppen	40
Tabelle 14	Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2010.....	40
Tabelle 15	Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2020.....	41
Tabelle 16	Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2030.....	42
Tabelle 17	Varianten zur Gewichtung für die Technologie-Auswahl.....	45
Tabelle 18	Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus biogenen Gasen – Jahr 2010	47

Tabelle 19	Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus biogenen Gasen – Jahr 2030	48
Tabelle 20	Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus fester Biomasse – Jahr 2010	49
Tabelle 21	Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus fester Biomasse – Jahr 2030	51
Tabelle 22	Datengrundlage zur Auswahl bei Wärme aus fester Biomasse – Jahr 2010	52
Tabelle 23	Datengrundlage zur Auswahl bei Wärme aus fester Biomasse – Jahr 2030	53
Tabelle 24	Datengrundlage zur Auswahl bei biogenen Kraftstoffen – Jahr 2010	54
Tabelle 25	Datengrundlage zur Auswahl bei biogenen Kraftstoffen – Jahr 2030	54
Tabelle 26	Änderung des Risikos von Wirkungen auf Natur und Landschaft bei Kulturarten im Vergleich zur Rotationsbrache sowie quantifizierte Umweltaspekte beim Energiepflanzenanbau und daraus resultierende Bewertung.....	61
Tabelle 27	Lebenswegbilanzen für die Biogasaufbereitung zur Einspeisung in Netze	65
Tabelle 28	Vergleich von Kosten und Treibhausgasemissionen von KWK-Varianten mit und ohne Biogas-Aufbereitung zur Netzeinspeisung	67
Tabelle 29	Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei biogenen Gasen.....	68
Tabelle 30	Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei Wald- und Altholz	69
Tabelle 31	Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei KUP-Holz, Miscanthus und Stroh	70
Tabelle 32	Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei biogenen Gasen.....	71
Tabelle 33	Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei Wald- und Altholz	71
Tabelle 34	Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei für KUP-Holz, Miscanthus und Stroh	72
Tabelle 35	Literaturdaten zur Entwicklung des Korn:Stroh-Verhältnisses seit 1970	79

Tabelle 36	Mit HEKTOR ermittelter Bedarf an Einstreustroh für die einzelnen Szenarien	80
Tabelle 37	Annahmen für das Korn:Stroh-Verhältnis für Weizen, Roggen und sonstiges Getreide in der konventionellen Landwirtschaft	81
Tabelle 38	Annahmen für das Korn:Stroh-Verhältnis bei Weizen, Roggen und sonstiges Getreide im ökologischen Landbau.....	81
Tabelle 39	Strohpotenzial im Referenzszenario	83
Tabelle 40	Strohpotenzial im Umweltszenario.....	83
Tabelle 41	Strohpotenzial im Biomasse-Szenario	84
Tabelle 42	Energetisches Nutzungspotenzial für Stroh in den Szenarien.....	84
Tabelle 43	Anteil der Tierbestände, deren Exkreme für eine Vergärung in Frage kommen, 2000 - 2030	85
Tabelle 44	Exkrementaufkommen nach Tierarten und Haltungsform für Rinder, Schweine und Geflügel.....	86
Tabelle 45	Biogasausbeuten verschiedener Exkreme	87
Tabelle 46	Biogaspotenzial aus Gülle und Mist, 2000.....	88
Tabelle 47	Vergleich der Biogaspotenziale nach IE mit HEKTOR/GEMIS.....	88
Tabelle 48	Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Referenz-Szenario bis 2030	89
Tabelle 49	Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Umwelt-Szenario bis 2030.....	90
Tabelle 50	Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Biomasse-Szenario bis 2030	90
Tabelle 51	Biogaspotenziale aus der Tierhaltung in den Szenarien bis 2030	91
Tabelle 52	Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen im Referenz- und Umweltszenario	93
Tabelle 53	Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen im Biomasse-Szenario.....	94
Tabelle 54	Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen in den Szenarien	95
Tabelle 55	Energetisch nutzbares Waldrest- und Schwachholzpotenzial bis 2005.....	98
Tabelle 56	verwendete Heizwerte für Waldholz in Abhängigkeit vom Wassergehalt.....	100

Tabelle 57	Angenommene Hauptbaumartenverteilung in Deutschland von 1990 bis 2030	101
Tabelle 58	Einfluss der Nachhaltigkeitskriterien auf das Waldholzpotenzial	103
Tabelle 59	Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Schwachholz über den Brusthöhendurchmesser (BHD)	104
Tabelle 60	Szenarioparameter für das Referenz-Szenario	108
Tabelle 61	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Referenzszenario im Jahr 2000	108
Tabelle 62	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Referenzszenario im Jahr 2030	108
Tabelle 63	Waldholzpotenzial im Referenz-Szenario	109
Tabelle 64	Szenarioparameter für das Umwelt-Szenario	110
Tabelle 65	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Umweltszenario im Jahr 2000	110
Tabelle 66	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Umweltszenario im Jahr 2030	110
Tabelle 67	Waldholzpotenzial im Umwelt-Szenario.....	110
Tabelle 68	Szenarioparameter für das Biomasse-Szenario.....	111
Tabelle 69	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario im Jahr 2000	111
Tabelle 70	Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario im Jahr 2030	112
Tabelle 71	Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario	112
Tabelle 72	Energetisch nutzbares Waldholzpotenzial in den Szenarien.....	112
Tabelle 73	Restholzanfall und energetische Nutzung von Industrieresthölzern nach Herkunft in Deutschland	115
Tabelle 74	Energiepotenzial des Restholzanfalls zur energetischen Nutzung (nach Abzug der stofflichen Nutzung).....	115
Tabelle 75	Energetisch nutzbares Biomassepotenzial aus Industrierestholz in den Szenarien	117
Tabelle 76	Biomasse im Hausmüll und Anerkennung gemäß Biomasseverordnung	119
Tabelle 77	Bisherige Mengenentwicklung im Bereich der Haushaltsabfälle	123

Tabelle 78	Bisherige Mengenentwicklung im Bereich der „anderen Siedlungsabfälle“.....	123
Tabelle 79	Organische Anteile im Resthausmüll (2000)	124
Tabelle 80	Organische Anteile im Sperrmüll (2000).....	124
Tabelle 81	Organische Anteile in den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen (2000).....	125
Tabelle 82	Theoretische Potenziale an Bio- und Grünabfällen aus Haushalten (2000).....	125
Tabelle 83	Theoretische Potenziale anderer Bio- und Grünabfälle (2000)	127
Tabelle 84	Theoretische Potenziale an Bio- und Grünabfällen - gesamt (2000)	127
Tabelle 85	Holzanteile im Bereich der beseitigten, gemischten Siedlungsabfälle (2000).....	128
Tabelle 86	Entwicklung der Behandlungskapazitäten für Bio- und Grünabfälle.....	128
Tabelle 87	Zuordnung organischer Restmüllbestandteile zu Beseitigungsanlagen (2000).....	129
Tabelle 88	Derzeit verfügbare und zukünftig abschätzbare Behandlungskapazitäten für Siedlungsabfälle.....	131
Tabelle 89	Mengenentwicklung im Bereich der Siedlungsabfälle	132
Tabelle 90	Kostenansätze für verschiedene Verfahren zur Abfallbehandlung.....	136
Tabelle 91	Tatsächliche und zusätzlich mögliche Mengen an Bio- und Grünabfällen.....	137
Tabelle 92	Potenzialdaten für Bio- und Grünabfälle als Grundlage für die Szenarienentwicklung (2000)	138
Tabelle 93	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Referenz-Szenario	139
Tabelle 94	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Umwelt-Szenario	140
Tabelle 95	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Biomasse-Szenario.....	141
Tabelle 96	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile in den Szenarien	142

Tabelle 97	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Deponiegas in den Szenarien	147
Tabelle 98	Abwasser- und Klärschlamm-mengen aus der Industrie im Jahr 1998.....	157
Tabelle 99	Energetisch nutzbares Klärschlamm-potenzial in den Szenarien.....	159
Tabelle 100	Energetisch nutzbares Klärgas-potenzial aus Kommunen in allen Szenarien	161
Tabelle 101	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Klärgas in den Szenarien.....	162
Tabelle 102	Altholzanteil in den verschiedenen Fraktionen und daraus abgeleitetes technisches Althol-potenzial	165
Tabelle 103	Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Altholz in den Szenarien.....	166
Tabelle 104	Materialien und Herkunftsbereiche von industriellen festen Bioabfällen	167
Tabelle 105	Größenklassen der Mühlen in Deutschland	168
Tabelle 106	Übersicht zu industriellen Substraten	169
Tabelle 107	Potenziale von Abfällen aus Gewerbe und Industrie.....	170
Tabelle 108	Energetisches Biomassepotenzial aus industriellen Substraten in den Szenarien	172
Tabelle 109	Entwicklung von Fleischverbrauch und Rohmaterialaufkommen der TBA	175
Tabelle 110	Künftige Entwicklung des Rohmaterialaufkommens bis 2030	175
Tabelle 111	Künftige Entwicklung der Tiermehl-/Tierfett- Produktion sowie alternativ Fleischbrei bis 2030	176
Tabelle 112	Potenziale zur energetischen Nutzung von Zoomasse in den Szenarien.....	178
Tabelle 113	Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2030	180
Tabelle 114	Kompensationsregelung für Acker und Grünland.....	181
Tabelle 115	Flächenanforderungen des Naturschutzes.....	182
Tabelle 116	Acker- Grünlandflächen in HEKTOR und in der Statistik im Vergleich, jeweils im Basisjahr 2000 (Bezugsgröße für die Naturschutzziele)	183
Tabelle 117	Flächensalden im Referenz-Szenario	184

Tabelle 118	Kumulierter Flächenverbrauch und Flächenbedarf für Ausgleich im Referenz-Szenario.....	184
Tabelle 119	Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Referenz-Szenario	185
Tabelle 120	Anbauflächenpotenzial im Referenz-Szenario	185
Tabelle 121	Flächensalden im Umwelt-Szenario.....	185
Tabelle 122	Kumulierter Flächenverbrauch im Umwelt-Szenario	186
Tabelle 123	Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Umwelt-Szenario (wie Referenz)	186
Tabelle 124	Anbauflächenpotenzial im Umwelt-Szenario.....	187
Tabelle 125	Flächensalden 2000 bis 2030 im Biomasse-Szenario	187
Tabelle 126	Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Biomasse-Szenario	188
Tabelle 127	Anbauflächenpotenzial im Biomasse-Szenario	188
Tabelle 128	Anbauflächenpotenziale nach Jahren in allen Szenarien im Vergleich.....	189
Tabelle 129	Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenziale des Referenzszenarios	192
Tabelle 130	Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenziale des Umweltszenarios.....	193
Tabelle 131	Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenzial des Biomasseszenarios	193
Tabelle 132	Energetisch nutzbares Grünschnittpotenzial in den Szenarien.....	194
Tabelle 133	Szenariobezogene Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen.....	196
Tabelle 134	Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Referenz-Szenario.....	199
Tabelle 135	Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Umwelt-Szenario	200
Tabelle 136	Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Biomasse-Szenario.....	201
Tabelle 137	Primärenergiebedarf im Szenario REFERENZ	207
Tabelle 138	Primärenergiebedarf im Szenario UMWELT.....	207

Tabelle 139	Primärenergiebedarf im Szenario BIOMASSE.....	208
Tabelle 140	Primärenergiebedarf im Szenario NACHHALTIG	208
Tabelle 141	Beschäftigungsbilanzen (netto) in den Szenarien	212
Tabelle 142	Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario REFERENZ.....	214
Tabelle 143	Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario REFERENZ	215
Tabelle 144	Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario UMWELT.....	215
Tabelle 145	Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario UMWELT.....	216
Tabelle 146	Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario BIOMASSE	217
Tabelle 147	Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario BIOMASSE.....	217
Tabelle 148	Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario NACHHALTIG	219
Tabelle 149	Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario NACHHALTIG	219
Tabelle 150	Wärmebereitstellung im Szenario REFERENZ.....	222
Tabelle 151	Biogene Wärmebereitstellung im Szenario REFERENZ	223
Tabelle 152	Wärmebereitstellung im Szenario UMWELT.....	223
Tabelle 153	Biogene Wärmebereitstellung im Szenario UMWELT.....	224
Tabelle 154	Wärmebereitstellung im Szenario BIOMASSE	225
Tabelle 155	Biogene Wärmebereitstellung im Szenario BIOMASSE.....	225
Tabelle 156	Wärmebereitstellung im Szenario NACHHALTIG.....	226
Tabelle 157	Biogene Wärmebereitstellung im Szenario NACHHALTIG	226
Tabelle 158	Personenverkehr im Szenario REFERENZ	229
Tabelle 159	Anteile von Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario REFERENZ	229
Tabelle 160	Verteilung des Güterverkehrs im Szenario REFERENZ	230
Tabelle 161	Personenverkehr im Szenario UMWELT.....	230
Tabelle 162	Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario UMWELT	231
Tabelle 163	Verteilung des Güterverkehrs im Szenario UMWELT	231
Tabelle 164	Personenverkehr im Szenario BIOMASSE.....	232

Tabelle 165	Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario BIOMASSE.....	232
Tabelle 166	Personenverkehr im Szenario NACHALTIG	233
Tabelle 167	Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario NACHHALTIG.....	233

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Primärenergie in den Szenarien insgesamt.....	v
Bild 2	Regenerative Primärenergie in den Szenarien im Jahr 2030	vi
Bild 3	Künftige Entwicklung der energetischen Biomassenutzung in Deutschland im Szenario NACHHALTIG	vii
Bild 4	Energiekosten in den Szenarien insgesamt	viii
Bild 5	Nettobilanz der Beschäftigung in den Szenarien insgesamt	ix
Bild 6	Treibhausgasemissionen in den Szenarien insgesamt.....	x
Bild 7	Schema der Stoffstromanalyse für Biomasse	3
Bild 8	Betrachtungsraum der Potenzialanalyse mit Systemgrenzen	5
Bild 9	Schema zu den Werkzeugen des Stoffstrommodells und ihrer Funktion	7
Bild 10	GEMIS als Datenbasis für Stoffstromanalysen	8
Bild 11	Prinzipielle Datenflüsse in HEKTOR.....	10
Bild 12	Die Modelllogik von BIO-SZEN.....	12
Bild 13	Stoffströme und Umwandlungspfade zur energetischen Biomassenutzung.....	14
Bild 14	Präkommerzielle Kostenreduktionskurve von Gasturbinen in verschiedenen Entwicklungsphasen	27
Bild 15	Annahme der Kostendegression von IGCC-Anlagen.....	28
Bild 16	Schema zu Lebenswegen von Prozessen zur energetischen Biomassenutzung.....	44
Bild 17	Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus Biogas (2030)	55
Bild 18	Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus Waldholz (2030).....	56
Bild 19	Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus KUP-Holz (2030).....	57
Bild 19	Ergebnis der Auswahlvarianten für Wärme aus Waldholz (2030)	58
Bild 21	Ergebnis der Auswahlvarianten für Dieselmotor-Kraftstoffe (2030)	59
Bild 22	Ergebnis der Auswahlvarianten für Ottomotor-Kraftstoffe (2030).....	60

Bild 23	Vergleich der Erzeugungskosten ausgewählter biogener Stromsysteme mit den Vergütungssätzen der EEG-Novelle	63
Bild 24	Vergleich der Erzeugungskosten ausgewählter biogener Mitverbrennungssysteme bei Vergütung der CO ₂ -Einsparung durch den Emissionshandel	64
Bild 25	Kosten und Treibhausgase bei der Aufbereitung von Biogas zur Netzeinspeisung.....	66
Bild 26	Methodik der Ermittlung des Strohpotenzials	77
Bild 27	Entwicklung des Korn:Stroh-Verhältnisses seit 1970	78
Bild 28	Methodik zur Ermittlung des energetisch nutzbaren Waldholzpotenzials	97
Bild 29	Schematische Darstellung der Nutzungskonkurrenz	104
Bild 30	Entwicklungslinien des Deponiegasanfalls in Deutschland.....	145
Bild 31	Entwicklung des energetisch nutzbaren Deponiegaspotenzials bis 2030.....	146
Bild 32	Entsorgungswege für kommunalen Klärschlamm 1998.....	149
Bild 33	Entwicklung des kommunalen Klärschlammanfalls bis 2030.....	153
Bild 34	Behandlungs- und Entsorgungswege für Klärschlamm bis 2030	154
Bild 35	Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes.....	156
Bild 36	Entwicklung der industriellen Klärschlammengen seit 1991	158
Bild 37	Verwertung von Tiermehl im Jahr 2002	176
Bild 38	Verwertung von Tierfett im Jahr 2002	177
Bild 39	Anbauflächenpotenziale in den Szenarien	189
Bild 40	Überblick zu den szenariobezogenen energetischen Potenzialen von Biomasse-Reststoffen	198
Bild 41	Prinzip von Szenarien als Erzeugung von Modellwelten	202
Bild 42	Der „Handlungskorridor“ als Grundprinzip von Szenarien	203
Bild 43	Primärenergie in den Szenarien insgesamt.....	206
Bild 44	Regenerative Primärenergie in den Szenarien im Jahr 2030	209

Bild 45	Künftige Entwicklung der energetischen Biomassenutzung in Deutschland im Szenario NACHHALTIG	210
Bild 46	Kosten in den Szenarien insgesamt	211
Bild 47	Nettobilanz der Beschäftigung in den Szenarien insgesamt	212
Bild 48	Treibhausgasemissionen in den Szenarien insgesamt.....	213
Bild 49	Kosten für die Strombereitstellung in den Szenarien.....	220
Bild 50	Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in den Szenarien.....	221
Bild 51	Kosten für die Wärmebereitstellung in den Szenarien	227
Bild 52	Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung in den Szenarien	228
Bild 53	Kosten für die Verkehrsdienstleistungen in den Szenarien	234
Bild 54	Treibhausgasemissionen der Verkehrsdienstleistungen in den Szenarien	235
Bild 55	Prinzipschema zu Verfahrensketten bei der Biomassenutzung am Beispiel biogener Festbrennstoffe	236
Bild 56	Verfügbarmachung von Biomasse – von der Idee zur Nutzung	242

1 Fragestellung und Überblick

Die von der Bundesregierung eingeleitete *Energiewende* erfordert, parallel zum Aufbau einer „Energieeffizienzwirtschaft“ den Anteil regenerativer Energien an der Energieversorgung erheblich zu erhöhen. Der Stellenwert der *Biomasse* ist hier – neben Sonne und Wind – mittelfristig am höchsten.

Zwar wurden schon Potenzialstudien zur Verfügbarkeit von Biomasse für energetische Zwecke in vielfacher Zahl vorgelegt, ebenso wie Technologiebewertungen. Es fehlen jedoch Kenntnisse zum nutzbaren Biomassepotenzial unter den Rahmenbedingungen einer *Agrarwende*, wie sie die Bundesregierung anstrebt, sowie einer nachhaltigen Forstwirtschaft. Ebenso sind Verfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse noch wenig erforscht.

Auf den Energiemärkten hat die Bundesregierung mit der Ökologischen Steuerreform sowie dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) klare Schwerpunkte gesetzt, die eine künftige energetische Biomassenutzung unterstützen. Als Konsequenz steht die Markteinführung neuer Technologien, die oft im europäischen Ausland entwickelt wurden, nun auch in Deutschland an.

Hier fehlt eine *sektorübergreifende* Technologieanalyse, die ökologische und ökonomische Fragen marktnaher Verfahren adäquat behandelt und auch Optionen außerhalb der Biomasse-Verordnung systematisch ausleuchtet – z.B. die Mitverbrennung.

Diesem Mangel soll durch die nun vorliegenden Ergebnisse des Forschungsprojekts begegnet werden, das auf Basis einer umfassenden *Stoffstromanalyse* die künftig möglichen Entwicklungen durch Szenarien analysierte und ein ökologisch verträgliches Konzept zur energetischen Nutzung von Biomassepotenzialen in Deutschland entwickelte. Die Basis hierzu bildet die Analyse des Entwicklungsstands zur Biomassenutzung und der ökonomischen und ökologischen Verbesserungspotenziale durch marktnahe Fortentwicklungen.

Das Öko-Institut führte dieses Verbundforschungsprojekt in Kooperation mit den wissenschaftlichen Partnern

- FhI-UMSICHT (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik)
- IE – Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig
- IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg
- IZES – Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken
- TU Braunschweig – Institut für Geoökologie/Abt. Umweltsystemanalyse
- TU München – Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus (WdL)

vom Oktober 2001 bis März 2004 durch und wurde hierbei vom BMU gefördert. Im Rahmen des Vorhabens wurden mehrere Fachgespräche geführt und die Methodik, Datengrundlagen und Ergebnisse intensiv mit einem projektbegleitenden Beirat diskutiert. Weiterhin erstellte Fichtner im Rahmen eines Unterauftrags eine Ausarbeitung zu Daten von Bioenergietechniken, und Johann Köppel sowie Wolfgang Peters (TU Berlin) arbeiteten im Rahmen eines eigenen BMU-Auftrags zu Fragen des Naturschutzes bei der Biomassenutzung im Vorhaben mit.

Das Forschungsvorhaben verfolgte im Einzelnen folgende Teilziele:

- Systematische Erfassung der *Stoffströme* und damit verbundener Umwelt- und Kostenbilanzen sowie - orientierend Beschäftigungswirkungen - für energetisch genutzte Biomasse in Deutschland; den Ansatz hierzu beschreibt Kapitel 2.
- Erstellung einer öffentlich zugänglichen und fortschreibbaren *Technologiedatenbasis* für energetische Nutzungstechnologien von Biomasse insbesondere für stationäre Anwendungen, die technische, ökonomische und ökologische Daten umfasst und auch vorgelagerte Prozessketten einbezieht – die Datenbasis wird im Kapitel 3 vorgestellt.
- Durchführung von *Lebenswegvergleichen* von Biomassenutzungstechniken nach der BiomasseVO und solchen außerhalb ihres heutigen Geltungsbereichs, Einbezug der Wärmebereitstellung und – orientierend – auch des Verkehrssektors. Die wichtigsten Ergebnisse hierzu gibt das Kapitel 4.
- Ermittlung von *Potenzialen* zur verstärkten energetischen Biomassenutzung unter Berücksichtigung von Umwelt- und Naturschutzfragen – dies wird ausführlich im Kapitel 4.5 dargestellt.
- Erstellung von *Szenarien* zu künftigen energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse in Deutschland mit einem anwenderfreundlichen, dynamischen *Stoffstrommodell*, wobei sowohl effiziente Bereitstellungstechnologien (insb. Kraft-Wärme-Kopplung, Vergasung, Brennstoffzellen) als auch mögliche Restriktionen des Aufkommens aus der Forst- und Landwirtschaft berücksichtigt und Biomassen außerhalb des heutigen Geltungsbereichs der BiomasseVO (z.B. Zoomasse) einbezogen werden. Die Darstellung der Szenarien und ihrer Ergebnisse sind Gegenstand von Kapitel 6.
- Entwicklung von *Handlungsempfehlungen* für die Politik – insbesondere für das BMU - im Hinblick auf Klimaschutz und Nachhaltigkeit auf Basis einer Szenario-Analyse. Hierbei waren ökonomische und ökologische Verträglichkeit sowie die Konsequenzen und Anforderungen an Forst- und Landwirtschaft zu berücksichtigen. Die Empfehlungen werden im Kapitel 7 zusammengefasst.

Ein kurzer Ausblick auf künftige Anwendungen der entwickelten Werkzeuge und offene Forschungsfragen schließt sich hieran an (Kapitel 8).

Die im Bericht verwendeten *Abkürzungen* werden am Schluss erläutert.

Ergänzend wurde ein Anhangband zum Endbericht vorgelegt, der einen Bericht der TU Berlin zu Fragen des Naturschutzes bei der Biomassenutzung, eine Dokumentation der Modell- und Werkzeugentwicklung, der Technologiedatenbasis sowie der Szenario-Daten und Detailergebnisse umfasst (vgl. beigefügte CDROM).

Darüber hinaus wurden die entwickelten *EDV-Werkzeuge* sowie die Datenbasis in elektronischer Form vorgelegt (vgl. beigefügte CDROM).

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt wurden zudem in einer allgemeinverständlichen Broschüre zusammengefasst und in kurzen Informationsblättern verdichtet, die zusammen mit den EDV-Werkzeugen auf der Projekt-website (www.oeko.de/service/bio) sowie auf der Projekt-CDROM verfügbar sind.

Direkten Zugriff auf die im Projekt entwickelte Datenbasis bietet zudem die ProBas-website des UBA unter www.probas.umweltbundesamt.de.

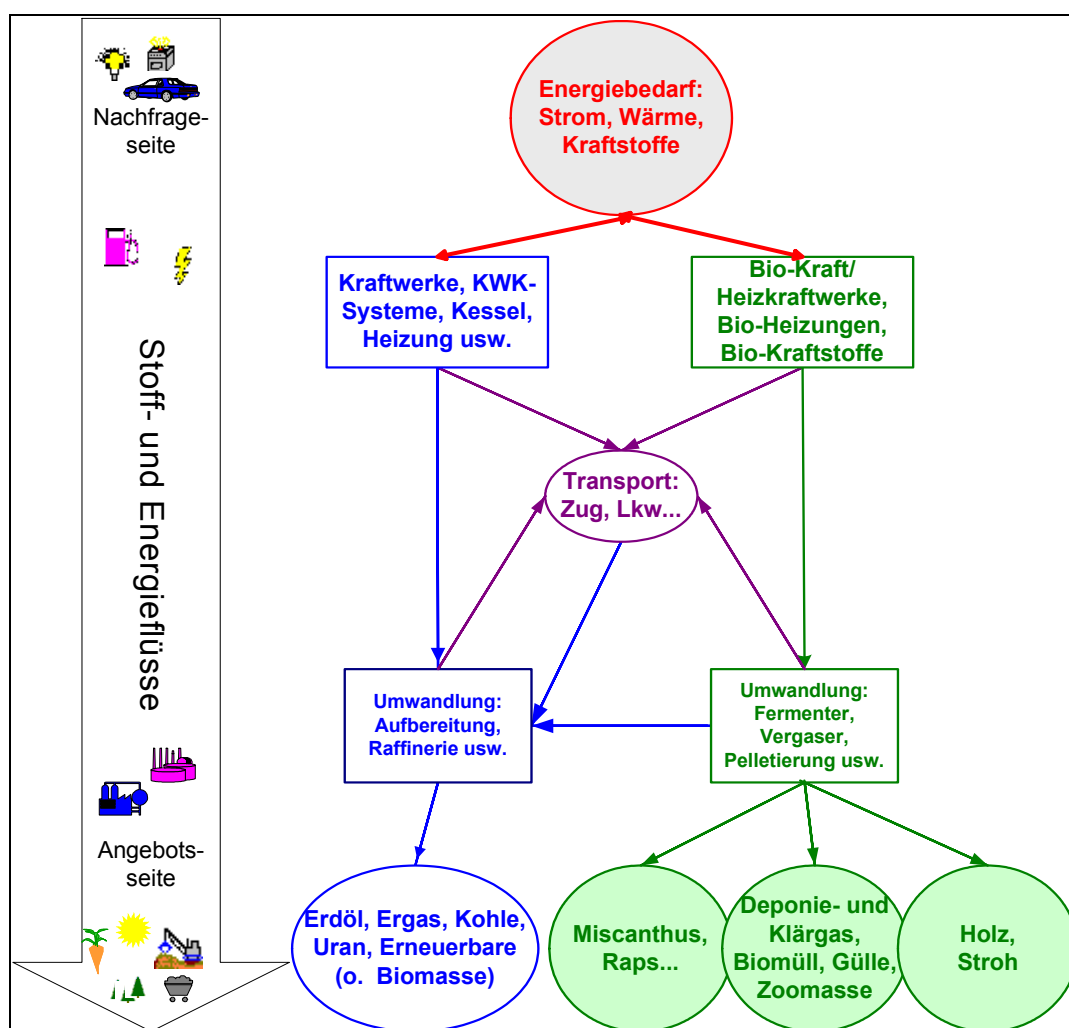
2 Stoffstromanalyse für Biomasse

In den letzten Jahren wurde u.a. durch Mittel der BMU-Umweltforschung und des BMBF das Konzept der *Stoffstromanalyse* entwickelt, die eine *Operationalisierung* des Leitbilds „Nachhaltige Entwicklung“ in verschiedenen Bedürfnisfeldern akteurs- und politiknah leistet. Die Stoffstromanalyse dient zur produkt- und branchenübergreifenden Darstellung der Stoff- und Energieströme sowie deren Umwelteffekte und liefert durch *Szenarien* quantifizierte Aussagen zu ihren künftigen Entwicklungsmöglichkeiten.

Stoffströme fließen *physisch* von der Ressourcenentnahme über die Grundstoff- und Weiterverarbeitung bis hin zu Gütern und Dienstleistungen, die von Verbrauchern erworben, benutzt und schließlich zur Entsorgung abgegeben werden.

Die Stoffstromanalyse setzt bei der *Nachfrage* an und verfolgt die Stoffströme zurück bis zur Ressourcenentnahme. Im Fall der energetischen Nutzung von Biomasse setzt die Stoffstromanalyse beim Bedarf an Strom, Wärme und Kraftstoffen an und verfolgt diese über die verschiedenen Nutzungs- und Umwandlungsstufen hinweg bis zur Gewinnung der Primärenergie (siehe folgendes Bild).

Bild 7 Schema der Stoffstromanalyse für Biomasse



Mit Hilfe der Stoffstromanalyse lässt sich bestimmen, welche Stoffströme und Umweltbelastungen durch die Nachfrage nach bestimmten Produkten und Dienstleistungen unter der Annahme bestimmter *Produktionsprozesse* ausgelöst werden.

Dies erfolgt über *Prozessketten*, in denen alle wesentlichen Herstellungs- und Distributionsaufwendungen bis zur Quelle (Ressourcenentnahme) quantitativ zurückverfolgt werden.

Das Prinzip der Stoffstromanalyse wurde im Projekt auf die vielfältigen biogenen Stoffströme und entsprechende Technologien angewendet (vgl. Kapitel 3.1).

Die Stoffstromanalyse ist *zukunfts offen*: Sie verwendet *Szenarien*, die über *wenn-dann-Aussagen* die umweltbezogenen Konsequenzen künftiger Entwicklungsoptionen unter verschiedenen Randbedingungen ermitteln.

Wesentlich ist dabei, dass stets sowohl die Nachfrageseite (Absatzpotenziale) als auch die Bereitstellungsprozesse (Technologien in der Wirtschaft) sowie Ressourcenfragen (Mengen, Begrenzungen) *integriert* behandelt werden und Effekte im Ausland (Importe) wie auch regionale Besonderheiten berücksichtigt werden können.

Damit stellt die Stoffstromanalyse ein *Werkzeug zur Politikberatung* dar. Durch die Prozessketten-Logik kann sie mit typisierten Daten und Szenario-Annahmen arbeiten, die *künftige* Randbedingungen der Biomassebereitstellung und -nutzung sowie sich in Entwicklung befindliche neue Technologien einbezieht.

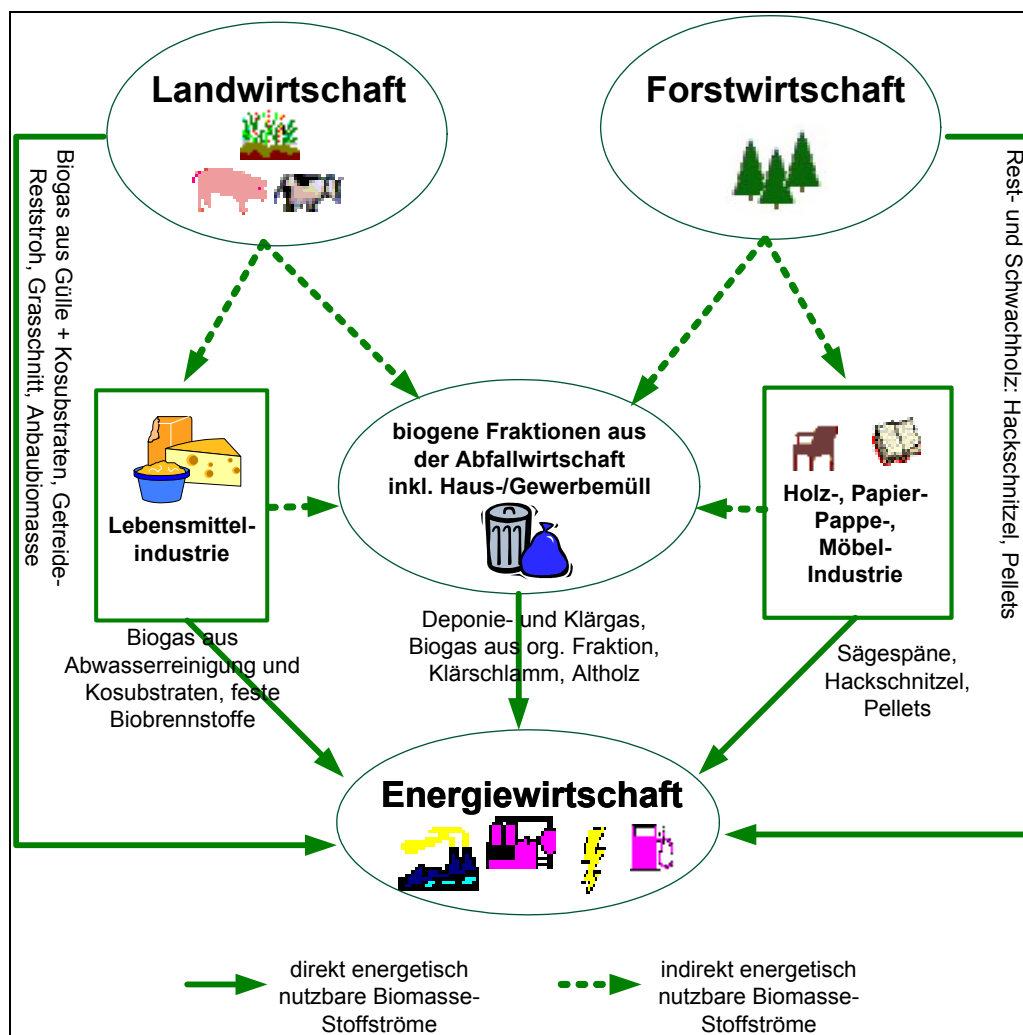
2.1 Systemgrenzen im Projekt

Das Projekt entwickelte auf Basis der Stoffstromanalyse ein nachhaltiges Konzept zur *energetischen* Nutzung von Biomasepotenzialen (vgl. Kapitel 5) aus den Bereichen

- *Restholz* (aus Forstwirtschaft, Holzindustrie) und *Altholz* (Baustellenabfälle usw.),
- Landwirtschaftliche *Reststoffe* (Stroh, Biogas), nutzbare Biomasse aus der Lebensmittelindustrie sowie Zoomasse-Reststoffe,
- *Reststoffe* aus der Abfallwirtschaft (Bioabfall, Klärschlamm und Klär-/Deponiegas),
- *Energiepflanzen* (Kurzumtriebsholz, Pflanzenöl, Getreide, Gräser usw.).

Somit wurden praktisch alle quantitativ bedeutsamen direkten und indirekten Quellen biogener Stoffströme einbezogen (vgl. folgende Abbildung).

Bild 8

Betrachtungsraum der Potenzialanalyse mit Systemgrenzen


Der methodische Ansatz des Projekts erlaubt grundsätzlich, auch biogene Stoffströme aus dem Ausland einzubeziehen (z.B. Import von Biokraftstoffen), dies wurde aus Aufwandsgründen und dem Fokus auf eine *nationale* Biomassenutzung jedoch nicht weiter untersucht.

2.2 EDV-Werkzeuge zur Stoffstromanalyse

Für die Datenbasis von Stoffstromanalysen steht mit dem Computerprogramm GEMIS¹⁵ ein Werkzeug zur Verfügung, das bereits Daten zu zahlreichen Prozessketten aus dem Bereich der Stoffe, des Transportsektors sowie der Energiewirtschaft – und hier insbesondere Biomasse-Technologien – enthält.

Die Modellierungsarbeiten für das Biomasse-Stoffstrommodell beruhen auf dem Modell BASiS, das speziell für Analysen im Bedürfnisfeld „Bauen und Wohnen“ ausgelegt wurde¹⁶.

Wesentlich daran ist, dass BASiS 1.0 eine direkte Kopplung eines speziellen Szenario-Editors für den Bereich „Bauen und Wohnen“ mit der Datenbasis von GEMIS vorsieht und auch dessen Analysewerkzeuge verwendet werden. Anstelle eines integrierten Modells wurde die *Interaktion spezifischer Werkzeuge* zur Durchführung der Stoffstromanalyse implementiert.

Entsprechend dieser Modellierungsphilosophie wurde auch für das hier entwickelte Stoffstrommodell zur energetischen Biomassenutzung ein *Baustein-konzept* verfolgt.

Zur Durchführung der Stoffstromanalyse wurde eine Reihe von EDV-Werkzeugen entwickelt, die unter der Bezeichnung „Stoffstrommodell“ eine *Kombination einzelner Modelle* bilden:

- Die *Technologie-Datenbasis* speichert stoffstrom- und umweltrelevante Informationen sowie Kosten- und Beschäftigungsdaten – sie wurde in einer Fortentwicklung des Computermodells GEMIS zur Version 4.2 vorgelegt.
- Die *Potenziale* für Biomassen werden durch exogene Annahmen und Vorgaben zur Abgrenzung von stofflicher und energetischer Biomassenutzung bestimmt. Hierzu wurde das Teilmodell HEKTOR für den Bereich der Landwirtschaft erstellt und zur Berechnung der landwirtschaftlichen Reststoffpotenziale (vgl. Kapitel 5.2) sowie der für Biomasse-Anbau nutzbaren Flächenpotenziale (vgl. Kapitel 5.7) verwendet. Ergänzend wurde mit WALD ein weiteres Teilmodell für die Reststoffpotenziale der Forstwirtschaft entwickelt (vgl. Kapitel 5.3). Für die biogenen Energiepotenziale aus der Abfallwirtschaft (vgl. Kapitel 5.5) und aus Zoomasse (vgl. Kapitel 5.6) wurden zur Berechnung der Einzeldaten kleinere, unabhängige Excel-Tabellen erstellt.
- Das Szenario-Tool BIO-SZEN modelliert die *Szenarien*, in denen die künftigen Entwicklungen zur Angebots- und Nachfrageseite der energetischen Biomassenutzung enthalten sind (vgl. Kapitel 2.2.3).
- Die Stoffstrom-, Kosten- und Beschäftigungsbilanzierung (über die gesamten Lebenswege) wurde mit GEMIS durchgeführt, das die Ergebnisse an BIO-SZEN elektronisch übermittelt. Das Szenario-Tool stellt die Ergebnisse tabellarisch und grafisch dar.
- Für sehr detaillierte Ergebnisanalysen stehen weitere Analysewerkzeuge in GEMIS zur Verfügung.

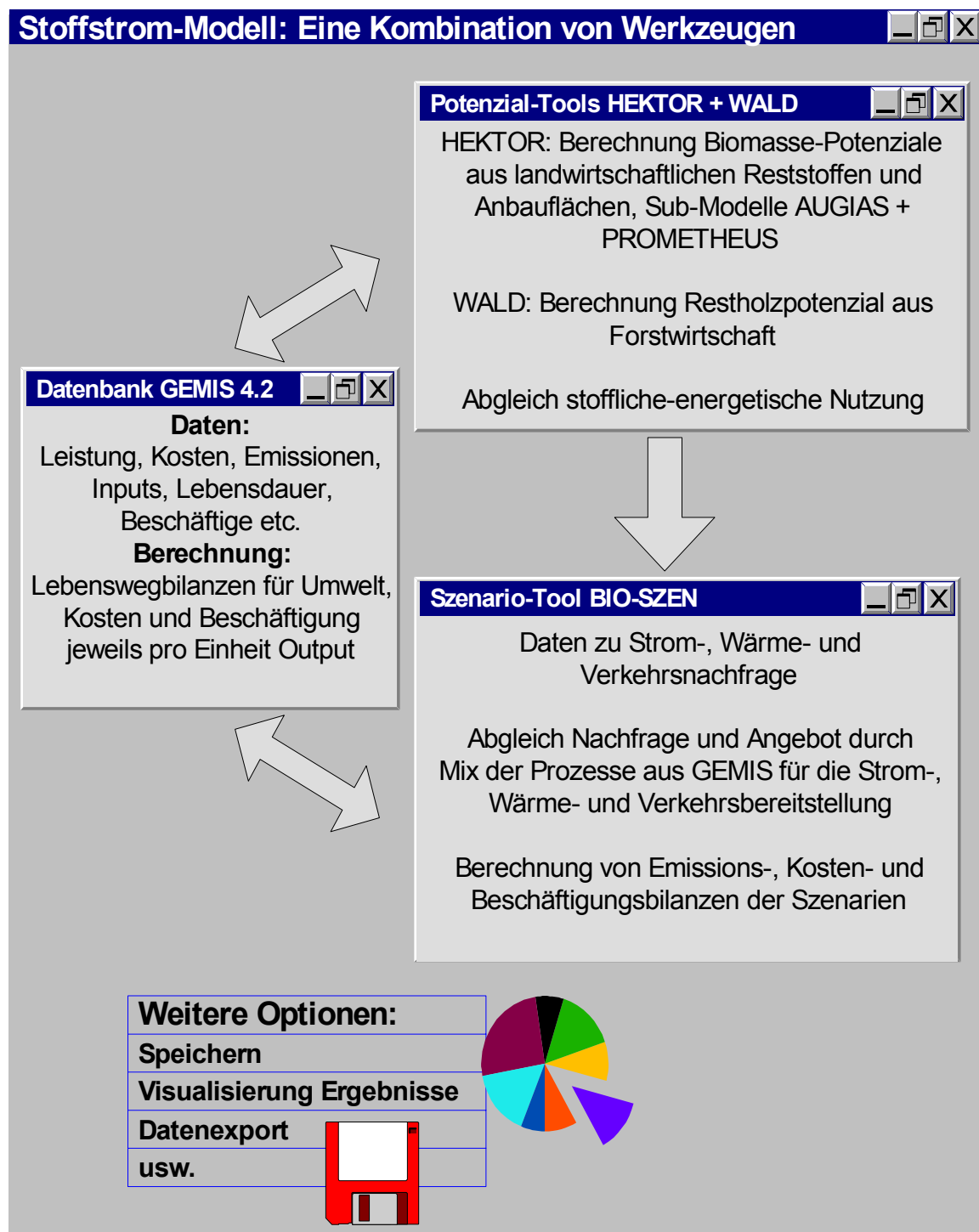
¹⁵ **G**lobales **E**missions-**M**odell **I**ntegrierter **S**ysteme (siehe <http://www.gemis.de>). Die im Projekt entwickelte Version 4.2 ist auf der diesem Bericht beigelegten CDROM enthalten und kann ohne Installation direkt verwendet werden.

¹⁶ BASiS steht für **B**edürfnisfeldbezogene **A**nalyse von **S**toffströmen **i**n **S**zenarien (vgl. ÖKO 1999a, ÖKO/IÖR 2004).

Das Bausteinkonzept des Stoffstrommodells nutzt bestehende Software- und Datenbestände und entwickelt nur die Modellteile fort, die spezifisch für die Fragestellung „Biomasse“ sind.

Eine Übersicht zu den Werkzeugen und ihrer Funktion zeigt das folgende Bild.

Bild 9 Schema zu den Werkzeugen des Stoffstrommodells und ihrer Funktion



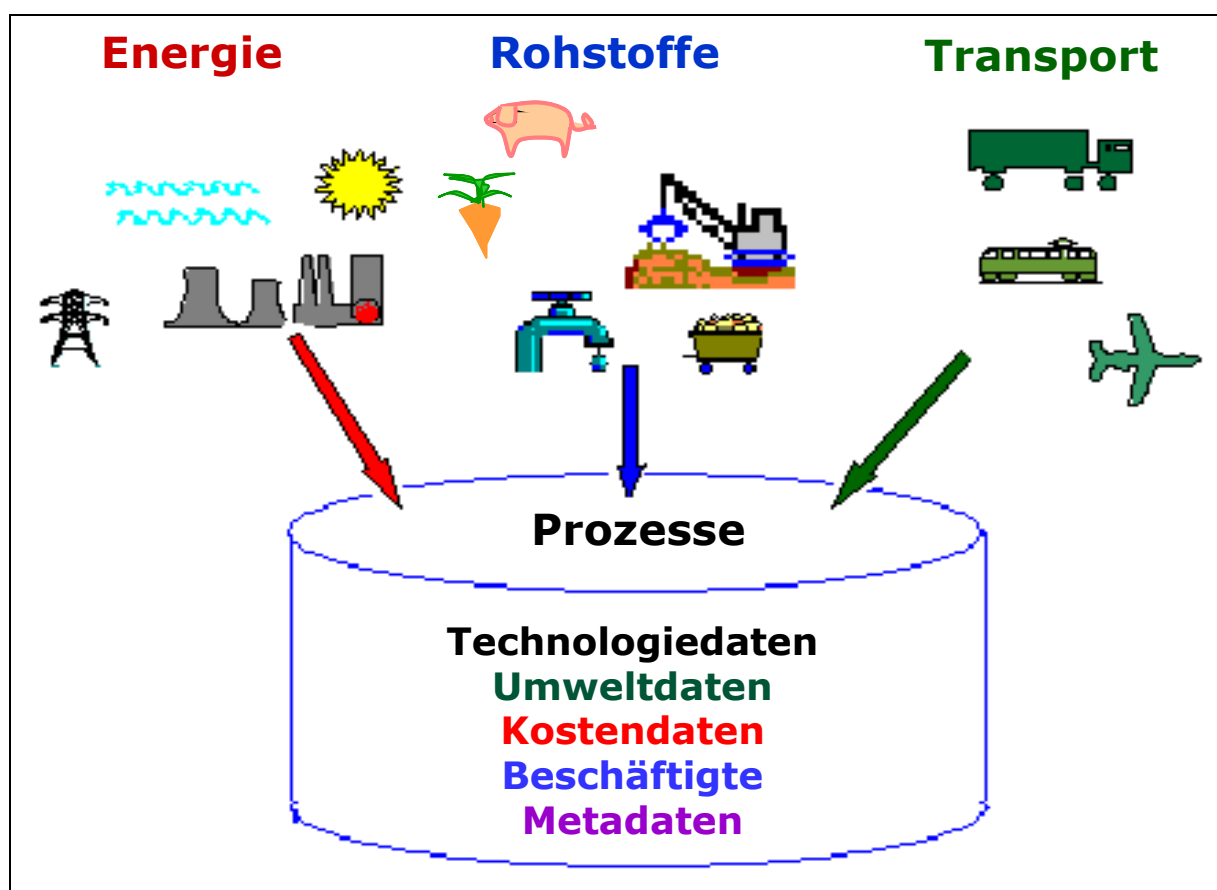
Sowohl GEMIS wie auch die entwickelten Szenario-Tools sind als public-domain-Software *ohne Einschränkungen* und ohne weitere Kosten durch BMU und UBA nutzbar und können ohne Lizenzierung auch an Dritte weitergegeben werden.

2.2.1 Die Technologiedatenbasis in GEMIS

Für die Datenbasis des Stoffstrommodells wurde mit GEMIS auf eine vom Öko-Institut entwickelte, öffentlich zugängliche Software zurückgegriffen, in der bereits Informationen zu zahlreichen Prozessketten vorliegen aus dem Bereich der Stoffströme¹⁷, des Transportsektors sowie der Energiewirtschaft – hier neben fossilen Energieträgern auch verschiedene Technologien zur Biomassenutzung¹⁸.

Die Aktualisierungen und Ergänzungen aus der Technologieanalyse (vgl. Kapitel 3) wurden in dieser Datenbank abgelegt und stehen damit nicht nur für die ganzheitliche Bilanzierung von Lebenswegen für Einzeltechnologien (vgl. Kapitel 4), sondern auch für umfassendere Szenariorechnungen (vgl. Kapitel 6) zur Verfügung.

Bild 10 GEMIS als Datenbasis für Stoffstromanalysen



¹⁷ GEMIS enthält u.a. Daten zu Baustoffen (Bauholz, Glas, Kies, Spanplatten, Zement etc.), Metallen (Aluminium, Kupfer, Stahl usw.), Kunststoffen (PVC, PE etc.), Grundchemikalien, Forstwirtschaft & Holzverarbeitung.

¹⁸ Neben der direkten Nutzung von Holz- und Strohprodukten in Heizungen und Heizwerken sowie Bio- und Deponiegas in Kesseln und Motoren umfasst die Datenbank auch Pflanzenöl, zentrale und dezentrale Holzvergasung sowie entsprechende Vorketten (Brennstoffgewinnung und Aufbereitung, Logistik).

Die Datenbank bietet Zugriff auf Datensätze über spezielle Fenster, in denen Listen über Filterkriterien gezielt das Informationsangebot strukturieren.

Die Technologiedatenbasis mit Kenndaten *künftiger*, d.h. sich in Entwicklung befindlicher neuer Technologien der Biomassebereitstellung und -nutzung erlaubt, in die Bilanzierung der zukünftigen Emissionsminderung durch verstärkte energetische Biomassenutzung auch Annahmen über die Markteinführung neuer Systeme einzubeziehen. GEMIS kann zudem direkte Exporte der Dateninhalte in verschiedenen Formaten vornehmen und damit die Verwendung der Datenbasis für weitere Untersuchungen sowie die Veröffentlichung z.B. im Internet effizient unterstützen¹⁹.

Im Rahmen des Projekts wurde GEMIS *weiterentwickelt* zur Version 4.2, die nun folgende wesentlichen neuen Eigenschaften umfasst:

- Einbeziehung weiterer *Metadaten* (review-Status, Technologie-Status, Zeitbezug), die das Filtern der mittlerweile über 7000 Datensätze erleichtern
- Neumodellierung der Behandlung von *Nebenprodukten* (explizite Einbeziehung mehrerer Produkte auch ohne Gutschrift, explizite Nennung der Allokationsmethode)
- Einbeziehung von Daten zur *Beschäftigung* in die Prozessdatensätze, und Ergänzung der Bilanzierungsroutinen um Beschäftigungseffekte, sowohl direkt (entlang der Prozessketten) als auch indirekt (über Investitionskosten und spezifische Beschäftigungswerte des Maschinenbausektors im Jahr 1998)
- *Import-Option* für Datensätze auf Basis eines speziellen Excel-Formats²⁰.

Alle im Projekt entwickelten Biomasse-Datensätze aus der Technologieanalyse (vgl. Kapitel 3) sind in GEMIS verfügbar und wurden durch eine eigene Referenzierung kenntlich gemacht.

Ergänzend wurde im Rahmen des Projekts auch ein update der weiteren Energiedaten vorgenommen, die insbesondere fossile Erzeugungstechnologien (Stein- und Braunkohle, Erdgas) sowie die Vorketten zur Bereitstellung fossiler Energien (inkl. Erdöl) betreffen.

Dabei erfolgte auch eine Fortschreibung der entsprechenden Kenndaten für die Jahre 2010-2030, die im Anhangband (vgl. beigefügte CDROM) zu diesem Endbericht dokumentiert sind.

2.2.2 Das Teilmodell HEKTOR

Das Teilmodell HEKTOR²¹ wurde entwickelt, um abzuschätzen, welche Flächen in Zukunft für den Anbau von Energiepflanzen in Deutschland zur Verfügung stehen.

¹⁹ Die Biomasse-Technologiedaten aus dem Stoffstrom-Projekt werden damit auch unabhängig von der spezifischen Software für Dritte nutzbar: GEMIS verfügt über eine Schnittstelle zur Datenbank ProBas des Umweltbundesamts, die kostenlos über das Internet mit einem web-browser genutzt werden kann und einen speziellen Zugang zu den Biomasse-Daten bietet, der unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de> zu finden ist. Von ProBas aus können die Datensätze in elektronischer Form (z.B. als Excel- und PDF-Dateien) bezogen werden.

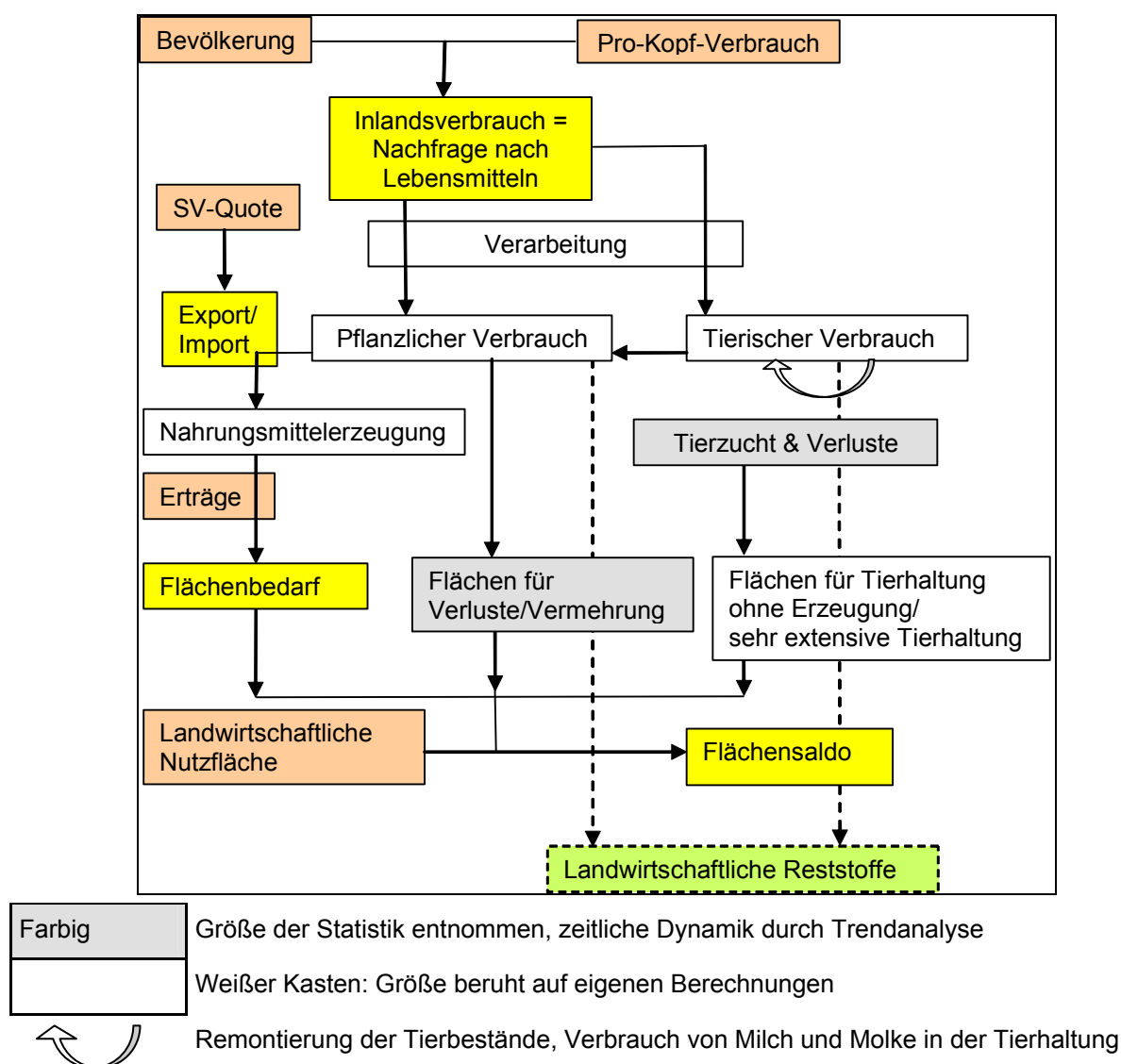
²⁰ Die im Rahmen des Projekts entwickelte spezielle Im- und Exportschnittstelle unter Excel (ab MS-Office-Version 2000) steht Interessierten auf Nachfrage zur Verfügung.

²¹ HEKTOR ist ein Akronym für *Hektar Kalkulator*. Eine genauere Darstellung dieses Teilmodells gibt der Anhangband.

Der Anbau von Energiepflanzen wird zumindest in der Landwirtschaft auf Flächen stattfinden, die nicht mehr für die Produktion von Nahrungsmitteln genutzt werden. Da diese bei der Flächennutzung auch weiterhin im Vordergrund steht, wird zunächst der Flächenbedarf für die Erzeugung von Nahrungsmitteln berechnet. Aus der Differenz zwischen vorhandener und für die Ernährung genutzter Fläche ergibt sich für jeden Zeitpunkt die für den Biomasseanbau verfügbare Fläche. Der Teil, der nicht zusätzlich für Siedlung, Verkehr oder Naturschutz benötigt wird, steht zukünftig für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung.

Darüber hinaus verfügt HEKTOR über die Sub-Module AUGIAS und PROMETHEUS zur Berechnung der Stoff- und Energiepotenziale aus landwirtschaftlichen Reststoffen, die energetisch nutzbares Stroh und Biogas aus Gülle umfassen. Das Grundschemata der Modellierung in HEKTOR zeigt das folgende Bild.

Bild 11 Prinzipielle Datenflüsse in HEKTOR



2.2.3 Das Szenario-Tool BIO-SZEN

Für die Erstellung der Szenarien zur energetischen Biomassenutzung existierte im Gegensatz zur Datenbank kein unmittelbar verwendbares Werkzeug, das ausreichend benutzerfreundlich ist und eine effiziente Interaktion mit der Datenbank erlaubt.

Daher wurde im Vorhaben ein EDV-Hilfsmittel zur *Szenarioerstellung und Analyse* (BIO-SZEN) erstellt. Diese Software ermöglicht, zeitpunktgestützte Stoffstromanalysen in Szenarien zu berechnen und graphisch darzustellen.

Der Kern von BIO-SZEN ist der Editor für Szenarien – mit ihm werden Szenarien erstellt, vorhandene geändert (editiert) und ggf. gespeichert sowie dokumentiert.

In seine Auslegung wurden die spezifischen Modellierungsfragen für die Biomasse-Szenarien berücksichtigt:

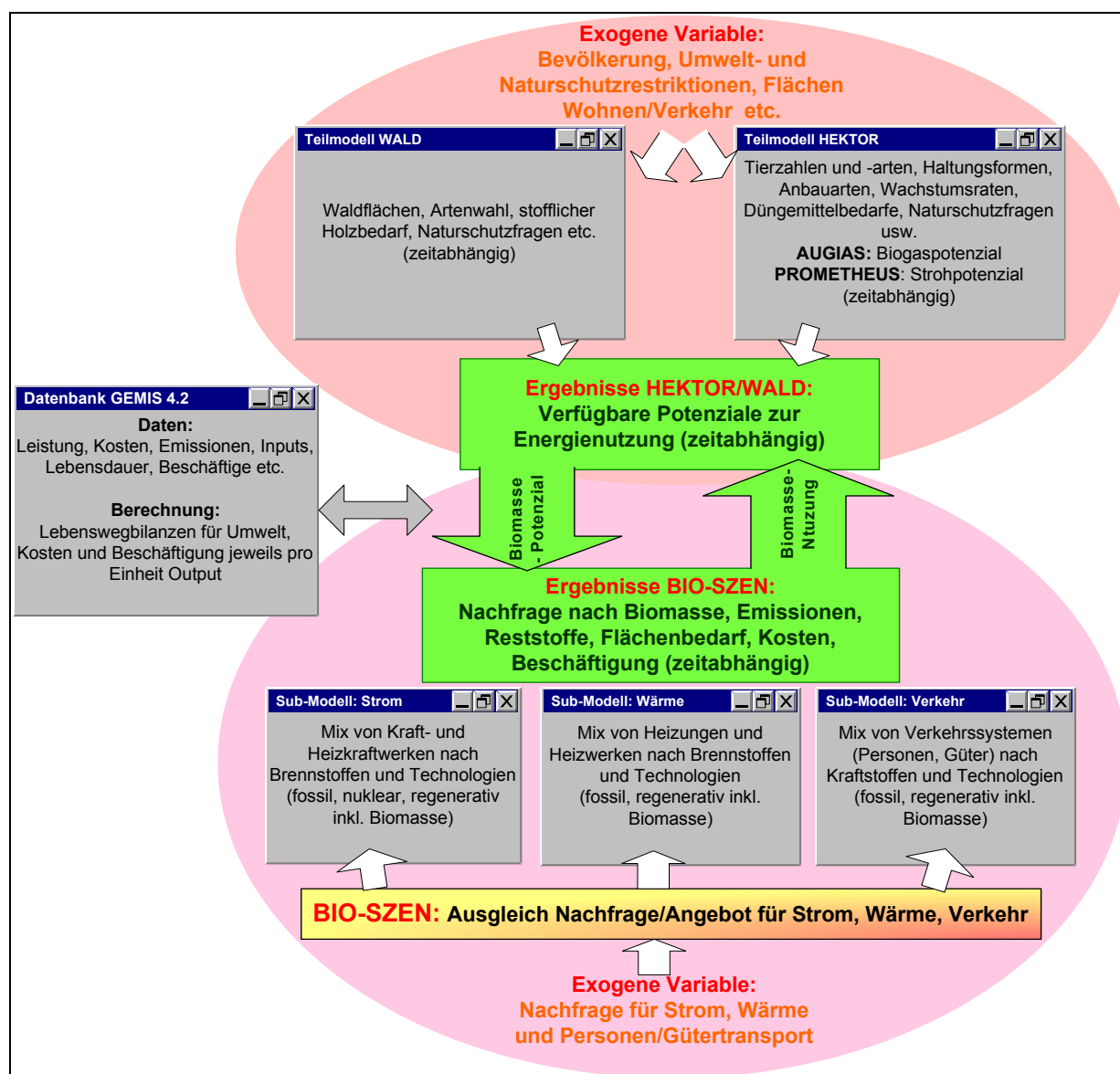
- Die *Nachfrage* nach Strom und Wärme aus den einzelnen Sektoren der Volkswirtschaft sowie die Verkehrsnachfrage (Personen- und Güterverkehr) werden für die Szenarien tabellarisch dargestellt und für die Stützzeitpunkte einzeln ausgewiesen. Der Szenario-Editor kann dabei mehrere Nachfrageprofile verwalten, um z.B. unterschiedliche Energieeffizienzen zu berücksichtigen.
- Die *Angebots-Prozesse* (Technologien zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung) werden durch die Kopplung mit der Technologiedatenbank (in GEMIS) modelliert, indem die dort verfügbaren Prozesse zur Deckung des Bedarfs an das Szenario-Tool elektronisch übergeben und dann in den verschiedenen Szenariozeitpunkten vom Benutzer ausgewählt werden.
Zur Vereinfachung komplexer Strukturen wurde die Eingabe für Kraftwerksparks, Heizsysteme und Verkehrstechnologien durch prozentuale Mixer realisiert, die die jeweiligen Erzeugungsanteile je Prozess und Szenario-Zeitpunkt repräsentieren.
- Bei der Erstellung der Szenarien überwacht BIO-SZEN die Ausnutzung der Biomasse-Potenziale (Reststoffe und Flächen) und zeigt an, falls es in einem Szenario zu einer Überschreitung der Potenzialnutzung kommt.

Weiterhin enthält BIO-SZEN die Ergebnisdarstellung für die Einzelbereiche Strom, Wärme und Personen- sowie Güterverkehr, die Aggregation zur Endenergie- und Primärenergienachfrage sowie die Ergebnisse der Emissions-, Kosten- und Beschäftigungsbilanzen der Szenarien. Die Ergebnisdarstellung erfolgt jeweils tabellarisch und in Grafiken.

Das Prinzip von BIO-SZEN als Kern des Stoffstrommodells zeigt das folgende Bild.

Bild 12

Die Modelllogik von BIO-SZEN



Eine ausführliche Darstellung der EDV-Werkzeuge sowie Hinweise zu ihrer Nutzung finden sich im Anhangband zu diesem Endbericht (vgl. beigefügte CDROM).

3 Die Datenbasis zu Biomasse-Technologien

Grundlage aller Arbeiten zur Stoffstromanalyse war die Erstellung einer breiten, öffentlich zugänglichen *Datenbasis* zu Technologien im Bereich Bioenergie. Im Projekt erfolgte dazu eine Sammlung und Sichtung von Kenndaten (Parameter) für jede relevante energetische Bereitstellungs- und Nutzungstechnologie für Biomasse, die sowohl für die Analyse von Einzeltechnologien (vgl. Kapitel 4) wie auch für die Szenarien (vgl. Kapitel 6) eingesetzt wurde.

Für die Biomasse-Nutzungstechnologien wurde neben eigenen Arbeiten auch ein Unterauftrag an Fichtner zu ausgewählten Technologie- und Kostendaten vergeben und Ergebnisse des UBA-Vorhabens zum Monitoring der BiomasseVO (vgl. IE 2003) einbezogen.

Zusätzlich wurden in der Datenbasis auch Technologien zur Biomassenutzung für die *Wärmebereitstellung* (Kessel, Heizungen) und den *Verkehrssektor* (Kraftstoffe für Lkw, Pkw, Traktoren usw.) erfasst, da diese Anwendungen mit denen zur (kombinierten) Stromerzeugung konkurrieren und hierzu ganzheitliche Bilanzierungen und Vergleiche durchgeführt wurden.

Schließlich wurden für die Stoffstromanalyse auch die der eigentlichen Nutzung *vorgelagerten Prozesse* berücksichtigt, die zur *Bereitstellung* von Brenn- und Kraftstoffen notwendig sind.

Die *vorgelagerten* Prozessketten für Biomasse umfassen

- Gewinnung (Anbau und Ernte bzw. Erfassung von Reststoffen),
- Aufbereitung (z.B. Trocknung, Zerkleinerung, Kompaktierung, Lagerung),
- Konditionierung und ggf. Konversion (z.B. Vergasung, Vergärung, Veresterung),
- Transporte auf allen Stufen sowie
- erforderliche Hilfsenergien und Hilfsstoffe mit ihren vorgelagerten Prozessketten.

Hierbei wurden die jeweiligen Lebenswege²² berücksichtigt.

Als Kenndaten werden für die jeweiligen Technologien Angaben zu

- eingesetztem Biomassetyp (Heizwert, Elementaranalyse, Kosten),
- Leistung, typische Auslastung, Nutzungsgrad, Lebensdauer,
- Hilfsenergie- und Hilfsstoffinput (z.B. Strom, Kühlwasser, Schmiermittel),
- Flächenbedarf, Herstellungsaufwand (Materialien),
- Emissionen (Luftschadstoffe, Treibhausgase), Reststoffe, Abwasseranfall,
- Kosten (Investitions- und fixe sowie variable Betriebskosten)
- direkte Beschäftigte

erfasst und in der Datenbank dokumentiert.

Bei den Verkehrstechnologien wurden entsprechende Kenndaten (z.B. Besetzungsgrad, jährliche Fahrleistung) verwendet.

²² Dies gilt für die Herstellung der Einzeltechnologien und deren Nutzungsphase. Bei Energiepflanzen sind Saatguterzeugung und –ausbringung sowie ggf. erfolgreicher Biozideinsatz, Bewässerung, Pflegeaufwand usw. mit erfasst.

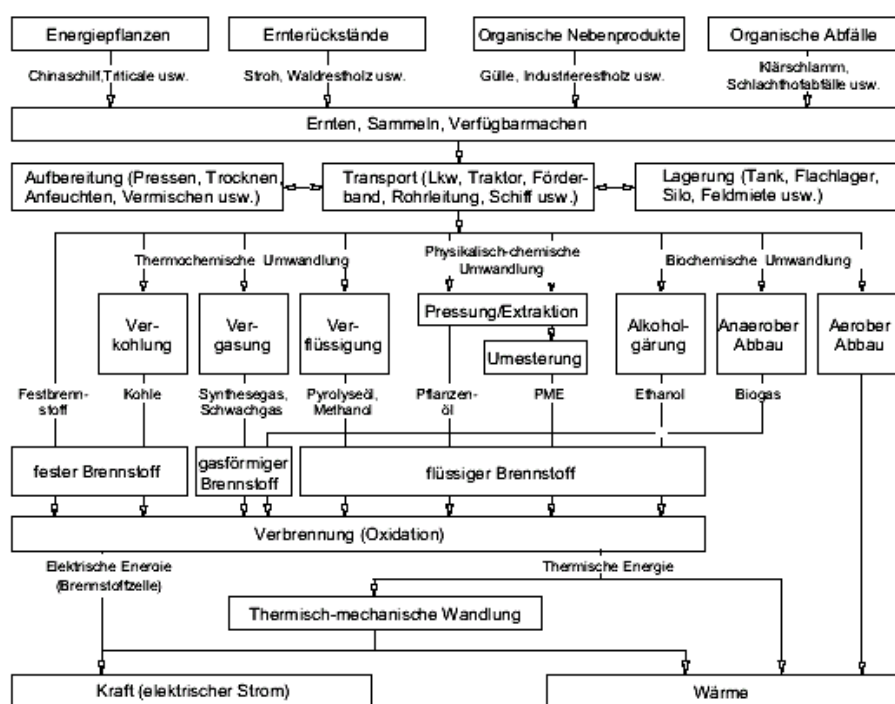
Die Quellen der Daten wurden referenziert sowie Metainformationen (Kommentare, Datenqualität, Wirtschaftssektor, Technologietypus und –status, Orts- und Zeitbezug etc.) zugeordnet. Die z.T. schon vorhandenen Datensätze zu Technologien in der Datenbank von GEMIS Version 4.1 wurden dabei vom Projektteam durchgesehen, mit neueren Daten aktualisiert bzw. ergänzt. Soweit noch keine Datensätze vorlagen (z.B. für Zoomasse), wurden die entsprechenden Datensätze komplett neu eingegeben.

Als wichtige Neuerung wurde im Projekt eine kritische Durchsicht der Daten (*review*) nach dem Vier-Augen-Prinzip für jeden Biomasse-Datensatz durchgeführt und dokumentiert, womit insgesamt eine hohe Datengüte erreicht wurde²³. Im Rahmen von Experten-Workshops wurden wichtige Elemente der Technologiedatenbasis kritisch diskutiert. Die nun vorliegende Version der Datenbasis wird auch über das Internet öffentlich zugänglich gemacht und dokumentiert (vgl. Anhangband auf beigefügter CDROM).

3.1 Übersicht zu den Biomasse-Technologien und ihren Vorketten

Biomasse kommt in sehr vielen einzelnen Stoffströmen vor, die sich wiederum in eine große Zahl von Umwandlungs- und Nutzungsoptionen aufteilen – dies zeigt das folgende Schema.

Bild 13 Stoffströme und Umwandlungspfade zur energetischen Biomassennutzung



Quelle: Kaltschmitt (2003a)

²³ Das projektinterne review erfolgte auf der Basis von einzelnen Excel-Dateien, in denen die Datenquellen und ggf. erfolgten Umrechnungen und Ergänzungen der Bearbeiter dokumentiert sind. In den Excel-Dateien sind jeweils auch Bearbeiter und reviewer erfasst und deren Kommentare. Die Excel-Dateien wurden nach erfolgtem review über eine elektronische Schnittstelle in die Datenbank von GEMIS importiert.

Im Rahmen des Projekts wurde ein sehr breites Spektrum von biogenen Stoffströmen und entsprechenden Umwandlungstechnologien zur Bereitstellung von Bioenergieträgern untersucht, die folgende Zusammenstellung zeigt.

Tabelle 1 Umfang der Datenanalyse zur Bereitstellung von Bioenergieträgern

INPUT	Gewinnung	Logistik		Konversion						
		Transport	Lagerung	Trocknung, Zerkleinerung, Kompaktierung	Festbettvergaser (FB) bis 2 MW	Wirbelschicht-(WS) Vergaser < 2 MW		WS-Vergasung > 2MW für GuD	Vergärung (incl. Gasreinigung)	Sonstige (Umesterung, Methanol, Ethanol)
Biogener Stoffstrom	Saat, Anbau, Ernte bzw. Bereitstellung					gereinigt für Motoren	ungereinigt für Kessel			
Reststoffe und Abfälle										
Altholz										
Rest-, Schwachholz										
Stroh										
Grünschnitt										
Gülle, Ernterückstände										
org. Hausmüll										
Ind. Substrate										
Ind. fester Bioabfall										
Zoomasse										
Klärgas										
Deponiegas										
Energiepflanzen										
Pappeln, Kurzumtrieb										
Raps, Sonnenblumen										
Zuckerrüben										
Ganzpflanzen (Weizen, Mais, Triticale)										
Körner (Weizen)										
Gräser (Miscanthus)										

 = in der Datenanalyse einbezogen

Für diese Bioenergieträger wurden anschließend eine ebenfalls breite Palette von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme untersucht (vgl. folgende Tabelle), die zusätzlich um Pkw für biogene Kraftstoffe sowie Brennstoffzellen-Fahrzeuge erweitert wurde.

Tabelle 2 Umfang der Datenanalyse zur Nutzung der Bioenergieträger

INPUT	Unterschub bis 5 MW		Rost bzw. Kessel bei 0,1 – 50 MW				WSF > 5MW	Mit- verbr.	Moto- ren	GT	BZ
Bioenergieträger	nur Wärme	Stirling	nur Wärme	Stirling	ORC	Dampfmotor	DT	DT, GuD	Gas, Diesel, Zündstrahl	incl. Mikro	stationär, alle Typen
Fest											
Scheitholz											
Holzhackschnitzel											
Holzpellets											
Strohballen											
Strohpellets											
Holzhackschnitzel (belastet)											
Ganzpflanzen-Ballen											
Tiermehl, -fett											
Gasförmig											
Produktgas aus FB, WS (unbelastet)											
Produktgas aus FB, WS (belastet)											
Biogas											
Klärgas											
Deponiegas											
Flüssig											
Pflanzenöl											
PME											
Ethanol											
Methanol											

 = in der Datenanalyse einbezogen

3.2 Technologiedaten für die künftigen Szenarienjahre

Für die energetische Nutzung von Biomasse in Stationäranlagen stehen heute in Deutschland sowie in seinen Nachbarländern vielfältige Technologien zur Verfügung. Je nachdem, ob feste, flüssige oder gasförmige Stoffströme zum Einsatz kommen, ob diese belastet oder unbelastet sind, und je nach zu erfüllender Versorgungsaufgabe und Anlagenleistung stehen jeweils technische Lösungen zur Verfügung. Viele davon haben sich bereits am Markt etabliert, andere setzen sich aus technischen und/oder ökonomischen Gründen (noch) nicht beim Anwender in Deutschland durch oder besetzen standortspezifische Nischen.

Hinzu kommen diverse Verfahren, die sich derzeit im Forschungs- und Entwicklungs- oder bereits im Demonstrationsstadium befinden und mittelfristig zur Stoffstromnutzung in Deutschland beitragen könnten.

Vor dem Hintergrund dieser großen Vielfalt an Einzeltechnologien einerseits und dem Anspruch des Projekts der Politikberatung auf Bundesebene andererseits ist eine gezielte, transparente und nicht-diskriminierende Schwerpunktsetzung innerhalb der gegebenen Technologievielfalt notwendig.

Die Auswahl der in den Szenarien zu betrachtenden Technologien für Bioenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2030 erfolgte daher nach den in Tabelle 1 und 2 erläuterten Kriterien. Demnach werden zunächst Technologiegruppierungen für die Szenario-Stützzeitpunkte 2000 bis 2030 definiert und diesen Gruppen anschließend nach festgelegten Kriterien Einzeltechnologien zugeordnet.

Tabelle 3 Definition der verwendeten Begriffe „Technologie 2000“ und „Zukunftstechnologien (2010-2030)“

Technologie 2000	Zukunftstechnologien (2010-2030)
Gesamtheit aller Technologien zur stationären Energiegewinnung aus Biomasse, auf Basis derer in 2000 die Bioenergiegewinnung in Deutschland im Wesentlichen realisiert wurde; Keine Betrachtung von Nischenanwendungen	Gesamtheit aller Technologien zur stationären Energiegewinnung aus Biomasse, auf Basis derer (primär aus technologischer Sicht) in 2010 bis 2030 die Bioenergiegewinnung in Deutschland im Wesentlichen realisiert werden <i>könnte</i>. Dies unterstellt <u>nicht</u>, dass diese Technologien in 2010-2030 auch tatsächlich erfolgreich am Markt eingesetzt werden können, denn dafür ist primär ihre betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit im Energiesystem von Bedeutung. Dies ist in besonderem Maße von den gegebenen Alternativen, vom gewählten Brennstoffinput sowie von den (gestaltbaren) politischen Rahmenbedingungen abhängig, die an dieser Stelle bewusst offen gehalten werden. Technologien mit absehbar exzessiven Mehrkosten, die auch unter Berücksichtigung denkbarer Förderprogramme in 2010 nicht sinnvoll einsetzbar wären, bleiben dabei unbeachtet. Reine Nischenanwendungen werden nicht betrachtet

Tabelle 4 Kriterien für die Zuordnung von Einzeltechnologien in die Gruppen „Technologie 2000“ und „Zukunftstechnologien 2010 -2030“

Technologie 2000	Zukunftstechnologie 2010/ 2020/ 2030
• In 2000 bereits mehrfach im kommerziellem Betrieb in Deutschland (d. h. kommerzielle, marktverfügbare, genehmigungsfähige und zuverlässige Technologien); • kein Nischenprodukt mit hoher Abhängigkeit von besonderen lokalen Gegebenheiten	• Technologien 2000 (werden aus technologischer Sicht auch in 2010/ 2020/ 2030 zur Verfügung stehen), • Technologien, die in 2000 verfügbar, genehmigungsfähig und zuverlässig waren, in Deutschland aufgrund ökonomischer Rahmenbedingungen aber nur marginal bzw. nicht zum Einsatz kamen (ohne exzessive Mehrkosten aufgewiesen zu haben), • Technologien, die sich heute in Deutschland oder seinen Nachbarländern im Pilot- bzw. Demonstrationsstadium befinden und aus technologischer Sicht für eine umfangreiche Nutzung des biogenen Stoffstrompotenzials in Deutschland ab 2010 als geeignet erscheinen (d. h. absehbar kommerzialisierbar und genehmigungsfähig, absehbar ausreichende Anlagensicherheit bei Störfällen), • Technologien, die sich heute in Deutschland oder seinen Nachbarländern im Forschungsstadium befinden und aus technologischer Sicht für eine umfangreiche Nutzung des biogenen Stoffstrompotenzials in Deutschland ab 2020 als geeignet erscheinen (d.h. absehbar kommerzialisierbar und genehmigungsfähig, absehbar ausreichende Anlagensicherheit bei Störfällen), • keine Nischenprodukte (hohe Abhängigkeit von besonderen lokalen Gegebenheiten), • kein Kriterium: Wirtschaftlichkeit in 2010 im Detail (aber: exzessive Mehrkosten gegenüber absehbaren Alternativen werden nicht akzeptiert).

Die Anwendung der Kriterien, d.h. die Auswahl von Einzeltechnologien und deren Zuordnung zu den einzelnen Technologiegruppen erfolgte im Rahmen umfangreicher Diskussionen im Projektteam und nach Durchführung eines Expertenworkshops im Mai 2003.

Die Resultate dieses Prozesses werden im Folgenden vorgestellt, geordnet nach dem jeweils in die Einzeltechnologie eingehenden Stoffstrom. Die zugehörigen Technologiegruppen (2000, 2010, 2020 und 2030) werden in Klammern aufgeführt.

3.2.1 Unbelastetes bis gering belastetes Holz (Waldrest- und Schwachholz, Industrierestholz, Kurzumtriebs-Holz, Altholz A1/A2 Mix)

- Einsatz in autothermen, atmosphärischen Festbettvergäsern (ca. 1 MW Feuerungswärmeleistung) mit Gasreinigung und nachgeschaltetem Verbrennungsmotor oder Mikrogasturbine (Technologie 2010); Datenerhebung anhand der Referenzanlagen in Eckernförde und Wiener Neustadt (A).
- Einsatz in autothermen, atmosphärischen Wirbelschichtvergäsern (ca. 12 MW Feuerungswärmeleistung) ohne Gasreinigung mit nachgeschaltetem Heißgasbrenner und Kessel zur Wärme und/ oder Stromerzeugung (Technologie 2010) sowie mit Gasreinigung und Verbrennungsmotor (Technologie 2010); Datenerhebung anhand der Pilotanlagen von FhI UMSICHT in Oberhausen und ECN in Petten (NL).

- Einsatz in autothermen, druckaufgeladenen Wirbelschichtvergasern (ca. 80 MW Feuerungswärmeleistung) mit Gasreinigung und nachgeschaltetem GuD-Prozess als Monofeuerung (Technologie 2010) oder als Zufeuerung in Erdgas-GuD-Anlage (ab 2010); Datenerhebung anhand der Demonstrationsanlage in Värnamo (S).
- Einsatz in atmosphärischen Wirbelschicht-Dampfvergasern (ca. 8 MW Feuerungswärmeleistung) mit Gasaufbereitung zur Erzeugung eines H₂-reichen Synthesegases zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung mittels Schmelzkarbonat- oder Festoxid-Brennstoffzelle (Technologie 2020); Datenerhebung anhand der Referenzanlage in Güssing (A).
- Einsatz in kleinen bis mittleren Unterschub- oder Rostfeuerungen zur Wärmebereitstellung (ca. 10 kW bis 1.000 kW Feuerungswärmeleistung; Technologie 2000) oder zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung mit nachgeschalteten Kraftprozessen (ca. 0,5 bis 1 MW elektrische Leistung) wie Dampfmotor (Technologie 2000) oder ORC-Prozess (Technologie 2010).
- Einsatz in großen Wirbelschicht- oder Rostfeuerungsanlagen als Mono- oder Zufeuerungsbrennstoff mit nachfolgendem Dampfkraftprozess zur Strom- und ggf. Wärmebereitstellung (ca. 30 bis 70 MW Feuerungswärmeleistung Biomasse; Technologie 2000).
- Einsatz als Zusatzbrennstoff in bestehenden Kohlekraftwerken (700 MW elektrische Leistung, 10 % Zufeuerungsanteil; Technologie 2010); Datenerhebung am Beispiel von ausgeführten Anlagen insbesondere im europäischen Ausland.
- Einsatz in dezentralen Flash-Pyrolyse-Anlagen (ca. 40 MW Feuerungswärmeleistung) zur Herstellung von Pyrolyseöl-Kohlenstoff-Emulsionen mit einer anschließenden zentralen, druckaufgeladenen, sauerstoffgeblasenen Flugstromvergasung (ca. 400 MW Feuerungswärmeleistung) mit nachgeschalteter Gasreinigung und GuD-Prozess (Technologie 2010) zur Stromerzeugung oder Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Biokraftstoffen (Technologie 2020); Datenerhebung am Beispiel des vom Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Logistik-Konzeptes sowie ausgeführter Flugstromvergaser (CarboV, Prenflo).
- Bereitstellung als Pellets (siehe dort),
- Bereitstellung als Scheitholz (siehe dort).

3.2.2 Scheitholz aus dem Wald

- Einsatz in Kleinst- und Kleinfeuerungsanlagen zur Wärmebereitstellung (10 kW bis 50 kW Feuerungswärmeleistung; Technologie 2000). Tendenziell rückläufig aufgrund von Emissionsproblemen, Umstieg auf Pellets bzw. Nahwärme aus Biomasse. Neuanlagen nur in Nischen (Kamine).

3.2.3 Miscanthus-, Heu-, Stroh- und Getreideganzpflanzenballen

- Datenerhebung am Beispiel der Referenzanlage der Fa. Herlt in Mecklenburg.
- Einsatz in kleinen bis mittleren Rostfeuerungen zur Wärmebereitstellung (ca. 1 bis 5 MW Feuerungswärmeleistung; Technologie 2010) oder zur Strom- und Wärmebereitstellung mit nachgeschalteten Kraftprozessen (ca. 0,5 bis 1 MW elektrische Leistung) wie Dampfmotor (Technologie 2010) oder ORC-Prozess (Technologie 2010).

- Einsatz in großen Wirbelschicht- oder Rostfeuerungsanlagen als Mono- oder Zufeuerungsbrennstoff mit nachfolgendem Dampfkraftprozess zur Strom- und ggf. Wärmebereitstellung (ca. 30 bis 70 MW Feuerungswärmeleistung Biomasse; Technologie 2010). Datenerhebung am Beispiel von ausgeführten Anlagen in Dänemark und Österreich.
- Einsatz als Zusatzbrennstoff in bestehenden Kohlekraftwerken (700 MW elektrische Leistung, 10 % Zufeuerungsanteil; Technologie 2010); Datenerhebung am Beispiel von ausgeführten Anlagen insbesondere im europäischen Ausland.
- Einsatz in dezentralen Flash-Pyrolyse-Anlagen (ca. 40 MW Feuerungswärmeleistung) zur Herstellung von Pyrolyseöl-Kohlenstoff-Emulsionen mit einer anschließenden zentralen, druckaufgeladenen, sauerstoffgeblasenen Flugstromvergasung (ca. 400 MW Feuerungswärmeleistung) mit nachgeschalteter Gasreinigung und GuD-Prozess (Technologie 2010) zur Stromerzeugung oder Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Biokraftstoffen (Technologie 2020); Datenerhebung am Beispiel des vom Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Logistik-Konzeptes sowie ausgeführter Flugstromvergaser (CarboV, Prenflo).
- Verarbeitung zu Halmgutpellets (siehe Einsatz in kleinen Ballenvergasungsanlagen (ca. 100 bis 300 kW Feuerungswärmeleistung) mit integriertem Heißgasbrenner und Kessel zur Wärmebereitstellung (Technologie 2010); dort)

3.2.4 Holz- und Halmgutpellets

- Einsatz in Kleinstfeuerungsanlagen zur Wärmebereitstellung (10 bis 50 kW Feuerungswärmeleistung; mit Holzpellets Technologie 2000, mit Halmgutpellets Technologie 2010) oder zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung mit nachgeschaltetem Stirlingmotor (nur Holzpellets, Technologie 2010).

3.2.5 Grasschnitt

- Einsatz als Ko-Substrat in Biogasanlagen (300 bis 4.000 m³ Fermentervolumen; Technologie 2000).
- Trocknung auf der Weide und Einsatz als Heuballen (siehe dort).

3.2.6 Weizenspreu

- Einsatz in autothermen, atmosphärischen Wirbelschichtvergasern (ca. 12 MW Feuerungswärmeleistung) ohne Gasreinigung mit nachgeschaltetem Heißgasbrenner und Kessel zur Wärme und/ oder Stromerzeugung (Technologie 2010) sowie mit Gasreinigung und Verbrennungsmotor (Technologie 2010); Datenerhebung anhand der Pilotanlagen von FhI UMSICHT in Oberhausen und ECN in Petten (NL).
- Einsatz in autothermen, druckaufgeladenen Wirbelschichtvergasern (ca. 80 MW Feuerungswärmeleistung) mit Gasreinigung und nachgeschaltetem GuD-Prozess als Monofeuerung (Technologie 2010) oder als Zufeuerung in Erdgas-GuD-Anlage (ab 2010); Datenerhebung anhand der Demonstrationsanlage in Värnamo (S).

- Einsatz in atmosphärischen Wirbelschicht-Dampfvergasern (ca. 8 MW Feuerungswärmeleistung) mit Gasaufbereitung zur Erzeugung eines wasserstoffreichen Synthesegases zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung mittels Schmelzkarbonat- oder Festkeramik-Brennstoffzelle (Technologie 2020); Datenerhebung anhand der Referenzanlage in Güssing (A)

3.2.7 Belastetes Holz (Altholz A1-A4 Mix), organische Hausmüllanteile und Klärschlamm

- Einsatz in autothermen, atmosphärischen Wirbelschichtvergasern (ca. 12 MW Feuerungswärmeleistung) ohne Gasreinigung mit nachgeschaltetem Heißgasbrenner und Kessel zur Wärme und/ oder Stromerzeugung (Technologie 2010); Datenerhebung anhand der Pilotanlagen von FhI UMSICHT in Oberhausen und ECN in Petten (NL).
- Einsatz in dezentralen Flash-Pyrolyse-Anlagen (ca. 40 MW Feuerungswärmeleistung) zur Herstellung von Pyrolyseöl-Kohlenstoff-Emulsionen mit einer anschließenden zentralen, druckaufgeladenen, sauerstoffgeblasenen Flugstromvergasung (ca. 400 MW Feuerungswärmeleistung) mit nachgeschalteter Gasreinigung und GuD-Prozess (Technologie 2010) zur Stromerzeugung oder Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Biokraftstoffen (Technologie 2020); Datenerhebung am Beispiel des vom Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Logistik-Konzeptes sowie ausgeführter Flugstromvergaser (CarboV, Prenflo).
- Einsatz in großen Wirbelschicht- oder Rostfeuerungsanlagen als Mono- oder Zufeuerungsbrennstoff mit nachfolgendem Dampfkraftprozess zur Strom- und ggf. Wärmebereitstellung (ca. 30 bis 70 MW Feuerungswärmeleistung Biomasse; Technologie 2000).
- Einsatz als Zusatzbrennstoff in bestehenden Kohlekraftwerken (700 MW elektrische Leistung, 10 % Zufeuerungsanteil; Technologie 2000); Datenerhebung am Beispiel von ausgeführten Anlagen insbesondere im europäischen Ausland.

3.2.8 Fleischbrei (alle Kategorien)

- Verarbeitung zu Tiermehl und Tierfett in einer TBA (Technologie 2000).
- Sonderfall Kategorien 2 und 3 (Low-Risk-Material): Einsatz als Ko-Substrat in Vergärungsanlagen (1500 m³ Fermentervolumen) zur Erzeugung von Biogas (Technologie 2010).

3.2.9 Tiermehl und Tierfett (alle Kategorien)

- Nur Tiermehl: Einsatz als Zusatzbrennstoff in Prozessfeuerung der Zementindustrie (ca. 1.000 MW Feuerungswärmeleistung, Zufeuerungsanteil 20%, Technologie 2000).
- Nur Tierfett: Verarbeitung zu TME (Technologie 2010).
- Entsorgung in einer MVA/SVA (Technologie 2000).

3.2.10 Gülle, Silagen, organische Hausmüllanteile, industrielle Substrate

- Einsatz als Substrat (Gülle) bzw. Ko-Substrat in Vergärungsanlagen (300 bis 4.000 m³ Fermentervolumen) zur Erzeugung von Biogas (Technologie 2000).

3.2.11 Biogas aus Gülle und Abfällen, Klärgas und Deponiegas

- Einsatz in Zündstrahl- und Gasmotoren (25 bis 1.000 kW elektrische Leistung; Technologie 2000), in Mikrogasturbinen (30 bis 200 kW elektrische Leistung; Technologie 2010) und Schmelzcarbonat- oder Festoxid-Brennstoffzellen (ca. 300 kW elektrische Leistung; Technologie 2020, gilt nicht für Deponiegas).
- Einspeisung ins öffentliche Erdgasnetz (300 bis 4.000 m³/h Gasleistung; Technologie 2010, gilt nicht für Deponiegas).

3.3 Kompatibilität mit anderen Zukunftstechnologien

Ausgehend von den aktuell verbreiteten Nutzungsformen von Biomasse in Deutschland und den primären Zielsetzungen dieses Vorhabens zielen alle vorgenannten Technologien auf die stationäre energetische Nutzung von biogenen Stoffströmen ab. Dieser Ansatz ist zur Beschreibung des Technologieeinsatzes in den Jahren 2000 (rückblickend) und 2010 (kurzfristig vorausschauend) relativ robust.

Mit Blick auf die Zeitpunkte 2020 und 2030 drängt sich die Frage der Belastbarkeit und Vollständigkeit auf. Aus heutiger Sicht erscheint es fraglich, ob mittel- bis langfristig möglicherweise ganz andere Formen der Biomassenutzung, z. B. der Einsatz in Bioraffinerien zwecks kombinierter stofflich-energetischer Biomassenutzung oder ganz neue Energiesystemstrukturen wie z. B. die Wasserstoffwirtschaft, die Rahmenbedingungen derart ändern könnten, dass sich obige Auswahl längerfristig als fehlerhaft oder zumindest als unvollständig herausstellen könnte.

Diesen Fragen wird im Folgenden differenziert nachgegangen.

3.3.1 Bioraffinerie

Bei der Bioraffinerie handelt es sich um komplexe (bis voll integrierte) Systeme umwelt- und ressourcenschonender Technologien zur umfassenden stofflichen und energetischen Nutzung bzw. Verwertung von Biomassen.

Denkbare verfahrenstechnische Ansätze sind z. B. die Proteinextraktion aus Luzerne, die Verarbeitung von Zuckerrohr zu Glycerin, die Verarbeitung von Korn und Stroh in einer Nassmühle zu Getreidestärke und die anteilige Umwandlung von holzartigen Biomassen in Kleb- oder Schmierstoffe. Diese und andere Verfahren befinden sich derzeit im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Es ist derzeit nicht absehbar, welche Bioraffineriekonzepte in den kommenden 3 Jahrzehnten aus technologischer Sicht zur Verfügung stehen werden.

Dies allein ist ein wichtiger Grund dafür, dass Bioraffinerien in diesem Vorhaben nicht belastbar auf detaillierter Technologieebene betrachtet werden können. Ein weiterer ist derjenige, dass die in Bioraffinerien primär stattfindende stoffliche Biomassenutzung den energetischen Fokus dieser Untersuchung aufweichen und damit erhebliche methodische Probleme, nämlich die Bewertung der relativen Vorzüglichkeit von stofflicher und energetischer Biomassenutzung, verursachen würde.

3.3.2 Biokraftstoffe

Die politischen Zielsetzungen der EU-Kommission für erneuerbare Kraftstoffe sind ehrgeizig: Bis zum Jahr 2010 sollen 5,75 % des Kraftstoffs im Bereich Transport in der EU aus regenerativen Quellen bereitgestellt werden, um fossile Kraftstoffe sukzessive zu ersetzen. Für 2020 und 2030 sind weitere Steigerungen angedacht.

Stand der Technik sind die Herstellung, Aufbereitung und Nutzung der biogenen Kraftstoffe naturbelassenes Pflanzenöl, Biodiesel, Altspeiseöle und –fette, Ethanol aus zucker- und stärkehaltiger Biomasse und der Kraftstoffzusatz ETBE.

In der Entwicklung befinden sich Designerkraftstoffe (z.B. "Sunfuel", allgemein: *Biomass-to-Liquids* = *BtL*) aus Synthesegasen sowie Bio-Methanol zur Produktion von Dieseleratzkraftstoffen (zusammen mit Pflanzenölen) und zur Herstellung von Oktanboostern (MTBE) und Bio-Ethanol auch aus zellulosehaltigen Pflanzen und Kraftstoffe aus Biogas.

Bis auf den verbreiteten, aber nur begrenzt zur Verfügung stehenden Biodiesel und vereinzelte Nischenanwendungen von Pflanzenölen und Altspeiseölen/-fetten in mobilen und stationären Motoren existieren in Deutschland derzeit praktisch keine Lösungsansätze für eine "nachhaltige Mobilität" und eine Diversifizierung auf dem Kraftstoffmarkt. Welches der genannten Verfahren zukünftig zur Deckung des Kraftstoffbedarfs in Deutschland beitragen wird, ist daher noch unklar. Im Moment wird die BtL-Herstellung mittels Fischer-Tropsch-Synthese sehr öffentlichkeitswirksam diskutiert²⁴. Zukünftig könnten es andere Optionen sein. Ebenfalls ist noch unbekannt, welche Rolle zukünftig der Import von biogenen Kraftstoffen zur Deckung der EU-Zielvorgaben spielen wird (ReFuelNet 2003).

Nicht nur die Zukunft biogener Kraftstoffe im Energiesystem Deutschlands ist derzeit noch unklar, auch ihre Verwendung im Stationärbereich ist aus heutiger Sicht äußerst unsicher. Da alle heute bekannten Verfahren zur Herstellung biogener Kraftstoffe vergleichsweise kosten- und energieaufwändig sind, wird der Einsatz von *Biokraftstoffen in Stationäranlagen* auf absehbare Zeit gegenüber der direkten Nutzung unbehandelter Biomassen in Stationäranlagen ökonomisch (und häufig auch ökologisch) unterlegen sein und daher nur – wenn überhaupt – eine Nischenrolle spielen. Die stationäre Nutzung von Biokraftstoffen wird hier daher bei der Technologieauswahl *nicht* berücksichtigt.

Um aber dennoch der aktuellen Diskussion um Biokraftstoffe – allen voran BtL – Rechnung zu tragen und den Wettbewerb der verschiedenen Bioenergieanlagen um biogene Stoffströme abbilden zu können, wird hier beispielhaft und mit reduzierter Datentiefe die Diesel- bzw. Benzinherstellung mittels Fischer-Tropsch-Synthese in den Technologiebestand mit einbezogen.

²⁴ Vgl. Hamelinck et al. (2002); Boerrigter/den Uil/Cali 2002; Choren (2003)

3.3.3 Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff gilt als einer der besonders zukunftssträchtigen Energieträger, da er regenerativ hergestellt werden kann und sich hervorragend zum Einsatz in modernen Technologien, wie Brennstoffzellen, eignet. Die Nachteile von Wasserstoff sind jedoch die speziellen Infrastrukturerfordernisse für Speicherung und Transport und die hohen, damit verbundenen Kosten. Hinzu kommt, dass der Klimaschutzbeitrag bei der direkten Verwertung erneuerbarer Energien im Strombereich unter den in Deutschland kurz- und mittelfristig vorherrschenden Rahmenbedingungen deutlich höher ist als bei einer Verwendung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Energiezwecken²⁵.

Die Szenarioanalysen des Umweltbundesamtes und der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“, die beide auch eine Grundlage zur vorliegenden Untersuchung der stationären Biomassenutzung darstellen, zeigen vor diesem Hintergrund übereinstimmend, dass Wasserstoff erst ab Mitte dieses Jahrhunderts zunehmend an Bedeutung gewinnen wird. In dem hier betrachteten Untersuchungszeitraum bis 2030 erscheint die Realisierung einer weitgehenden Wasserstoffwirtschaft eher unrealistisch.

Damit wird deutlich, dass die erfolgte Auswahl der Bioenergietechnologien bis 2030 nicht vor dem Hintergrund einer potenziell vorherrschenden Wasserstoffwirtschaft betrachtet werden darf. Eine notwendige Folge hiervon ist, dass die EU-Vorgaben zum Einsatz regenerativer Kraftstoffe im Verkehrsbereich im Untersuchungszeitraum nicht durch Wasserstoff erreicht werden können, sondern primär durch eigenproduzierte oder importierte Biokraftstoffe. Dies ist bei der Strompotenzialnutzung in den Szenarien zu berücksichtigen.

3.3.4 Stand der Technik vs. Technologie-Erwartung

Um im Rahmen des Projektes Szenarioberechnungen für die Jahre 2000 (rückblickend), 2010, 2020 und 2030 durchführen zu können, müssen für alle betrachteten Bioenergietechnologien als Szenarioinput die technischen und ökonomischen Kenndaten aller in den jeweiligen Zeitpunkten verfügbaren Technologien bekannt sein.

Dazu müssen für alle Einzeltechnologien die Kosten- und Effizienzentwicklungen zwischen 2000 und 2030 in Schritten von 10 Jahren möglichst realistisch abgeschätzt und quantifiziert werden. Naturgemäß kann diese Abschätzung nicht exakt und genau sein, sie sollte aber transparent und nach einer einheitlichen, logischen Systematik erfolgen.

3.3.5 Datenfortschreibung für die Technologien

Kosten

Die Investitionskosten der betrachteten Bioenergietechnologien sind eine bedeutsame Größe für die Szenariorechnungen. Ihre zukünftig zu erwartende Entwicklung wird einheitlich mit Hilfe der *Lernkurvenmethodik* berechnet (vgl. Kapitel 3.4).

²⁵ vgl. ReFuelNet (2003); WI/DLR (2002); Ramesohl/Fischedick 2003 sowie DLR/IFEU/WI (2004)

Die Entwicklung der Kosten für Personal, Entsorgung und sonstige Betriebsmittel wird – analog zum betrachteten Referenzszenario eines bundesdeutschen Energiesystems mit moderater Bioenergienutzung - inflationsbereinigt konstant gehalten. Wartungs- und Reparaturkosten werden proportional zu den Investitionskosten abgeschätzt und reduzieren sich damit inflationsbereinigt aufgrund von Lern- und Optimierungsprozessen analog zu den Investitionskosten. Damit wird eine methodische Gleichbehandlung aller miteinander verglichenen Technologien auf Basis fossiler und biogener Energieträger sichergestellt.

Effizienz

Es wird für alle betrachteten Technologien eine kontinuierliche evolutionäre Weiterentwicklung und Verbesserung von elektrischen Wirkungsgraden (Kraftwerke, KWK-Anlagen etc.) und thermischen Wirkungsgraden (Heizungen, Heizwerke etc.) angenommen. Damit werden u.a. regelungstechnische und werkstoffliche Optimierungen berücksichtigt. Thermodynamische Grenzen werden bis 2030 weder erreicht noch überschritten. Die elektrischen Eigenbedarfe von Heizungen und Heizwerken sowie von Vergasungsanlagen und Gaseinspeisungsstationen werden ebenfalls betrachtet und als negative elektrische Effizienzen ausgewiesen.

Emissionen

Die Fortschreibung der direkten Luftschadstoffemissionen aus Bioenergieanlagen – dargestellt als Emissionsfaktoren pro Einheit Prozessoutput (z.B. 1 kWh Strom, 1 kWh Produktgas) – ist nicht primär von Lernkurven-Effekten geprägt, wie die Kostenentwicklung, sondern vielmehr davon, welche gesetzlichen Grenzwerte zukünftig zum Tragen kommen werden. Dieser Faktor ist äußerst schwer quantifizierbar.

Vor diesem Hintergrund wird die folgende, für alle Technologien einheitliche und untereinander nicht zu Verzerrungen führende Fortschreibung der Emissionsfaktoren unterstellt:

Typische, robust und technologieübergreifend anzunehmende Änderungen von Schadstoffemissionen lassen sich aus Wirkungsgradsteigerungen ableiten. Je effizienter eine Technologie ist, desto weniger Brennstoff muss für die bereitgestellte Endenergie verbrannt werden und desto weniger Freisetzungen an brennstoffbedingten Emissionen (Staub, SO₂, HCl, HF) treten auf. Dieser Effekt wird hier einheitlich bei allen Technologien unterstellt.

Im Gegensatz dazu werden die primär technologiespezifischen Emissionen (CO, NO_x, NMVOC) über die Zeitdauer von 2000 bis 2030 einheitlich konstant gehalten. Diese grundsätzlichen, prinzipbedingten Unterschiede der Technologien untereinander würden auch nach zukünftigen Gesetzesänderungen qualitativ erhalten bleiben.

Eine gewichtige Ausnahme von dieser Regel stellen die CO-, Staub- und NO_x-Emissionen aus dezentralen Festbrennstofffeuerungen zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung dar, die sich heute häufig noch auf einem vergleichsweise hohen Emissionsniveau befinden. Hier wird einheitlich im Rahmen einer Parametervariation davon ausgegangen, dass sich die output-bezogenen CO-, Staub- und NO_x-Emissionsfaktoren dieser Anlagen zwischen 2000 und 2010 um einheitlich 10 %, bis 2020 um 15 % und bis 2030 um 20 % reduzieren. Bei Strohvergaseranlagen mit diskontinuierlicher Ofenbeschickung wird sogar von 10, 20 und 30 %-igen Emissionsreduktionen im gleichen Zeitraum gerechnet.

3.4 Lernkurven als Bewertungshilfe

Die Lernkurvenmethodik ist ein anerkanntes Werkzeug²⁶, um - ausgehend von den bekannten Investitionskosten einer Technologie zu einem Startzeitpunkt t_0 - begründet abzuschätzen, wie sich die Investitionskosten dieser Technologie in der Zukunft, d. h. zu einem späteren Zeitpunkt t_i ohne Berücksichtigung der Inflation entwickeln werden.

Den Lernkurven liegt dabei die Erfahrung aus einer Vielzahl von bereits abgeschlossenen Technologieentwicklungen zugrunde, dass eine Technologie mit zunehmender Verbreitung und steigendem Reifegrad i.d.R. stetig sinkende Investitionskosten aufweist (*ex-post*-Analyse; ohne Inflation). Diese grundsätzliche Beobachtung ist weitgehend unabhängig vom betrachteten Produkt. Aus dieser Erfahrung heraus bietet es sich an, für die zukünftige Entwicklung heute „junger“ Bioenergie-technologien analoge, historisch begründete Entwicklungstrends zu unterstellen (*ex-ante*-Analyse). Genau dies geschieht bei der Anwendung der Lernkurvenmethodik.

Diese Vorgehensweise ist bewährt und die einzig bekannte Möglichkeit zur transparenten und methodisch einheitlich, fairen Beschreibung von Kostenentwicklungen unterschiedlicher Technologien. Sie darf aber sicherlich nicht als Prognosetool zur exakten Kalkulation zukünftiger Kosten missverstanden werden. Wie die nachfolgenden Erläuterungen der Lernkurvenmethodik deutlich machen, berücksichtigen sie nicht bzw. nur unzureichend, dass politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen z.T. massiven und sprunghaften Einfluss auf Kosten und Marktdurchdringung einzelner Technologien haben können (Bsp. Hygienisierung, Verschärfung Emissionsgrenzwerte etc.). Diese Restriktionen können mit dem Lernkurvenmodell nicht abgebildet werden und müssen daher bei der Interpretation der Ergebnisse unbedingt im Auge behalten werden.

Allgemein formuliert beschreiben Lernkurven den Kostenverlauf eines Produktes ausgehend vom ersten bis zum n-ten Exemplar unter Berücksichtigung aller technologiebedingten Kosteneinflüsse. Hierbei wird ausgegangen von einer fixen relativen Kostendegression (Degressionsfaktor f) eines Produktes bei jeder Verdopplung der kumulierten Produktanzahl (Gleichung 2.1 und 2.2).

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-b} \quad (2.1)$$

mit C_1 als die spezifischen Investitionskosten des betrachteten Produktes zum Ausgangszeitpunkt t_0 (z. B. Jahr 2000), C_2 die spezifischen Kosten des Produktes zum Zeitpunkt t_i (z.B. Jahr 2010, 2020 oder 2030), P_1 als die kumulierte Produktion zum Ausgangszeitpunkt t_0 (z.B. kumulierte Anlagenzahl, kumulierte installierte Leistung) und P_2 als kumulierte Produktion zum Zeitpunkt t_2 .

$$-b = \frac{\log f}{\log 2} \quad (2.2)$$

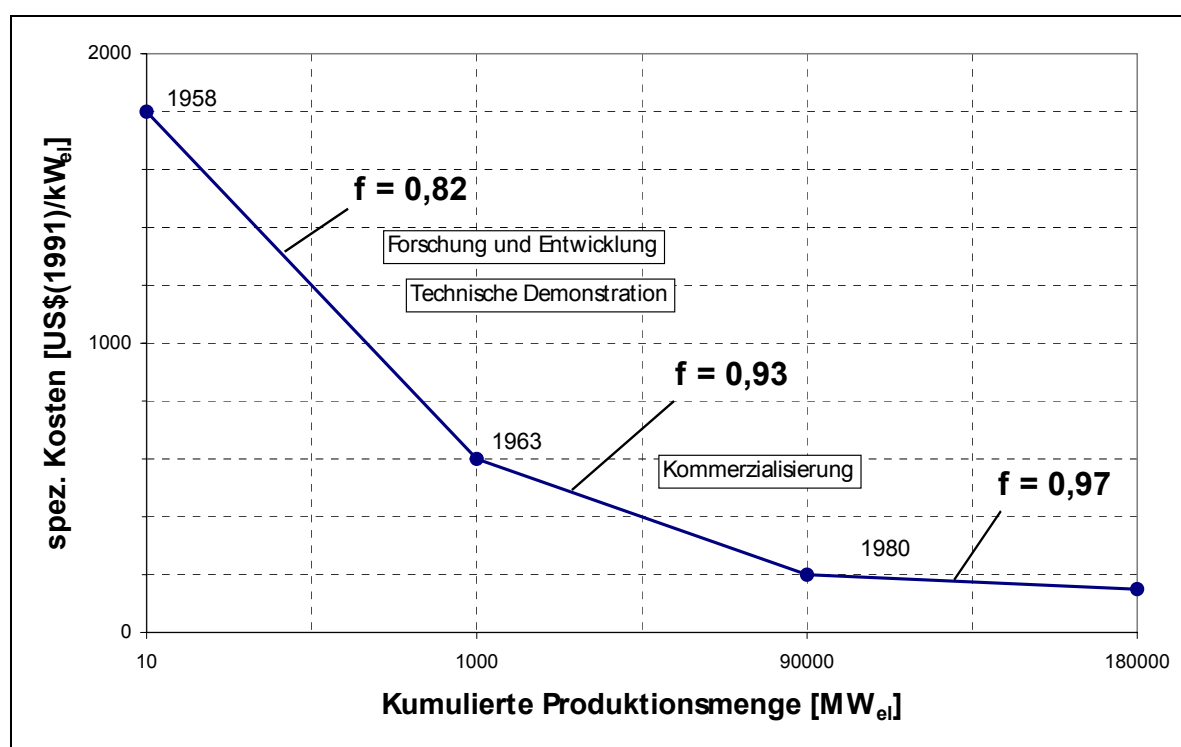
f ist der Degressionsfaktor

²⁶ vgl. Enquete (2003); McMullan/Williams/McCahey 2001; Sander (2001); IEA (2000 + 2003)

Die Erfahrungen aus vergangenen Technologieentwicklungen haben gezeigt, dass Technologien in ihren unterschiedlichen Entwicklungsphasen auch verschiedene Degressionsfaktoren ausweisen.

Ein Beispiel hierfür zeigt die in Bild 14 aufgetragene Kostenreduzierung von Gasturbinen. Die historische Lernkurve der Gasturbine beginnt mit einer 18 %-igen Kostenreduktion in der Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsphase ($f = 0,82$), reduziert sich auf rund 7 % ($f = 0,93$) in der Kommerzialisierungsphase und endet bei 3 % ($f = 0,97$) im Rahmen der nachfolgenden Marktdurchdringung. Wesentliche Gründe für diese Kostenreduktionen sind Prozessoptimierungen, der Einsatz verbesserter Materialien, Größeneffekte (Economies-of-Scale) und Rationalisierungsmaßnahmen bei der (Massen-) Produktion.

Bild 14 Präkommerzielle Kostenreduktionskurve von Gasturbinen in verschiedenen Entwicklungsphasen

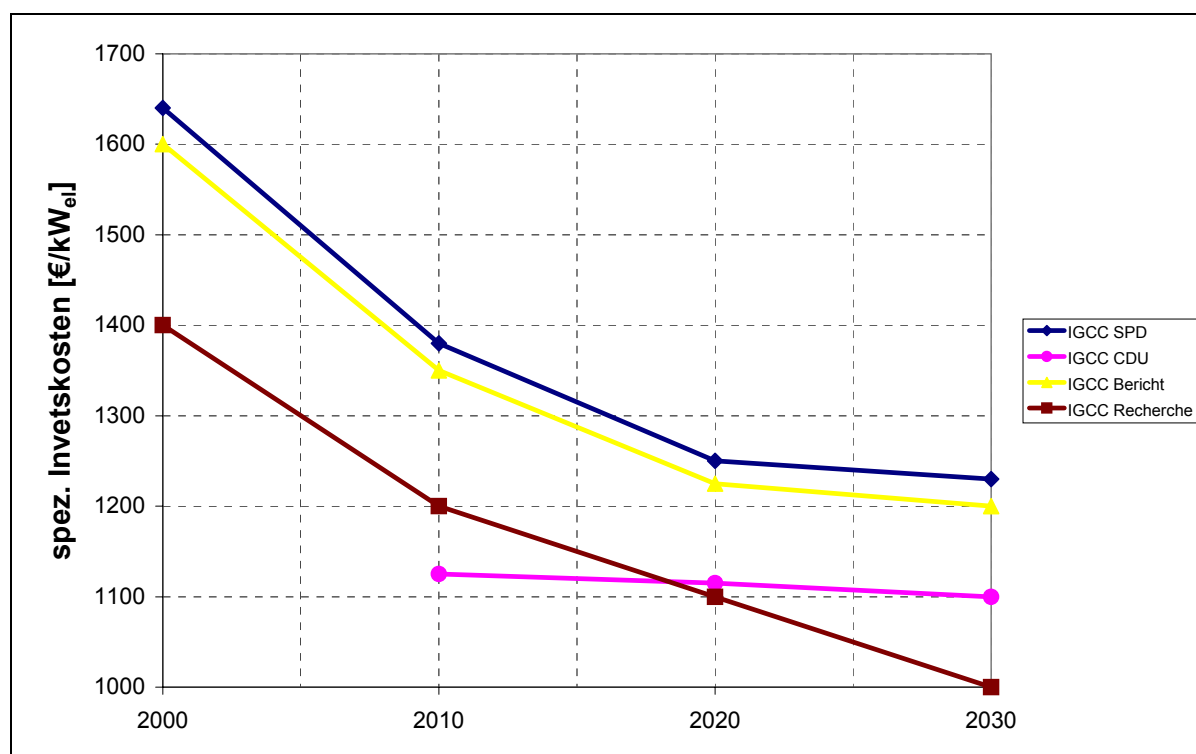


Quelle: O'Keefe/Sturm (2002)

Ein Beispiel für eine in die Zukunft gerichtete Investitionskostenentwicklung einer Technologie ist in Bild 15 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die mögliche zukünftige Investitionskostenentwicklung der Kohlevergasung mit nachgeschaltetem Gas- und Dampfturbinenprozess (IGCC = integrated gasification combined-cycle). Die hier dargestellten Kostenannahmen stammen aus dem Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ und sind zunächst nicht mit Hilfe der Lernkurvenmethodik kalkuliert worden, sondern das Ergebnis von Expertenbefragungen.

Diese Vorgehensweise zur Abschätzung zukünftiger Kosten ist grundsätzlich ebenso korrekt oder falsch wie die Lernkurvenmethode, denn niemand kann „wirklich“ in die Zukunft schauen. Allerdings sind bei konsequenter Anwendung der (historisch begründeten) Lernkurvenmethode mit höherer Wahrscheinlichkeit faire Bedingungen für unterschiedliche, unter Zukunftsbedingungen miteinander zu vergleichenden Technologien erzielbar.

Bild 15 Annahme der Kostendegression von IGCC-Anlagen



Quelle: eigene Darstellung nach Enquete (2002; 2003); PROGNOSES/IER/WI (2001); McMullan/Williams/McCahey 2001; O'Keefe/Strum (2002); Brun/Jones (2001)

Die Annahmen der Enquete-Kommission zur IGCC-Technologie können rückwirkend auch in Lernkurven übersetzt werden. Da die Kosten der IGCC-Technologie zu allen betrachteten Zeitpunkten „bekannt“ sind, können die in den dazwischen liegenden Dekaden (2000-2010, 2010-2020, 2020-2030) geltenden Degressionsfaktoren nach Annahme von (realistischen) kumulierten Produktionen zu den Zeitpunkten 2000, 2010, 2020 und 2030 rückwirkend berechnet werden (vgl. nachfolgende Tabelle).

Aus dieser Kalkulation berechnen sich Degressionsfaktoren von 78 % (F&E von 2000 bis 2010), 90 % (Kommerzialisierung von 2010 bis 2020) und 98 % (weitere Entwicklung ab 2020), die durch die historische Erfahrung mit der Entwicklung von Gasturbinen (vgl. dortige Degressionsfaktoren) sehr gut bestätigt werden.

Tabelle 5 Berechnete Kostendegression für IGCC-Technologien

	Parameter	Zeitbezug
spezifische Kosten zum Zeitpunkt t_0	$C_0 = 1600 \text{ €/kWel}^*$	2000
spezifische Kosten zum Zeitpunkt t_i	$C_1 = 1350 \text{ €/kWel}^*$	2010
	$C_2 = 1225 \text{ €/kWel}^*$	2020
	$C_3 = 1200 \text{ €/kWel}^*$	2030
kumulierte Produktion zum Zeitpunkt t_0	$P_0 = 5^{**}$	2000
kumulierte Produktion zum Zeitpunkt t_i	$P_1 = 8$	2010
	$P_2 = 15$	2020
	$P_3 = 35$	2030
Degressionsfaktoren	$F_1 = 0,78$	2000-2010
	$F_2 = 0,90$	2010-2020
	$F_3 = 0,98$	2020-2030

*= Daten der spezifischen Kosten aus dem Enquete-Schlussbericht „Nachhaltige Energieversorgung“ S.451, Steinkohle-IGCC 650 MWel, 30 Jahre Nutzungsdauer

**= Annahme, dass zum Startzeitpunkt (2000) die 5 o.g. kohlegefeuerten IGCC-Anlagen in Betrieb waren.

3.5 Lernkurven für ausgewählte Energietechnologien

Im Folgenden wird die Lernkurvenmethodik auf alle in diesem Projekt behandelten stationären Biomassetechnologien angewendet. Als wesentliche Inputgrößen für diese Kalkulation werden die spezifischen Investitionskosten zum Ausgangszeitpunkt (i.d.R. das Jahr 2000), die kumulierte Produktion in 2000 sowie in den Folgezeitpunkten 2010, 2020 und 2030 und schließlich dem jeweiligen technologischen Reifegrad angemessene Degressionsfaktoren unterstellt.

Um nicht für jede Einzeltechnologie in Verbindung mit jedem betrachteten Stoffstrom eine eigene Lernkurve aufstellen zu müssen, werden sie nach Möglichkeit zu abstrahierten „Stellvertretern“ zusammengefasst (Tabelle 6). Hierbei wird unterstellt, dass alle Technologien innerhalb eines solchen Stellvertreters bis 2030 eine gleiche *relative* Entwicklung von Kosten und Effizienz erleben werden. Bei der anschließenden detaillierten Datenerhebung für jede Einzeltechnologie werden selbstverständlich die absoluten Unterschiede in Kosten und Effizienz (z. B. infolge von Leistungs- oder Brennstoffunterschieden) berücksichtigt.

Tabelle 6 Erläuterungen zu den zusammengefassten Stellvertreter-Technologien

Stellvertreter	Einzeltechnologien
Pelletfeuerung 10...50 kW (Pellets)	Kesselanlage mit 10 bis 50 kW Feuerungswärmeleistung zur ausschließlichen Wärmeerzeugung oder zum Antrieb von Stirling-Motoren (nur bei Holzpellets); Brennstoff: Holzpellets, Strohpellets
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz, Stroh)	Kesselanlage mit 10 bis 1.000 kW Feuerungswärmeleistung zur ausschließlichen Wärmeerzeugung; Brennstoff: unbelastetes Holz, Stroh
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	Kesselanlagen mit 50 bis 5.000 kW Feuerungswärmeleistung zur ausschließlichen Wärmeerzeugung oder zum Antrieb von ORC/Kalina-Kraftprozessen; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Stroh
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampfmotor, DT)	Kesselanlage mit nachgeschaltetem Dampfkraftprozess (Dampfmotor, Dampfturbine) zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung; elektrische Nennleistung 0,5...5 MW; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz, Stroh
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	Kesselanlagen mit nachgeschaltetem Dampfkraftprozess (Dampfturbine) zur ausschließlichen Stromerzeugung oder zur ungekoppelten oder gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz, Stroh, Zoomasse
Vergärungsanlagen 300...4000 m ³	Vergärungsanlagen inklusive Gasreinigung (Entschwefelung) zur Erzeugung eines motorisch nutzbaren Biogases; Fermentervolumen 300 bis 4.000 m ³ ; Input: Gülle, industrielle-Kosubstrate
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	Hubkolben-Verbrennungsmotoren unterschiedlicher Technologie (Magermotor, Lambda-1-Motor, Zündstrahlmotor) zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung aus Brenngasen ohne Gasreinigung; elektrische Leistung 100 bis 1.000 kW; Brennstoffe: Biogas, Klärgas, Deponiegas, Produktgas aus der atmosphärischen Wirbelschichtvergasung
5...200 MW Zuführung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	Einrichtungen zur Zwischenlagerung, Aufbereitung und Zuführung fester Biomassen in bestehende Kohle- oder Erdgas-(Heiz)kraftwerksanlagen; Feuerungswärmeleistung der Zuführung 5 bis 200 MW; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz, Stroh, Zoomasse; Produktgas aus der atmosphärischen oder druckaufgeladenen Wirbelschicht-Vergasung ohne Gasreinigung
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	Organic-Rankine- bzw. Kalina-Kraftprozess zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung mit vorgeschaltetem Kessel; elektrische Leistung 300 bis 1.200 kW;
Vergasung 12 MW ohne Gasreinigung (Holz, Altholz)	Atmosphärische, luftgeblasene Zirkulierende-Wirbelschicht-Vergasung ohne Gasreinigung für nachfolgende Heißgasnutzung in Kesseln, Öfen etc.; 10 bis 20 MW Feuerungswärmeleistung; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz, Tiermehl
Vergasung 1...80 MW mit Gasreinigung (Holz, Altholz)	Vergasungsanlagen (atmosphärisches, luftgeblasenes Festbett; atmosphärische, luftgeblasene Zirkulierende Wirbelschicht, druckaufgeladene, luftgeblasene Zirkulierende Wirbelschicht; atmosphärische, dampfgeblasene Zirkulierende Wirbelschicht) mit Gasreinigung für nachfolgende Gasnutzung in Kraftmaschinen; 1 bis 80 MW Feuerungswärmeleistung; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz (nur A1/A2), Wei-

	zenspreu
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	Druckaufgeladene, sauerstoffgeblasene Flugstromvergasung mit Gasreinigung für nachfolgende Gasnutzung in GuD-Prozess oder zur Kraftstoffherstellung mittels Fischer-Tropsch-Synthese; Brennstoffe: Pyrolyseöl-/ Koksgemische aus Flash-Pyrolyse
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	Gas- und Dampfturbinenprozess mit geringer elektrischer Leistung (etwa 30 MW) zur ausschließlichen Stromerzeugung; Brennstoff: Produktgas aus der druckaufgeladenen, luftgeblasenen Zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	Gas- und Dampfturbinenprozess mit mittlerer elektrischer Leistung (etwa 200 MW) zur ausschließlichen Stromerzeugung; Brennstoff: Produktgas aus der druckaufgeladenen, sauerstoffgeblasenen Flugstromvergasung
Mikrogasturbine 30...200 kW (Sondergase)	Mikrogasturbine mit 30 bis 200 kW elektrischer Leistung zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung; Brennstoffe: Biogas, Klärgas, Deponiegas, Produktgas aus der Festbettvergasung
Stirlingmotor 10...50 kW (für Holzpellets)	Stirling-Motor zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung mit vorgeschaltetem Pellet-Kessel (nur Holzpellets); 10 bis 50 kW elektrische Leistung
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	Einrichtung zur Kompression (16 bar) und Reinigung (Druck-Wechsel-Adsorption) von Biogas zwecks Einspeisung in das Netz der öffentlichen Versorgung; Durchsatz: 100 bis 600 m³/h
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung	MCFC bzw. SOFC Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Anlagen ohne Gasreinigung zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung aus gereinigten Sondergasen; 250 bis 300 kW elektrische Leistung; Brennstoffe: Biogas, Klärgas, Deponiegas, Produktgas aus der atmosphärischen, dampfgeblasenen Zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung
Flash-Pyrolyse 40 MW (vor Flugstrom-Vergasung)	Flash-Pyrolysator zur Erzeugung von Pyrolyseöl/ Koks-Emulsionen aus Biomasse; 40 MW Feuerungswärmeleistung; Brennstoffe: unbelastetes Holz, Altholz, Stroh, Zoomasse
Fischer-Tropsch-Synthese (nach Flugstromvergasung)	Anlage zur Herstellung biogener Kraftstoffe mittels Fischer-Tropsch-Synthese aus Synthesegas

Als Beispiel sei hier der Einsatz von Halmgutballen in Heizkraftwerken erläutert. Die Kostenentwicklung von Heizkraftwerken wird nachfolgend zunächst nur für den Betrieb mit Holz kalkuliert. Da Heizkraftwerke auf der Basis von Stroh eine Vielzahl von baugleichen Anlagenkomponenten aufweisen, wird unterstellt, dass sie auch eine grundsätzlich ähnliche Kostenentwicklung wie bei Holzeinsatz durchlaufen. Die absoluten Investitionskosten für Strohheizkraftwerke zu den jeweils betrachteten Zeitpunkten können daher so kalkuliert werden, dass – ausgehend von den tatsächlichen Investitionskosten für ein Stroh-Heizkraftwerk im Jahr 2000 - die gleichen prozentualen Kostenabschläge bis 2030 unterstellt werden, wie beim Holzheizkraftwerk. Die Entwicklung der Anlageneffizienz des Strohheizkraftwerks wird analog berechnet; wieder wird von den absoluten Daten für das Jahr 2000 ausgegangen und anschließend die gleiche relative Entwicklung wie beim Holzheizkraftwerk unterstellt.

Einige Technologien sind im Rahmen der Lernkurvenkalkulation bewusst in Einzelkomponenten aufgeteilt. So setzt sich z. B. ein Stirlingmotor-Heizkraftwerk im Wesentlichen aus einer (konventionellen) Feuerung (z.B. Pelletfeuerung) und einem (neuartigen) Stirlingmotor zusammen. Während erstere Hauptkomponente bereits kommerziell verfügbar ist und einen vergleichsweise hohen Reifegrad erreicht hat, befindet sich der Motor trotz jahrelanger Forschung noch immer nicht in der Kommerzialisierungsphase. Daraus resultieren für beide Technologien sehr unterschiedliche Degressionsfaktoren und ggf. auch Lernkurven. Der gleiche Ansatz wird für den ORC-Prozess (in Kombination mit einer Feuerung) oder die Vergasung (in Verbindung mit Kraftmaschinen oder Kesselanlagen) gewählt.

Nicht aufgeteilt in Einzelkomponenten sind dagegen Heizkraftwerke mit konventionellen Dampfkraftprozessen, da sich bei diesen Anlagen alle Komponenten in vergleichsweise einheitlichem Reifegrad befinden.

Für etablierte Energietechnologien auf der Basis fossiler Brennstoffe werden nachfolgend keine Lernkurvenkalkulationen durchgeführt, da deren Investitionskostenentwicklungen aufgrund der vielen bereits gebauten Anlagen in der Literatur bereits mehrfach abgeschätzt wurden. Soweit verfügbar, wurden die Kostenentwicklungen aus dem Referenzszenario der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ (Kohle-, GuD-Kraftwerk, Verbrennungsmotoren) übernommen.

3.6 Zukünftige Marktentwicklung für ausgewählte Energietechnologien

Eine notwendige Voraussetzung zur ex-ante Kalkulation von Lernkurven sind Annahmen zur Entwicklung der kumulierten Produktionszahlen der betrachteten Einzeltechnologien. Hieraus resultieren spezifische Investitionskostenverläufe, die im weiteren Projektverlauf in die Szenarioberechnung einfließen und dort entscheiden, ob eine Technologien in 2010, 2020 oder 2030 aus ökonomischen Gründen tatsächlich in Deutschland zur Anwendung kommen würde oder nicht.

Zur Berechnung der Lernkurven sind die kumulierten Anlagenzahlen einer jeden Technologie notwendig, nicht die aktuellen Bestandszahlen. Erstere lassen sich allerdings aus Letzteren (näherungsweise) kalkulieren.

Tabelle 8 beschreibt daher zunächst die hier unterstellte Zahl von Energieanlagen für alle ausgewählten stationären (Bio-) Energietechnologien bzw. deren zusammengefasste Stellvertreter, die in 2000, 2010, 2020 und 2030 in Betrieb sind. Hierbei wurde von aktuellen Bestandszahlen in Deutschland ausgegangen und eine moderat-dynamische Fortentwicklung unterstellt. Technologien 2000 gewinnen in diesem „Bild“ früher an Marktdynamik als die Technologien 2010 und 2020. Letztere führen längerfristig zu teilweisen Substitutionen von Technologien 2000.

Tabelle 7 Unterstellte Anzahl der in 2000, 2010, 2020 und 2030 in Deutschland jeweils betriebenen Anlagen ausgewählter Energietechnologien

		momentane Anlagenzahl in D/EU		
"Technologie 2000"	2000	2010	2020	2030
Pelletfeuerung 10...50 kW (Pellets)	10000	45000	90000	95000
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz, Stroh)	250000	275000	300000	275000
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	1000	1100	800	400
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	55	90	75	50
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz, Stroh)	15	33	30	20
Vergärungsanlagen (Gülle, Ko-Fermente, Zoomasse)	1000	3500	5000	5500
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Sondergase)	1500	3750	4000	4750
5...200 MW Biomassezu feuerung in (Heiz)Kraftwerke	5	8	20	18
"Technologie 2010"				
ORC/ Kalina 500...1000 kW (Holz, Altholz, Stroh)	2	20	25	20
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz, Altholz)	2	14	18	19
Vergasung 1...80 MW mit Gasreinigung (Holz, Altholz)	5	20	100	500
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	1	1	3	4
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0	3	10	12
GuD-Prozess 200 MW (Produktgas)	0	2	10	13
Mikrogasturbine 30...200 kW (Sondergase)	5	100	1000	2000
Stirlingmotor 10...50 kW (für Holzpellet)	5	100	1000	2000
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	2	10	100	500
"Technologie 2020"				
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung		2	30	200
Flash-Pyrolyse 40 MW (für Flugstrom-Vergasung)		2	30	40

Quelle: nach ASUE (2001, 2002); BWK (2002, 2003); CogenEurope (1999, 2002); KOM (2000)

Ausgehend von diesen Zahlen momentan betriebener Anlagen wurden im nächsten Schritt die kumulierten Anlagenzahlen für jeden Technologie-Stellvertreter berechnet. Dies basiert auf der Annahme, dass die technische Lebensdauer einer Energieanlage im Mittel 20 Jahre beträgt:

- Kumulierte Anlagenanzahl in 2000 = 150 % der momentanen Anlagenzahl in 2000; Begründung: dieser Ansatz berücksichtigt Lerneffekte aus Anlagen, die in 2000 bereits nicht mehr in Betrieb sind.
- Kumulierte Anlagenanzahl in 2010 = kumulierte Anlagenzahl in 2000 + (momentane Anlagenzahl in 2010 - 50 % der in 2000 betriebenen Anlagen); Begründung: 50 % der in 2000 betriebenen Anlagen sind auch 2010 noch in Betrieb und dürfen nicht doppelt gezählt werden (Lebensdauer 20 Jahre).
- Kumulierte Anlagenanzahl in 2020, 2030: analog zu 2010

Tabelle 8 fasst die sich daraus ergebenden kumulierten Anlagenzahlen für alle Einzeltechnologien bzw. deren Stellvertreter zusammen.

Tabelle 8 Kalkulierte Anzahl der von 2000 bis 2030 in Deutschland jeweils kumuliert produzierten Anlagen ausgewählter Energietechnologien

	kumulierte Anlagenzahl in D			
	2000	2010	2020	2030
"Technologie 2000"				
Pelletfeuerung 10...50 kW (Pellets)	15000	55000	122500	172500
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz, Stroh)	375000	525000	687500	812500
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	1500	2100	2350	2350
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	83	145	175	188
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz, Stroh)	23	48	61	66
Vergärungsanlagen (Gülle, Ko-Fermente, Zoomasse)	1500	4500	7750	10750
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Sondergase)	2250	5250	7375	10125
5...200 MW Biomassezu feuerung in (Heiz)Kraftwerke	8	13	29	36
"Technologie 2010"				
ORC/ Kalina 500...1000 kW (Holz, Altholz, Stroh)	3	22	37	45
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz, Altholz)	3	16	27	37
Vergasung 1...80 MW mit Gasreinigung (Holz, Altholz)	8	25	115	565
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	2	2	4	7
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0	3	12	19
GuD-Prozess 200 MW (Produktgas)	0	1	2	2
Mikrogasturbine 30...200 kW (Sondergase)	8	105	1055	2555
Stirlingmotor 10...50 kW (für Holzpellets)	8	105	1055	2555
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	3	12	107	557
"Technologie 2020"				
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung	0	2	31	216
Flash-Pyrolyse 40 MW (für Flugstrom-Vergasung)	0	2	31	56

Bei der Bewertung dieser kumulierten Produktionszahlen gilt es zu bedenken, dass eine Technologie, die in Deutschland ggf. keine Marktdurchdringung erfährt, im (europäischen) Ausland sehr wohl eine kostenwirksame Entwicklung durchlaufen kann. Damit stünde diese Technologie als kostenreduziertes Importprodukt grundsätzlich dem deutschen Markt zur Verfügung, auch wenn diese Technologie in Deutschland z.B. gar keine Verbreitung fände.

Die Betrachtung des deutschen Marktes zur Abschätzung der Produktionsentwicklung dient somit eher der Anschauung. Andere Bezugsräume wären auch zulässig (z.B. EU). Solange eine Technologie in allen denkbaren Bezugsräumen (D, EU...) aber die gleiche relative Marktentwicklung erlebt, d.h. solange die Quotienten C2/C1 (vgl. Gleichung 2.1) der Marktentwicklung in allen denkbaren Bezugsräumen gleich ist, ist die Wahl des Bezugsraumes ohne Bedeutung für die resultierende Lernkurve. Unterschiede ergeben sich nur bei regional unterschiedlichen Quotienten; in diesem Falle ist ein geeigneter Bezugsraum begründet auszuwählen. Diesen Sachverhalt gilt es im weiteren Projektverlauf im Auge zu behalten.

Zusammenfassend lässt sich damit feststellen, dass die hier unterstellten relativen Marktentwicklungen von Einzeltechnologien nicht direkt an die in den Szenarien unterstellten Anlagenzahlen gekoppelt werden können. Einflüsse auf regionaler und internationaler Ebene überlagern die Produktionserfahrungen in Deutschland. Sie sollen lediglich die möglichen Kostensenkungen quantifizieren, die aus heutiger Sicht realisierbar sein könnten, wenn die Energiegewinnung aus Biomasse in Deutschland und/ oder seinen Nachbarländern eine „dynamische Entwicklung“ erfahren sollte.

Eine szenariodifferenzierte Kalkulation von individuellen Lernkurven ist damit nicht zielführend und spielte eine Sicherheit der Kostenkalkulation vor, die es nicht gibt. Zur Abschätzung des Einflusses der Lernkurven auf die Resultate der Szenarien besteht die Möglichkeit, die hier kalkulierten Kostensenkungen – gerade bei den schwer erfassbaren Zukunftstechnologien - als „Kann“-Option zu behandeln und Fallweise auszublenden. Diese Vorgehensweise spannt einen Korridor des zukünftig „möglichen“ auf und behandelt die inhärenten Unsicherheiten angemessen und sinnvoll.

3.7 Zukünftige Degressionsfaktoren für ausgewählte Energietechnologien

Eine weitere wichtige Eingangsgröße zur Kalkulation von Lernkurven sind die Degressionsfaktoren. Die bisherige Erfahrung mit technologischen Produkten hat gezeigt, dass je weiter eine Technologie (bzw. wesentliche, in ihr enthaltene Bestandteile) entwickelt ist und den Markt als kommerzielles Produkt durchdrungen hat, desto geringer fallen ihre zukünftig realisierbaren Kostenreduktionen aus und desto höher liegt demzufolge ihr Degressionsfaktor (z.B. $f = 97\%$). Technologien, die sich noch im F&E- bzw. Demonstrationsstadium bewegen, weisen dagegen geringere Degressionsfaktoren von 80-90 % auf.

Diese grundsätzlichen Annahmen sind konsistent zu den vergangenen Erfahrungen z.B. mit Gasturbinen (vgl. Bild 14) und harmonisieren gut mit den Degressionsfaktoren, die bei der fortschrittlichen Referenztechnologie IGCC künftig unterstellt werden (Bild 15). Die Literatur gibt mittlere Degressionsfaktorangaben im Bereich der neuen Energietechnologien an (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9 Mittlere Degressionsfaktorangaben für regenerative Energietechniken

Technologie	Historisch	Aktuell
BHKW-Anlagen	0,75 (1970)	... 0,95 (heute)
Windenergieanlagen	0,87 (1980) ... 0,91 (heute)	
Solarkollektoren		0,90
Photovoltaikanlagen		0,78

Basierend auf diesen Kenntnissen werden im Folgenden die derzeitigen und zukünftigen Degressionsfaktoren für alle hier betrachteten (Bio-) Energietechnologien bzw. deren Stellvertreter festgelegt. Hierbei ist jeweils abzuwägen, in welchem Reifegrad sich eine Technologie befindet. Kommerzielle, aber trotzdem eher junge Technologien, werden mit einem Degressionsfaktor von 90 % bewertet.

Tabelle 10 Unterstellte Degressionsfaktoren für Energietechnologien 2000 – 2030

	Degressionsfaktoren		
	2000 - 2010	2010 - 2020	2020 - 2030
"Technologie 2000"			
Pelletfeuerung 10...50 kW (Pellets)	0,93	0,95	0,97
Kleinfeuerungen 10 kW...1 MW (Holz, Stroh)	0,93	0,95	0,97
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	0,93	0,95	0,97
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz, Altholz, Stroh)	0,93	0,95	0,97
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz, Stroh)	0,93	0,95	0,97
Vergärungsanlagen (Gülle, Ko-Fermente, Zoomasse)	0,90	0,93	0,95
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Sondergase)	keine Anwendung Lernkurvenmethodik		
5...200 MW Biomassezufeuerung in (Heiz)kraftwerke	0,90	0,93	0,95
"Technologie 2010"			
ORC/ Kalina 500...1000 kW (Holz, Altholz, Stroh)	0,90	0,93	0,95
Vergasung 10...20 MW o. Gasreinigung (Holz, Altholz)	0,85	0,90	0,93
Vergasung 1...80 MW mit Gasreinigung (Holz, Altholz)	0,83	0,88	0,93
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	0,85	0,90	0,93
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0,90	0,93	0,95
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	0,90	0,93	0,95
Mikrogasturbine 30...200 kW (Sondergase)	0,90	0,95	0,97
Stirlingmotor 10...50 kW (für Holzpellets)	0,90	0,93	0,95
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (1-4 MW _{th})	0,85	0,90	0,93
"Technologie 2020"			
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) o. Gasreinigung	Kostenentwicklung nach DLR/IFEU/WI (2004)		
Flash-Pyrolyse 40 MW (für Flugstrom-Vergasung)		0,88	0,93
zum Vergleich:			
IGCC-Kraftwerk 400 MW, nach Enquete (2003)	0,78	0,90	0,98

3.8 Technologiedaten für die Szenario-Zeitpunkte

Im Folgenden werden die aus den getroffenen Annahmen kalkulierten Lernkurven und die daraus resultierenden Kostenentwicklungen der betrachteten Einzeltechnologien (bzw. ihrer Stellvertreter, vgl. Tabelle 6) vorgestellt. Des Weiteren werden die unterstellten Effizienzentwicklungen für alle betrachteten (Bio-) Energietechnologien ausgewiesen.

3.8.1 Technologiedaten für 2000

Nachfolgend sind die hier diskutierten Technologie- und Kostendaten für das Jahr 2000 aufgeführt. Für die „Technologien 2000“ (vgl. Kapitel 3.2) stellen die spezifischen Investmentkosten die Marktpreise kommerzieller Produkte dar, bei den „Technologien 2010“ (vgl. Kapitel 3.2) handelt es sich hierbei primär um Ist-Kosten bestehender Demonstrations- und Pilotanlagen. Für die „Technologien 2020“ (vgl. Kapitel 3.2) existieren noch keine kalkulierbaren (Pilot-) Anlagen.

Die spezifischen Investitionskosten sind bei Kraft- und Heizkraftwerken auf die elektrische Nettoleistung bezogen. Sie enthalten generell keine Energieverteilnetze.

Tabelle 11 *Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2000*

	Nutzungsgrad (netto)		spez Investkosten
	Eta th	Eta el	€/kW _{el} bzw. €/kW _{th} (eta el<0)
"Technologie 2000" (Marktverfügbar in 2000)			
Pelletfeuerung 10...50 kW (Holzpellets)	85%	-1%	800
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz)	80%	-1%	630
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	83%	-1%	550
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampfmotor, DT)	67%	14%	4125
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	0%	27%	2380
Vergärungsanlagen 300...4000 m ³	65%	-3%	1000
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	52%	33%	780
5...200 MW Zufeuerung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	100%	-1%	100
"Technologie 2010" (Demonstration in 2000)			
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	70%	11%	2000
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz)	75%	-2%	850
Vergasung 1...50 MW mit Gasreinigung (Holz)	70%	-2%	1000
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW			
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0%	47%	900
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	0%	53%	650
Mikrogasturbine 30...200 kW (Erdgas)	55%	27%	1100
Stirlingmotor 10...50 kW (ohne Kosten für Feuerung)	68%	12%	2400
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m ³ /h)	95%	-7%	300
zum Vergleich:			
Kohlekraftwerk 700 MW	0%	43%	1202
GuD-Prozess 650 MW	0%	55%	537
IGCC-Kraftwerk 400 MW	0%	47%	1600

Es ist wichtig zu betonen, dass allein auf Basis dieser Daten keine abschließende Beurteilung der technischen oder ökonomischen Vorteilhaftigkeit einzelner Technologien möglich ist. Dies liegt zunächst daran, dass die Investitionskosten einer Technologie nur einen Teil ihrer Gesamtkosten ausmachen.

Darüber hinaus werden hier technische und ökonomische Kenndaten von Technologien mit sehr unterschiedlichen Produktoutputs (Brenngase oder Brennstoffe, el. Strom, Wärme) und sehr unterschiedlichen installierten Anlagenleistungen zusammen aufgeführt. Sie sind daher nicht direkt mit einander vergleichbar.

Des Weiteren sind die folgenden Zusatzerläuterungen zum Verständnis von Tabelle 11 notwendig.

Tabelle 12 Erläuterungen zu den Technologiedaten 2000, differenziert nach Technologiegruppen

Gruppe	Erläuterung
Pelletfeuerung 10...50 kW (Holzpellets)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von Holzpellets; Mehrkosten sind bei Einsatz von Halmgutpellets zu berücksichtigen
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von unbehandelten Holzhackschnitzeln; Mehrkosten sind bei Einsatz von Halmgutballen zu berücksichtigen
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von unbehandelten Holzhackschnitzeln; Mehrkosten sind bei Einsatz von Halmgutballen und Altholz zu berücksichtigen
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampfmotor, DT)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von unbehandelten Holzhackschnitzeln; Mehrkosten sind bei Einsatz von Halmgutballen und Altholz zu berücksichtigen
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	Effizienzen gelten für ausschließliche Stromerzeugung; Kosten stellen Mittelwert für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Altholzeinsatz; Mehrkosten sind bei Einsatz von Halmgutballen zu berücksichtigen
Vergärungsanlagen 300...4000 m ³	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Substratmischungen und Leistungsgrößen dar
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	Technologiedaten stellen Mittelwerte unterschiedlicher Technologien (Magermotor, Lambda-1-Motor, Zündstrahlmotor) und Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von Erdgas; Mehrkosten sind bei Einsatz von Sondergasen (Biogas, Klärgas, Deponiegas, Produktgas)
5...200 MW Zufeuerung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	Technologiedaten gelten für die Zufeuerung fester Biomassen in Kohle(heiz)Kraftwerke und stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen und Einsatzstoffe (Holz, Halmgutballen, Abfälle) dar; Technologiedaten für die Zufeuerung vorvergaster Biomassen in Kohle- oder Erdgas(heiz)Kraftwerke sind den Vergasungstechnologien mit/ohne Gasreinigung zu entnehmen
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	Effizienzen gelten für den Gesamtprozess inkl. Feuerung; Kosten beziehen sich ausschließlich auf die Kraftmaschine; die Gesamtkosten ergeben sich aufgrund getrennt kalkulierter Lernkurven aus den Kosten für die Kraftmaschine zuzüglich der Kosten für ein Heizwerk mit angepasster Leistung
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz)	Technologiedaten beziehen sich auf die Vergasung unbelasteter Holzhackschnitzel und stellen einen Mittelwert über die unterschiedlichen Leistungen dar; die Effizienz beschreibt den Kaltgaswirkungsgrad; tatsächlich sind auch höhere thermische Nutzungsgrade möglich, wenn die im Produktgas enthaltene sensible Wärme im nachfolgenden Prozess genutzt wird; Mehrkosten sind bei Einsatz von Altholz und Zoomasse zu berücksichtigen
Vergasung 1...50 MW mit Gasreinigung (Holz)	Technologiedaten beziehen sich auf die Vergasung unbelasteter Holzhackschnitzel und stellen einen Mittelwert über die unterschiedlichen Leistungen und Technologien (Festbett - Wirbelschicht; atmosphärisch - druckaufgeladen; luftgeblasen - sauerstoffgeblasen) dar; die Effizienz beschreibt den Kaltgaswirkungsgrad; tatsächlich sind auch höhere thermische Nutzungsgrade möglich, wenn die im Produktgas enthaltene sensible Wärme im nachfolgenden Prozess genutzt wird; Mehrkosten sind bei Einsatz von Altholz und Zoomasse

	zu berücksichtigen
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	Technologiedaten beziehen sich auf die Vergasung unbelasteter Pyrolyseöl-/ Koks-Emulsionen dar; die Effizienz beschreibt den Kaltgaswirkungsgrad; tatsächlich sind auch höhere thermische Nutzungsgrade möglich, wenn die im Produktgas enthaltene sensible Wärme im nachfolgenden Prozess genutzt wird
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	Effizienzen gelten für ausschließliche Stromerzeugung
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	Effizienzen gelten für ausschließliche Stromerzeugung
Mikrogasturbine 30...200 kW (Erdgas)	Technologiedaten stellen Mittelwert über die unterschiedlichen Leistung dar und beziehen sich auf Erdgas als Brennstoff; Mehrkosten sind bei Einsatz von Sondergasen zu berücksichtigen
Stirlingmotor 10...50 kW (ohne Kosten für Feuerung)	Effizienzen gelten für den Gesamtprozess inkl. Feuerung; Kosten beziehen sich ausschließlich auf die Kraftmaschine; die Gesamtkosten ergeben sich aufgrund getrennt kalkulierter Lernkurven aus den Kosten für die Kraftmaschine zuzüglich der Kosten für ein Heizwerk mit angepasster Leistung
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für alle betrachteten Leistungsgrößen dar und unterstellen Einsatz von gereinigtem Biogas

3.8.2 Technologiedaten für 2010

Die Technologiedaten für das Jahr 2010 sind das Resultat einer evolutionären Weiterentwicklung von Wirkungsgraden und einer ersten Anwendung der Lernkurvenmethodik für die Dekade 2000 bis 2010. Die zusätzliche rechte Spalte weist die relativen Kostenreduktionen aus, die die einzelnen Technologien inflationsbereinigt innerhalb der Dekade 2000 bis 2010 erfahren.

Die mit 4 bis 8 % vergleichsweise geringen zu erwartenden Kostenreduktionen bis zum Jahre 2010 bei Kleinf Feuerungsanlagen, Heizwerken und Verbrennungsmotoren sind mit den bereits heute recht hohen Marktverbreitungen und/oder den unterstellten Mehraufwendungen zur Emissionsminderung zu begründen.

Deutlich höhere relative Kostenreduktionen könnten bis 2010 bei Pelletkesseln (12 %), Vergärungsanlagen (15 %) und GuD-Prozessen (10 bis 15 %) auftreten.

Die höchsten relativen Kostenreduktionen von 26 bis 33 % werden beim ORC-Prozess, bei der Gaseinspeisung ins Netz der öffentlichen Versorgung, bei der Vergasung, bei der Mikrogasturbine und beim Stirlingmotor erreicht. Diese Zahlen sind nur in Verbindung mit der Annahme gültig, dass die hier unterstellten „dynamischen“ Marktentwicklungen (Tabelle 8) auch in dieser Form eintreten. Die damit verbundenen Unsicherheiten und deren Begegnung wurden in Kapitel 3.6 ausführlich behandelt.

Die neu hinzugekommenen Technologiedaten für die Technologien 2020 sind Schätzwerte für mögliche Demonstrationsanlagen im Jahr 2010. Sie stellen den Ausgangspunkt für deren weitere Lernkurvenentwicklung dar. Für sie gelten die in Tabelle 13 aufgeführten besonderen Annahmen.

Tabelle 13 Erläuterungen zu den Technologiedaten 2010, differenziert nach Technologiegruppen

300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung	Technologiedaten stellen Mittelwerte für beide betrachteten BZ-Technologien dar und unterstellen Einsatz von gereinigtem Brenngas
Flash-Pyrolyse 40 MW (vor Flugstrom-Vergasung)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für sämtliche Inputstoffe dar; keine Differenzierung nach eingesetzter Biomasse; keine Wärmenutzung vor Ort
Fischer-Tropsch-Synthese (nach Flugstromvergasung)	Technologiedaten stellen Mittelwerte für sämtliche Inputstoffe dar; keine Differenzierung nach eingesetzter Biomasse; Auslegung auf hohe Kraftstoffausbeute und geringe Stromproduktion

Tabelle 14 Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2010

	Nutzungsgrade (netto)		spez Investkosten
	Eta th	Eta el	€/kW _{el} bzw. €/kW _{th} (eta el<0)
"Technologie 2000" (Marktverfügbar in 2010)			
Pelletfeuerung 10...50 kW (Holzpellets)	86%	-1%	698
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz)	82%	-1%	608
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	85%	-1%	531
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampf motor, DT)	66%	16%	3888
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	0%	29%	2201
Vergärungsanlagen 300...4000 m ³	75%	-3%	846
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	51%	35%	747
5...200 MW Zufeuerung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	100%	-1%	93
"Technologie 2010" (Marktverfügbar in 2010)			
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	69%	13%	1477
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz)	78%	-2%	574
Vergasung 1...50 MW mit Gasreinigung (Holz)	73%	-2%	724
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	83%	-10%	500
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0%	48%	810
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	0%	54%	550
Mikrogasturbine 30...200 kW (Erdgas)	50%	33%	737
Stirlingmotor 10...50 kW (ohne Kosten für Feuerung)	64%	17%	1607
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m ³ /h)	95%	-7%	217
"Technologie 2020" (Demonstration in 2010)			
300 kW MCFC/ SOFC (Erdgas) ohne Gasreinigung	30%	50%	1700
Flash-Pyrolyse 40 MW (vor Flugstrom-Vergasung)	75%	-2%	500
Fischer-Tropsch-Synthese (nach Flugstromvergasung)	58%	5%	420
zum Vergleich:			
Kohlekraftwerk 700 MW	0%	45%	1099
GuD-Prozess 650 MW	0%	57%	435
IGCC-Kraftwerk 400 MW	0%	50%	1350
Emissionsfaktoren reduzieren sich stärker als allein durch Effizienzsteigerungen erzielbar	Technologiedaten sind vergleichsweise wenig robust; Parametervariation notwendig		

3.8.3 Technologiedaten für 2020

Die Technologiedaten für das Jahr 2020 sind das Resultat einer weiteren evolutionären Weiterentwicklung von Wirkungsgraden und einer zweiten Anwendung der Lernkurvenmethodik für die Dekade 2010 bis 2020 (Tabelle 15). Die Reihenfolge der Technologien mit hohen bzw. geringen relativen Kostenreduktionen gegenüber 2000 (bzw. gegenüber 2010 im Falle der „Technologien 2020“) bleibt grundsätzlich unverändert. Die reifen Technologien, die bereits in der Dekade 2000 bis 2010 mit relativ geringen inflationsbereinigten Kostenreduktionen aufgefallen sind, verhalten sich in der Dekade 2010 bis 2020 aufgrund einer weiter zugenommenen Technologiereife weiterhin relativ kostenstabil (Kostenreduktionen von 4 bis 9 %). Aufgrund der geringen Anzahl an realisierbaren Anlagen sind auch die Kostensenkungspotenziale bei der innovativen 400 MW Flugstromvergasung sowie einer potenziell nachschaltbaren Fischer-Tropsch-Anlage begrenzt (8 % bzw. 15 % Kostenreduktion gegenüber 2010).

Die kumulierten Kostenreduktionen bei Pelletkesseln, Vergärungsanlagen und GuD-Prozessen erreichen im Jahr 2020 gegenüber 2000 inflationsbereinigt ca. 22 %.

Wieder erzielen die „Zukunftstechnologien“ Vergasung, ORC-Prozess, Gaseinspeisung und Stirlingmotor mit 30 bis 48 % die im Vergleich zu den anderen Technologien höchsten relativen Kostenreduktionen (sofern denn die hier unterstellte relative Marktdynamik in Deutschland und/oder seinen Nachbarländern auch eintritt).

Tabelle 15 Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2020

	Nutzungsgrad (netto)		spez Investkosten	relative
	Eta th	Eta el	€/kW _{el} bzw. €/kW _{th} (eta el<0)	Kostenreduktion gegenüber 2000
"Technologie 2000" (Marktverfügbar in 2020)				
Pelletfeuerung 10...50 kW (Holzpellets)	87%	-1%	658	17,7%
Kleinf Feuerungen 10 kW...1 MW (Holz)	83%	-1%	596	5,4%
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	86%	-1%	527	4,3%
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampfmotor, DT)	65%	18%	3835	7,0%
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	0%	31%	2160	9,2%
Vergärungsanlagen 300...4000 m³	79%	-3%	799	20,1%
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	50%	37%	722	7,4%
5...200 MW Zufeuerung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	100%	-1%	85	15,2%
"Technologie 2010" (Marktverfügbar in 2020)				
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	68%	15%	1399	30,0%
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz)	82%	-2%	530	37,6%
Vergasung 1...50 MW mit Gasreinigung (Holz)	77%	-2%	546	45,4%
Sauerstoffgebl. Druckflugstromvergasung 400 MW	85%	-10%	463	7,5%
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0%	49%	704	21,8%
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	0%	58%	512	21,3%
Mikrogasturbine 30...200 kW (Erdgas)	46%	38%	621	43,6%
Stirlingmotor 10...50 kW (ohne Kosten für Feuerung)	63%	19%	1262	47,4%
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	95%	-7%	155	48,2%
"Technologie 2020" (Marktverfügbar in 2020)				
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung	30%	51%	1100	35,3%
Flash-Pyrolyse 40 MW (vor Flugstrom-Vergasung)	76%	-2%	302	39,7%
Fischer-Tropsch-Synthese (nach Flugstromvergasung)	60%	5%	355	15,5%
zum Vergleich:				
Kohlekraftwerk 700 MW	0%	46%	971	19,2%
GuD-Prozess 650 MW	0%	58%	409	23,8%
IGCC-Kraftwerk 400 MW	0%	53%	1225	23,4%
Emissionsfaktoren reduzieren sich stärker als allein durch Effizienzsteigerungen erzielbar	Technologiedaten sind vergleichsweise wenig robust; Parametervariation notwendig			

Die fortschrittlichen „Technologien 2020“ Flash-Pyrolyse und Brennstoffzelle erzielen in nur einer Dekade relative Kostenreduktionen von 35 bis 39 %. Hierüber hinausgehende Technologien und Verfahren, die heute noch nicht absehbar sind, in 2020 aber technologisch verfügbar sein könnten, müssen an dieser Stelle zwangsläufig unberücksichtigt bleiben.

Das Stoffstrommodell und die Technologiedatenbank sind so ausgelegt, dass neue, aus heutiger Sicht nicht absehbare Technologietrends jederzeit nachträglich eingearbeitet und die Konsequenzen daraus für die Politik zeitnah abgeleitet werden können.

3.8.4 Technologiedaten für 2030

Die Technologiedaten für das Jahr 2030 zeigt Tabelle 16. Sie sind das Resultat einer erneuten evolutionären Weiterentwicklung von Wirkungsgraden und einer dritten Anwendung der Lernkurvenmethodik für die Dekade 2020 bis 2030.

Tabelle 16 Unterstellte bzw. kalkulierte Technologie- und Kostendaten für ausgewählte Energietechnologien im Jahr 2030

	Nutzungsgrad (netto)		spez Investkosten	relative
	Eta th	Eta el	€/kWel. bzw. €/kWth (eta el<0)	Kostenreduktion gegenüber 2000
"Technologie 2000" (Marktverfügbar in 2030)				
Pelletfeuerung 10...50 kW (Holzpellets)	88%	-1%	648	19,0%
Kleinfeuerungen 10 kW...1 MW (Holz)	84%	-1%	592	6,1%
Heizwerke 0,5...5 MW (Holz; Unterschub, Rost)	87%	-1%	527	4,3%
Heizkraftwerke 0,5...5 MW (Holz; Rost; Dampfmotor, DT)	65%	19%	3823	7,3%
Kraftwerke 10...20 MW (Holz, Altholz; Rost, WSF; DT)	0%	32%	2152	9,6%
Vergärungsanlagen 300...4000 m³	80%	-3%	780	22,0%
Verbrennungsmotoren 100...1000 kW (Erdgas)	48%	40%	722	7,4%
5...200 MW Zufeuerung in Kohle(Heiz)kraftwerke (Holz)	100%	-1%	83	16,6%
"Technologie 2010" (Marktverfügbar in 2030)				
ORC/ Kalina 500...1000 kW (ohne Kosten für Feuerung)	68%	16%	1380	31,0%
Vergasung 10...20 MW ohne Gasreinigung (Holz)	83%	-2%	513	39,7%
Vergasung 1...50 MW mit Gasreinigung (Holz)	78%	-2%	462	53,8%
Sauerstoffgebl. Druckflugsstromvergasung 400 MW	86%	-10%	443	11,3%
GuD-Prozess 30 MW (Produktgas)	0%	50%	679	24,5%
Erdgas-GuD 200 MW (Produktgas)	0%	59%	512	21,3%
Mikrogasturbine 30...200 kW (Erdgas)	45%	40%	597	45,7%
Stirlingmotor 10...50 kW (ohne Kosten für Feuerung)	62%	21%	1182	50,7%
Biogasaufbereitung + Netzeinspeisung (100...600 m³/h)	95%	-7%	131	56,4%
"Technologie 2020" (Marktverfügbar in 2030)				gegenüber 2010
300 kW MCFC/ SOFC (Sondergase) ohne Gasreinigung	30%	52%	1000	41,2%
Flash-Pyrolyse 40 MW (vor Flugstrom-Vergasung)	77%	-2%	284	43,3%
Fischer-Tropsch-Synthese (nach Flugstromvergasung)	62%	5%	342	18,5%
zum Vergleich:				gegenüber 2000
Kohlekraftwerk 700 MW	0%	50%	956	20,5%
GuD-Prozess 650 MW	0%	59%	383	28,7%
IGCC-Kraftwerk 400 MW	0%	56%	1200	25,0%
Emissionsfaktoren reduzieren sich stärker als allein durch Effizienzsteigerungen erzielbar	Technologiedaten sind vergleichsweise wenig robust; Parametervariation notwendig			

Die kalkulierten inflationsbereinigten Kostenreduktionen gegenüber 2000 bzw. 2010 liegen im Bereich von 4 und 57 %. Zum Vergleich: Nach Enquete (2003) erreicht die Kohlevergasung mit nachgeschaltetem GuD-Prozess (IGCC) in diesem Zeitraum eine inflationsbereinigte Kostenreduktion von 25 %. Dieser Wert gilt als Mittelwert für Vergasung und Kraftprozess und wird bereits bei einer Gesamtzahl von weltweit 35 Anlagen erreicht. Der Stirlingmotor erreicht seine 50 % Kostenreduktion erst nach 2.500 Einheiten.

4 Technologieauswahl für die Szenarien

Nach der Erstellung der Datenbasis für Biomasse-Technologien wurde diese im Projekt genutzt, um die im Hinblick einer künftig verstärkten energetischen Biomassenutzung stoffstromspezifisch interessanten Verfahren und Anlagentypen zu identifizieren.

Neben der Methodik der Technologieauswahl (vgl. Kapitel 4.1) ihren Datengrundlagen (vgl. Kapitel 4.4) und Ergebnissen (vgl. Kapitel 4.3) sind auch folgende Einzelanalysen in diesem Kapitel enthalten, die im Rahmen des Projekts zur Politikberatung des BMU durchgeführt wurden:

- Vergleich der *Stromerzeugungskosten* verschiedener Biomassetechnologien mit den Vergütungssätzen des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2004) für den Zeithorizont 2010 (siehe Kapitel 4.5)
- Potenzielle Bedeutung des *Emissionshandels* für die Wirtschaftlichkeit der Mitverbrennung von Waldholz und Stroh in bestehenden Kraft- und Heizkraftwerken (siehe Kapitel 4.6)
- Mögliche Rolle der *Gaseinspeisung* für die Nutzung biogener Gase (siehe Kapitel 4.7)
- *Sensitivitätsanalysen* der Stromerzeugungskosten bei Variation des Kapitalzinssatzes und – für KWK-Systeme - der Wärmegutschrift (siehe Kapitel 4.8).

4.1 Methodischer Ansatz zur Technologieauswahl

Ziel der Arbeiten zur Technologieauswahl war, aus der Datenbank diejenigen Systeme zu identifizieren, die *stellvertretend* für eine ganze Reihe von Leistungsgrößen und Technologievarianten jeweils für einen Biomasse-Stoffstrom *günstige* Nutzungsbedingungen aufweisen.

Im Vordergrund stand dabei die Aufgabe, aus den über 300 in der Datenbasis verfügbaren Biomassetechnologien zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen eine gezielte Auswahl von größenordnungsmäßig 30 „Stellvertretern“ zu treffen, die in den Szenarien (vgl. Kapitel 6) zur Deckung der Nachfrage stoffstromspezifisch eingesetzt werden²⁷.

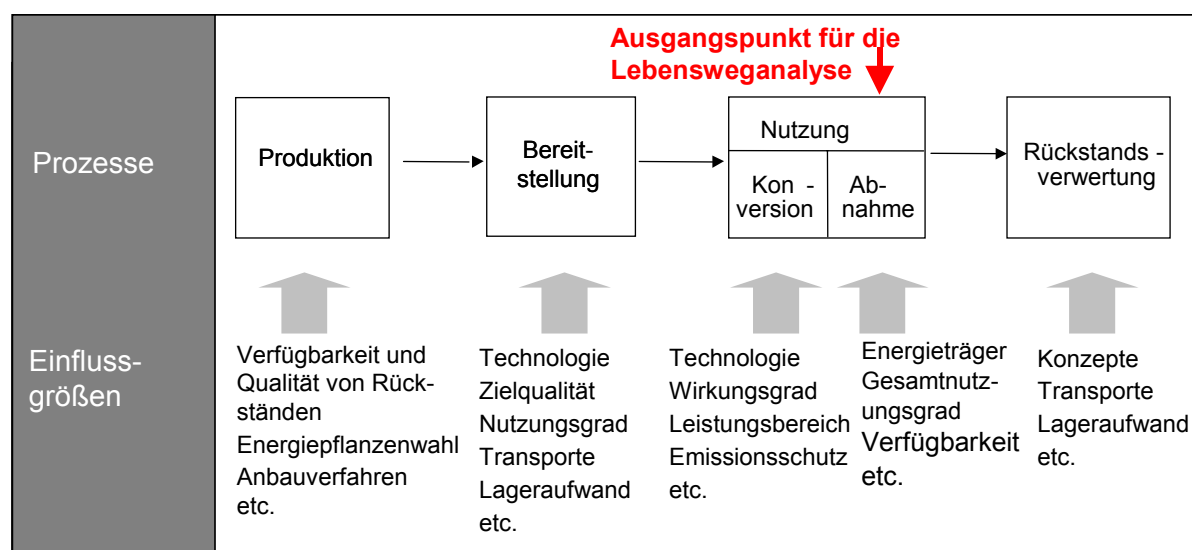
Hierzu wurde eine *ganzheitliche Analyse* von Technologien zur energetischen Biomassenutzung durchgeführt, die potenzielle Vor- und Nachteile der jeweiligen Nutzungstechniken für Biomasse sichtbar macht und dabei die vorgelagerten Stoffströme mit einbezieht.

Ganzheitlich meint, dass sowohl die direkten Effekte der Bereitstellung von Strom, Wärme bzw. Transportdienstleistungen (Kosten, Emissionen, Beschäftigung) als auch die indirekt über vorgelagerte Prozesse sowie Herstellung bzw. Entsorgung entstehenden Umwelt-, Kosten- und Beschäftigungswirkungen mit erfasst und bilanziert werden, d.h. der *gesamte Lebensweg*.

²⁷ Diese Reduktion der Technologieanzahl um den Faktor 10 erfolgte, um den Bearbeitungsaufwand bei der Szenarioerstellung (vgl. Kapitel 6) in Grenzen zu halten. Das EDV-Werkzeug BIO-SZEN (vgl. Kapitel 2.2.3) ist zwar problemlos in der Lage, jeweils ca. 150 Einzeltechnologien für die Bereitstellung von Strom, Wärme und Personen- sowie Gütertransportdienstleistungen parallel in vier Szenarien über jeweils 4 Stützzeitpunkte zu verarbeiten, jedoch steigt der Eingabe- und Bedienungsaufwand umso mehr, je größer die Zahl der Technologien ist. Als Kompromiss zwischen Detaillierung und Aufwand ergab sich die Größe von jeweils ca. 10 „Stellvertreter“-Technologien für die Bereiche Strom, Wärme und Transport.

Bild 16

Schema zu Lebenswegen von Prozessen zur energetischen Biomassenutzung



Die in der Technologiesdatenbasis aufgenommenen Daten erlauben, die Analyse hinsichtlich folgender Indikatoren durchzuführen²⁸:

- CO₂-Äquivalente (Aggregation von Treibhausgasen als Maß für die Klimarelevanz)
- SO₂-Äquivalente (Aggregation versauernd wirkender Luftschadstoffe)
- TOPP-Äquivalente (Aggregation von Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon)
- nichterneuerbarer Kumulierter Energie-Verbrauch (KEV_{NE}) sowie Flächenbedarf als Maß für die Ressourceninanspruchnahme
- feste Reststoffe (insb. Aschen)
- spezifische Lebenszykluskosten (Gestehungskosten für bereitgestellte Energie aus Investitions-, Fix- und Betriebs- sowie Brenn- bzw. Kraftstoffkosten)
- Beschäftigungseffekte (direkt und indirekt).

Neben den o.g. rein quantitativen Indikatoren bezieht die Technologieauswahl auch Aspekte ein, die „hot spots“ in Bezug auf Umwelt und Gesundheit (z.B. Schwermetalle, kanzerogene Emissionen) betreffen – dies sind besondere, einzelne Technologien oder Prozessstufen betreffende Probleme, die aus Relevanz- und Datengründen nicht systematisch über alle Technologien hinweg untersucht werden konnten.

Weiterhin wurde in die Auswahl der möglichen *Energiepflanzen* zur Bereitstellung von Anbaubiomasse Aspekte des Naturschutzes beim Anbau einbezogen, die auf den Ergebnissen einer anderen Studie beruhen²⁹.

Die Auswahl identifiziert solche Technologien, die möglichst *in allen* Indikatoren günstiger als – je nach Anwendungsfall gewählte – Referenztechnologien (z.B. Erdgas-GuD-Kraftwerk, Gasheizung, Benzin-Pkw) sind bzw. möglichst geringe *Tradeoffs* zwischen Kosten und Umwelt aufweisen und bei den weiteren Aspekten – hier vor allem der Beschäftigungswirkung – gleichfalls günstig sind.

Die Methodik der Auswahl besteht auf den folgenden Schritten:

- Die sechs Umweltindikatoren CO₂-Äquivalente (Klima), SO₂-Äquivalente (Versauerung), TOPP-Äquivalente (Sommersmog), Asche (feste Reststoffe), nichterneuerbarer kumulierter Energie-Verbrauch (KEV_{NE}) sowie die Flächeninanspruchnahme werden in vier Varianten zu *einem* aggregierten Indikator für „Ökologie“ gewichtet.
- Die Indikatoren für die Nachhaltigkeitsbereiche Ökologie, Ökonomie (Gestehungskosten) und Soziales (Beschäftigungseffekt) werden ebenfalls in vier Varianten gewichtet, woraus sich jeweils ein „Gesamt“-Indikator ergibt.
- Abschließend werden diejenigen Technologien je Stoffstromgruppe identifiziert, die gegenüber den berechneten Varianten zur Gewichtung *robust* sind, also möglichst jeweils „beste“ Plätze einnehmen.

Es wurde somit *kein Bewertungsverfahren* verwendet, sondern ein „Sieb“ zur Auswahl, das aus einer breiten Parametervariation möglicher Teilbewertungen schöpft. Die gewählten Gewichtungsvarianten zeigt die folgende Übersicht.

Tabelle 17 Varianten zur Gewichtung für die Technologie-Auswahl

Variante zur Gewichtung	relative Gewichtung der Umweltaspekte					
	CO ₂ -Äq.	SO ₂ -Äq.	TOPP-Äq.	Asche	KEV _{NE}	Fläche
1	30%	20%	20%	10%	10%	10%
2	30%	20%	20%	0%	20%	10%
3	25%	25%	25%	0%	25%	0%
4	20%	20%	20%	0%	20%	20%

Variante zur Gewichtung	relative Gewichtung der Teilaspekte		
	Ökologie gew. Score	Ökonomie Kosten	Soziales Beschäftigte
A	60%	20%	20%
B	50%	25%	25%
C	40%	30%	30%
D	33%	33%	33%

²⁸ Es können grundsätzlich auch N-Äquivalente (Aggregation eutrophierend wirkender Substanzen) berücksichtigt werden, hierzu war jedoch die Datenlage insbesondere beim Energiepflanzenanbau zu lückenhaft bzw. standortspezifisch, um allgemeine Aussagen auf nationaler Ebene zu erlauben. Die Eutrophierung wurde zusammen mit anderen Naturschutzfragen qualitativ einbezogen (vgl. Kapitel 4.4).

²⁹ Hierbei handelt es sich um die noch unveröffentlichten Ergebnisse eines BfN-Vorhabens zur Identifizierung von Naturschutzaspekten bei der energetischen Nutzung von Biomasse (siehe IFEU/IUS 2004). Wir danken insbesondere Karl Scheurle für die Bereitstellung dieser Informationen.

Die 16 Varianten zur Gewichtung (A1 bis D4) werden auf die Ergebnisse der Lebenswegbilanzen für die Technologiegruppen Strom, Wärme und Kraftstoffe angewendet (vgl. Kapitel 4.3) und jeweils für einen bestimmten Biomasse-Stoffstrom (z.B. Biogas aus Gülle, Energiepflanzen) ausgewertet³⁰. Sie bilden eine sehr breite Schar möglicher Bewertungen und Gewichtungen ab, ohne sich für eine bestimmte davon zu entscheiden – Ziel ist ja, die unter verschiedenen Gewichtungen jeweils günstigen („robusten“) Technologien zu identifizieren.

4.2 Datengrundlagen zur Technologieauswahl

Mit dem im Projekt ergänzten Computerprogramm GEMIS 4.2 (vgl. Kapitel 2.2.1) wurden die Lebenswegberechnungen durchgeführt, auf deren Basis dann die Technologieauswahl erfolgte. Die folgenden Tabellen zeigen die wesentlichen Ergebnisse jeweils für die Jahre 2010 und 2030.

Bei den Ergebnissen der Lebenswegberechnungen ist zu beachten, dass für die BHKW stets eine Gutschrift für die ausgekoppelte nutzbare Abwärme angesetzt wurde. Diese Wärmegutschrift erfolgte auf Basis einer neuen Erdgas-Niedertemperatur-Heizung und wurde sowohl bei den Emissionen wie auch bei Kosten und Beschäftigung berücksichtigt – es handelt sich also um *Nettobilanzen* für KWK-Strom³¹.

Daher zeigen die Ergebnistabellen teilweise *negative* Resultate – z.B. für Treibhausgase (CO₂-Äquivalente). In diesen Fällen ist die *Gesamtemission* der Bio-BHKW für Strom *und* Wärme geringer als die über die Wärmegutschrift vermiedenen Emissionen, das Saldo also kleiner als Null. Dies beruht darauf, dass die biogene Strom- und Wärmebereitstellung meist sehr geringe CO₂-Äquivalent-Emissionen aufweist, während die anteilig vermiedenen Emissionen einer Gasheizung im Bereich von 300 g/kWh_{th} liegen. Ersetzt nun z.B. das 50-kW_{el}-Biogas-BHKW je kWh Strom gut 2 kWh Wärme aus einer Gasheizung und emittiert dabei insgesamt rund 250 g CO₂-Äquivalente, so werden von dieser „Brutto“-Emissionen dann rund 600 g (also 2*300 g/kWh_{th} aus der Gasheizung) abgezogen, womit sich als strombezogenes Netto-Ergebnis für Treibhausgase ein Wert von rund 350 g/kWh_{el} ergibt.

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die berechneten Stromerzeugungskosten ebenfalls „netto“ angegeben sind, d.h. auch hier wurde eine Wärmegutschrift einbezogen. Da diese einen relativ großen Einfluss auf das Ergebnis hat, wurden auch Sensitivitätsrechnungen dazu vorgenommen (vgl. Kapitel 4.8.2).

Bei den Beschäftigten sind ebenfalls Netto-Bilanzen ausgewiesen, d.h. die durch die ersetzte Gasheizung „vermiedene“ Beschäftigung wurde ebenfalls von der Brutto-Bilanz der Beschäftigung für die Biostromerzeugung abgezogen.

³⁰ Die Einzelergebnisse der Variationen sind in einer Excel-Arbeitsmappe enthalten, die zusammen mit den im Projekt entwickelten EDV-Werkzeugen (vgl. Kapitel 2.2) auf CD-ROM bzw. auf der Projekt-website erhältlich.

³¹ In der Datenbasis sind auch „Brutto“-Prozesse enthalten, bei denen keine Gutschrift verrechnet wird. Diese Betrachtung ist sinnvoll, wenn Strom und Wärme *gemeinsam* betrachtet werden und ein Vergleich z.B. mit der getrennten Erzeugung von Strom *und* Wärme erfolgt. Dazu sind in GEMIS 4.2 entsprechende Beispiel-Szenarien enthalten. Die Gutschrift für Wärme kann zudem variiert werden – z.B. anstelle von Gasheizungen solche mit Heizöl oder entsprechende Mixe.

Tabelle 18 Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus biogenen Gasen – Jahr 2010

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ kWh _{el}	Arbeit Pers./ TWh _{el}	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / kWh _{el}	Fläche m ² / MWh _{el}
			g/kWh _{el}					
Biogase Reststoffe								
R+S-300-BHKW-25	14,0	1.468	-329	1,5	1,9	6,5	-1,7	2,3
R+S-300-BHKW-50	14,2	1.451	-350	1,6	2,0	6,4	-1,8	2,3
R+S-300-BHKW-100	12,7	1.476	-269	1,4	1,8	5,9	-1,4	2,1
R+S-300-BHKW-200	11,0	1.186	-296	1,4	1,8	5,9	-1,6	2,0
R+S-1500-BHKW-200	7,8	746	-317	1,4	1,7	4,7	-1,6	1,8
R+S-1500-BHKW-500	6,9	642	-241	1,3	1,6	4,4	-1,3	1,7
R+S-1500-BHKW-1000	6,6	585	-212	1,2	1,6	4,2	-1,1	1,6
Fleischbrei-BHKW-500	14,7	1.326	-186	0,7	0,7	9,4	-0,9	2,6
Biomüll-1500-BHKW-500	8,1	522	-372	0,7	1,0	2,2	-1,8	2,5
Gülle-1500-BHKW-500	9,6	898	-240	1,1	1,4	6,3	-1,3	2,9
BuL-4000-BHKW-500	3,5	539	-339	0,6	0,6	3,8	-1,6	0,7
Biogas-Energiepflanzen								
RuM-BHKW-500	18,5	518	-187	1,9	1,2	4,9	-1,3	419,6
RuM-öko-BHKW-500	24,0	920	-233	1,2	1,4	5,2	-1,3	955,3
Feuchtgut-BHKW-500	10,2	5.233	-182	1,6	1,6	5,3	-1,4	464,1
Klärgas								
BHKW-50	0,3	-2	-533	0,2	0,3	-1,0	-2,5	-0,2
BHKW-200	-1,1	-97	-457	0,2	0,3	-0,9	-2,1	-0,2
BHKW-1000	-1,1	-107	-355	0,2	0,3	-0,7	-1,7	-0,2
Deponiegas								
BHKW-50	3,1	140	-535	0,5	0,3	-1,0	-2,5	-0,2
BHKW-200	0,7	-54	-483	0,2	0,3	-0,7	-2,2	-0,3
BHKW-1000	0,3	-125	-354	0,8	1,0	-0,7	-1,7	-0,2

R+S = Rinder- und Schweinegülle; BHKW = Blockheizkraftwerk; BuL = Biomüll und Landschaftspflegeschnitt; RuM = Rindergülle und Mais; RuM-öko = Rindergülle und Mais aus ökologischem Anbau; die Zahlen am Ende der Optionen-Bezeichnung verweisen auf die elektrische Leistung; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, o. Kosten für Wärmenetze

Die Ergebnisse der Lebenswegbilanzen für das Jahr 2010 zeigen für Biogas-Strom aus Reststoffen, dass die kleineren Fermenter (300 m³ Volumen) gegenüber den größeren (1500 m³ Volumen) bei den Kosten deutlich ungünstiger abschneiden, dafür aber mehr Beschäftigung erlauben. Parallel ist der Einfluss der elektrischen Leistung der BHKW sichtbar, die das Biogas zu Strom und Wärme umwandeln. Die Gasmotoren im 500 kW_{el}-Bereich zeigen erwartungsgemäß die geringsten Kosten und liegen bei den Emissionen vergleichsweise günstig.

Die Stromerzeugung über Biogas aus Energiepflanzen (Mais als Kosubstrat für Rindergülle bzw. Energiepflanzen aus Feuchtgutlinien) ist vergleichsweise teurer und hat naturgemäß gegenüber den Reststoff-Biomassen einen drastisch höheren Flächenbedarf. Hier wurde jeweils ein 1500 m³-Fermenter und ein 500 kW_{el}-Gasmotor angenommen.

Bei Klär- und Deponiegas sind die Erzeugungskosten sehr gering, da diese Gase „ohnehin“ anfallen und erfasst werden müssen. Die mittelgroßen BHKW mit 200 kW_{el} liegen hier bei Kosten, Beschäftigung und Emissionen insgesamt sehr günstig.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Ergebnisse für das Jahr 2030 – hier wurde der Anlagenfortschritt (Kosten, Effizienz) berücksichtigt und die Preissteigerung bei den eingesetzten Energieträgern bzw. der Wärmegutschrift.

Tabelle 19 Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus biogenen Gasen – Jahr 2030

	Kosten	Arbeit	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE}	Fläche
Stoffstromgruppe/ Technologie	€cent/ kWh _{el}	Pers./ TWh _{el}	g/kWh _{el}				kWh _{pri} / kWh _{el}	m ² / MWh _{el}
Biogase Reststoffe								
R+S-300-BHKW-25	10,0	1.069	-279	0,8	1,0	5,9	-1,5	1,8
R+S-300-BHKW-50	10,1	1.035	-268	0,8	1,0	5,8	-1,5	1,7
R+S-300-BHKW-100	8,6	1.078	-255	0,7	0,9	5,3	-1,4	1,5
R+S-300-BHKW-200	7,6	828	-225	0,7	0,9	5,3	-1,2	1,5
R+S-1500-BHKW-200	5,5	538	-243	0,7	0,9	4,3	-1,3	1,4
R+S-1500-BHKW-500	4,5	441	-203	0,7	0,9	4,0	-1,1	1,3
R+S-1500-BHKW-1000	4,6	431	-176	0,9	1,2	3,9	-1,0	1,2
Fleischbrei-BHKW-500	12,6	1.206	-120	0,3	0,3	9,5	-0,8	2,3
Biomüll-1500-BHKW-500	5,9	455	-306	0,4	0,6	2,0	-1,4	2,2
Gülle-1500-BHKW-500	8,1	837	-190	0,7	0,9	5,6	-1,0	2,6
BuL-4000-BHKW-500	2,0	405	-277	0,2	0,2	3,5	-1,3	0,5
Biogas-Energiepflanzen								
RuM-BHKW-500	15,2	379	-159	1,2	0,6	4,5	-1,1	270,6
RuM-öko-BHKW-500	19,9	569	-210	0,6	0,6	4,5	-1,1	519,5
Feuchtgut-BHKW-500	7,7	3.107	-177	0,7	0,6	5,3	-1,2	255,6
Klärgas								
BHKW-50	0,1	88	-430	0,0	-0,1	-0,8	-2,0	-0,2
BHKW-200	-1,2	-21	-373	0,0	-0,1	-0,7	-1,7	-0,2
BHKW-1000	-1,2	-51	-294	0,0	0,0	-0,6	-1,3	-0,2
Deponiegas								
BHKW-50	2,7	230	-432	0,2	-0,1	-0,9	-2,0	-0,2
BHKW-200	0,3	-21	-373	0,2	-0,1	-0,7	-1,7	-0,2
BHKW-1000	0,0	-69	-294	0,2	0,0	-0,6	-1,3	-0,2

R+S = Rinder- und Schweinegülle; BHKW = Blockheizkraftwerk; BuL = Biomüll und Landschaftspflegeschnitt; RuM = Rindergülle und Mais; RuM-öko = Rindergülle und Mais aus ökologischem Anbau; die Zahlen am Ende der Optionen-Bezeichnung verweisen auf die elektrische Leistung; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, o. Kosten für Wärmenetze

Gegenüber den Ergebnissen für 2010 zeigt sich, dass die Kosten z.T. deutlich sinken, parallel aber auch die Beschäftigungswirkung. Die Emissionen von Luftschadstoffen können längerfristig fast halbiert werden, während die Treibhausgasemissionen und die Einsparung nichterneuerbarer Primärenergie aufgrund der steigenden Stromkennzahlen der BHKW leicht sinken. Der Flächenbedarf der Stromerzeugung durch Biogas aus Energiepflanzen kann langfristig erheblich sinken, da die Erträge des Anbaus und die Gesamteffizienz der Lebenswege zunehmen.

Neben den biogenen Gasen spielen die *festen Biomassen* aus Reststoffen sowie aus Anbau eine potenziell große Rolle. Die Ergebnisse hierzu zeigt die folgende Tabelle für das Jahr 2010.

Wie zuvor wurde dabei für Systeme mit Kraft-Wärme-Kopplung eine Wärmegutschrift verrechnet, um die strombezogenen „Netto“-Ergebnisse zu erhalten.

Tabelle 20 Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus fester Biomasse – Jahr 2010

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ kWh _{el}	Arbeit Pers./ TWh _{el}	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / kWh _{el}	Fläche m ² / MWh _{el}
Altholz								
Altholz-A1-4-KW	8,5	488	18	0,5	1,0	0,0	0,0	0,3
Altholz-A1/2-Mitverbr-Ko-KW	3,9	46	25	0,4	0,6	0,0	0,0	0,2
Altholz-HKW-DM	6,8	209	-1347	2,7	2,5	-2,5	-6,4	-0,4
Altholz-HKW-ORC	6,1	-160	-1632	3,1	2,8	-3,1	-7,8	-0,6
FB-Altholz-A1/2-BHKW-GM	17,0	1.330	-287	0,8	1,0	4,1	-1,5	1,7
FB-Altholz-A1/2-BHKW-Mikro-GT	15,6	1.353	-207	0,3	0,4	12,4	-1,2	1,6
aZWS-Altholz-A1/2-BHKW	7,2	225	-290	0,6	0,8	2,2	-1,4	0,8
dZWS-Altholz-A1/2-Mitverbr-GuD	7,5	286	206	0,9	1,3	9,3	0,7	2,9
Waldholz								
Waldholz-HS-Mitverbr-Ko-KW	5,3	97	38	0,4	0,7	0,0	0,1	0,1
Waldholz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	2,0	-391	-388	0,5	0,7	-0,7	-2,7	-0,1
Holz-Wald-HKW-DM	10,9	368	-1329	1,3	1,2	-2,5	-6,2	-0,5
Holz-Wald-HKW-ORC	10,8	23	-1625	1,5	1,3	-3,0	-7,6	-0,7
Holz-Pellet-HKW-Stirling	25,6	144	-1010	1,4	1,7	1,8	-4,8	1,1
FB-Waldholz-BHKW	19,3	1.426	-273	0,7	1,2	3,6	-1,5	1,5
FB-Waldholz-Mikro-GT-BHKW	17,8	1.446	-191	0,4	0,6	11,9	-1,2	1,5
aZWS-Waldholz-BHKW	8,8	291	-274	0,6	0,9	2,2	-1,4	0,8
dZWS-Waldholz-GuD	9,6	394	219	0,9	1,4	9,3	0,8	3,0
dWSF-Waldholz-Mitverbr-GuD	8,8	341	224	0,9	1,4	9,5	0,8	3,0
dZWS-Waldholz-GuD-HKW	7,6	134	-92	0,8	1,2	9,9	-0,7	3,2
DV-Waldholz-BZ-MC-HKW	15,5	845	492	0,6	0,8	6,0	0,4	2,0
DV-Waldholz-BZ-SO-HKW	13,1	683	312	0,5	0,6	5,3	-0,3	1,8
Syngas-Waldholz-BZ-MC-BHKW	10,5	387	-11	0,2	0,1	9,4	-0,3	2,7
Syngas-Waldholz-BZ-SO-BHKW	11,4	625	8	0,2	0,1	8,7	-0,2	2,5
KUP-Holz/Miscanthus								
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-KW	8,8	2.203	71	0,7	0,8	0,2	0,1	549,2
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	7,6	5.559	-355	0,9	0,9	-0,5	-2,6	873,3
KUP-Holz-HKW-DM	22,6	5.712	-1205	3,7	3,3	-2,0	-6,0	1739,5
KUP-Holz-HKW-ORC	23,4	4.615	-1343	3,9	3,5	-2,2	-6,7	1873,2
FB-KUP-Holz-BHKW	26,3	4.538	-203	1,2	1,5	4,4	-1,4	1073,8
FB-KUP-Holz-Mikro-GT-BHKW	24,7	2.706	-124	0,9	0,8	12,6	-1,1	1041,3
aZWS-KUP-Holz-BHKW	14,0	1.966	-224	1,1	1,1	2,4	-1,3	813,6
dZWS-KUP-Holz-GuD	13,1	1.908	272	1,4	1,8	9,6	0,9	534,7
dZWS-KUP-Holz-GuD-HKW	11,5	2.564	-32	1,4	1,6	10,2	-0,5	603,8
DV-KUP-Holz-BZ-MC-HKW	18,0	2.423	353	0,8	0,8	5,8	-0,3	634,6
DV-KUP-Holz-BZ-SO-HKW	17,2	-184	346	0,7	0,7	5,4	-0,2	587,6
Stroh								
Stroh-Mitverbr-Ko-KW	5,1	46	31	0,4	0,7	0,0	0,1	0,1
Stroh-Mitverbr-Ko-HKW	1,8	-471	-451	1,1	0,7	-0,7	-2,8	-0,1
Stroh-HKW-DM	11,7	180	-1455	3,7	2,7	-2,7	-6,8	-0,5
Stroh-HKW-ORC	11,7	-84	-1625	4,0	2,8	-3,0	-7,6	-0,7
Stroh-Syngas-GuD	8,7	312	140	0,6	1,0	8,4	0,4	2,4
Stroh-Syngas-BZ-MC-HKW	10,4	328	-20	0,1	0,1	9,3	-0,3	2,7
Stroh-Syngas-BZ-SO-HKW	10,0	334	0	0,1	0,1	8,7	-0,2	2,5

HS= Hackschnitzel; KW= Kraftwerk; KUP= Kurzumtriebsplantage; DM= Dampfmotor; ORC= Organic Rankine Cycle; FB= Festbett-Vergasung; GT= Gasturbine; BHKW= Blockheizkraftwerk; aZWS= atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD= Gas- und Dampfturbine; dZWS= druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; DV= Dampfvergasung; BZ= Brennstoffzelle; MC= Schmelzkarbonat (molten carbonate); SO= Festoxid (solid oxide); Syngas= Synthesegas; KWK-Systeme mit Gutschrift für Abwärme auf Basis Gas-Heizung, o. Kosten für Wärmenetze

Die Ergebnisse für *Altholz* zeigen, die Mitverbrennung in bestehenden Kraftwerken bzw. in neuen GuD-Anlagen (mit vorheriger Vergasung) eine relativ kostengünstige Option darstellen, aber eher wenig Beschäftigung und vergleichsweise niedrige Emissionsreduktionen erlauben. Die dezentrale Vergasung mit anschließender Nutzung des Gases in Gasmotoren oder Mikrogasturbinen ist sehr emissionsarm und beschäftigungsintensiv, führt aber zu den höchsten Kosten. Die Vergasung von Altholz mit anschließender Gasaufbereitung und Nutzung in Brennstoffzellen-HKW führt ähnlich wie die Druckwirbelschicht- und Dampfvergasung zu eher hohen Treibhausgasemissionen, da hier in der Vorkette ein erheblicher Eigenstrombedarf besteht, der aus dem Kraftwerksmix gedeckt wird.

Bei *Rest- und Schwachholz* zeigt die dezentrale Festbett-Vergasung mit nachfolgendem Gasmotor bzw. Mikro-Gasturbine wieder relativ hohe Kosten (und parallel viel Beschäftigung), während die atmosphärische Wirbelschicht-Vergasung mit Gasmotor-BHKW ähnlich geringe Kosten wie die anderen größeren Vergaser mit GuD bzw. GuD-Mitverbrennung erzielen, aber deutlich geringere Emissionen aufweist. Die Nutzung von Waldholz in ORC- und Dampfmotor-BHKW ist relativ emissionsarm und kostenmäßig im mittleren Bereich, während das Stirling-BHKW mit Holzpellets am teuersten abschneidet. Die Mitverbrennung von Waldholz in bestehenden Kraft- bzw. Heizkraftwerken ist demgegenüber wie beim Altholz zu vergleichsweise günstigen Kosten möglich, erzielt aber nur geringe Beschäftigungseffekte.

Die Nutzung von Synthesegas bzw. Produkten aus der Dampfvergasung von Waldholz in Brennstoffzellen führt zu mittleren Kosten und eher hohen Treibhausgasemissionen.

Die Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) bzw. *Miscanthus* sowie von Stroh folgt dieser Logik der Technologien, wobei jeweils die spezifischen Kostenverhältnisse und Bereitstellungsvorketten zu anderen Ergebnissen führen.

Tabelle 21 Datengrundlage zur Auswahl bei Strom aus fester Biomasse – Jahr 2030

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ kWh _{el}	Arbeit Pers./ TWh _{el}	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / kWh _{el}	Fläche m ² / MWh _{el}
Altholz								
Altholz-A1-4-KW	7,9	453	13	0,4	0,7	0,0	0,0	0,3
Altholz-A1/2-Mitverbr-Ko-KW	3,9	46	15	0,2	0,4	0,0	0,0	0,2
Altholz-HKW-DM	4,8	373	-1109	2,0	1,6	-2,2	-5,2	-0,3
Altholz-HKW-ORC	3,7	57	-1099	2,2	1,9	-3,5	-6,2	-0,5
FB-Altholz-A1/2-BHKW-GM	12,5	1.086	-225	0,4	0,4	3,9	-1,3	1,4
FB-Altholz-A1/2-BHKW-Mikro-GT	10,7	1.054	-163	0,1	0,1	8,5	-1,1	1,3
aZWS-Altholz-A1/2-BHKW	4,9	167	-239	0,3	0,3	1,7	-1,2	0,6
dZWS-Altholz-A1/2-GuD	6,9	252	159	0,4	0,6	6,3	0,5	1,7
Waldholz								
Waldholz-HS-Mitverbr-Ko-KW	5,3	85	27	0,3	0,5	0,0	0,1	0,1
Waldholz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	1,9	-326	-311	0,5	0,7	-0,5	-2,3	-0,1
Holz-Wald-HKW-DM	8,6	484	-1089	1,1	0,5	-2,2	-5,0	-0,3
Holz-Wald-HKW-ORC	8,0	187	-1294	1,2	0,5	-2,6	-6,0	-0,5
Holz-Pellet-HKW-Stirling	20,4	71	-776	1,1	1,4	1,9	-3,7	1,0
FB-Waldholz-BHKW	14,6	1.152	-214	0,4	0,5	3,5	-1,2	1,2
FB-Waldholz-Mikro-GT-BHKW	12,6	1.115	-152	0,2	0,2	8,1	-1,1	1,1
aZWS-Waldholz-BHKW	6,5	216	-225	0,5	0,9	1,7	-1,2	0,6
dZWS-Waldholz-GuD	8,2	292	172	0,5	0,7	6,3	0,5	1,8
dWSF-Waldholz-Mitverbr-GuD	7,2	244	170	0,5	0,7	6,3	0,5	1,8
dZWS-Waldholz-GuD-HKW	5,4	48	-109	0,4	0,4	6,5	-0,8	1,8
DV-Waldholz-BZ-MC-HKW	14,2	774	464	0,6	0,8	5,1	0,3	1,7
DV-Waldholz-BZ-SO-HKW	11,9	628	314	0,5	0,6	4,5	-0,2	1,5
Syngas-Waldholz-BZ-MC-BHKW	10,3	364	20	0,2	0,1	9,5	-0,2	2,6
Syngas-Waldholz-BZ-SO-BHKW	10,7	590	40	0,2	0,1	8,9	-0,1	2,5
KUP-Holz/Miscanthus								
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-KW	8,8	1.539	56	0,5	0,6	0,2	0,1	487,6
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	7,7	2.104	-280	0,8	0,9	-0,3	-2,2	814,9
KUP-Holz-HKW-DM	19,5	4.779	-987	2,8	2,2	-1,8	-4,8	1432,6
KUP-Holz-HKW-ORC	19,7	4.819	-1086	2,9	2,3	-1,9	-5,3	1522,0
FB-KUP-Holz-BHKW	21,0	3.739	-156	0,7	0,7	4,2	-1,1	867,6
FB-KUP-Holz-Mikro-GT-BHKW	18,6	3.509	-98	0,6	0,4	8,7	-1,0	802,5
aZWS-KUP-Holz-BHKW	11,5	2.229	-185	0,7	0,5	1,9	-1,1	675,0
dZWS-KUP-Holz-GuD	11,9	1.791	222	1,0	1,1	6,6	0,6	507,1
dZWS-KUP-Holz-GuD-HKW	9,5	1.714	-53	0,9	0,8	6,8	-0,7	563,2
DV-KUP-Holz-BZ-MC-HKW	15,0	2.283	185	0,6	0,5	4,6	-1,0	602,1
DV-KUP-Holz-BZ-SO-HKW	14,3	2.153	192	0,6	0,5	4,4	-0,9	559,1
Stroh								
Stroh-Mitverbr-Ko-KW	5,1	46	20	0,3	0,4	0,0	0,0	0,1
Stroh-Mitverbr-Ko-HKW	1,3	-391	-380	1,0	0,5	-0,5	-2,3	-0,1
Stroh-HKW-DM	9,1	362	-1180	2,7	1,8	-2,3	-5,4	-0,3
Stroh-HKW-ORC	8,8	125	-1298	2,8	1,9	-2,5	-6,0	-0,5
Stroh-Syngas-GuD	8,6	296	145	0,6	1,0	8,7	0,4	2,3
Stroh-Syngas-BZ-MC-HKW	10,2	316	11	0,1	0,1	9,5	-0,2	2,6
Stroh-Syngas-BZ-SO-HKW	9,9	340	31	0,1	0,1	8,9	-0,1	2,4

HS= Hackschnitzel; KW= Kraftwerk; KUP= Kurzumtriebsplantage; DM= Dampfmotor; ORC= Organic Rankine Cycle; FB= Festbett-Vergasung; GT= Gasturbine; BHKW= Blockheizkraftwerk; aZWS= atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD= Gas- und Dampfturbine; dZWS= druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; DV= Dampfvergasung; BZ= Brennstoffzelle; MC= Schmelzkarbonat (molten carbonate); SO= Festoxid (solid oxide); Syngas= Synthesegas; KWK-Systeme mit Gutschrift für Abwärme auf Basis Gas-Heizung, o. Kosten für Wärmenetze

Die Ergebnisse für den Technologiestand 2030 zeigen, dass wie bei den Biogas auch bei der Stromerzeugung aus festen Biomassen erhebliche Kostenreduktionspotenziale bestehen, die von einer Absenkung der Beschäftigungswirkung begleitet werden.

Die Emissionen von Luftschadstoffen können längerfristig weiter reduziert werden, während die Treibhausgasemissionen und die Einsparung nichterneuerbarer Primärenergie aufgrund der steigenden Stromkennzahlen leicht sinken. Der Flächenbedarf der Stromerzeugung aus Energiepflanzen (KUP, Miscanthus) kann ähnlich wie bei Biogas aus Energiepflanzen deutlich sinken, da die Erträge des Anbaus und die Gesamteffizienz der Lebenswege auch hier zunehmen.

Bei der Wärmebereitstellung zeigen die folgenden Tabellen die Lebenswegergebnisse der „nur-Wärme“-Technologien für Biomasse.

Tabelle 22 Datengrundlage zur Auswahl bei Wärme aus fester Biomasse – Jahr 2010

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ kWh _{th}	Arbeit Pers./ TWh _{th}	CO ₂ -Ä. g/kWh _{th}	SO ₂ -Ä. g/kWh _{th}	TOPP g/kWh _{th}	Asche g/kWh _{th}	KEV _{NE} kWh _{pri} / kWh _{th}	Fläche m ² / MWh _{th}
Holz								
Holzhackschnitzel-Hzg 10 kW	7,6	378	29,3	0,5	0,8	0,7	0,1	0,2
Holzhackschnitzel-Hzg 50 kW	6,2	289	28,9	0,5	0,8	0,7	0,1	0,2
Holz-Pellet-Hzg 10 kW	11,3	446	33,5	0,4	0,6	1,4	0,1	0,5
Holz-Pellet-Hzg 50 kW	10,9	420	33,0	0,4	0,5	1,4	0,1	0,5
Holz-Pellet-HW 0,5 MW mit Netz	8,3	796	39,8	0,4	0,5	1,9	0,1	0,8
Holz-HS-HW 1 MW mit Netz	5,4	340	33,0	0,4	0,5	1,3	0,1	0,7
Holz-HS-HW 5 MW mit Netz	5,4	357	31,8	0,4	0,5	1,3	0,1	0,7
Stroh/Getreide								
Stroh-Vergaser-Hzg	5,9	410	10,0	0,6	0,7	0,2	0,0	0,2
Stroh-Ballen HW 5 MW mit Netz	7,7	350	31,7	0,8	0,7	1,4	0,1	0,7
Getreide-Hzg	12,4	780	144,9	1,8	1,6	2,8	0,3	462,0
KUP-Pappel/Miscanthus								
KUP-Holz-Pellet-Hzg 10 kW	13,7	1.322	55,8	0,6	0,7	1,5	0,2	286,6
KUP-Holz-Pellet-Hzg 50 kW	13,2	1.277	54,8	0,6	0,7	1,5	0,2	280,1
KUP-Holz-Pellet-HW 0,5 MW+Netz	10,8	1.728	63,5	0,6	0,6	2,0	0,2	305,0
KUP-Holz-HW 1 MW mit Netz	7,0	1.275	51,5	0,6	0,6	1,4	0,2	315,9
KUP-Holz-HW 5 MW mit Netz	6,7	1.272	49,9	0,6	0,5	1,4	0,2	308,7
Miscanthus-HW 1 MW mit Netz	6,6	413	53,1	1,5	0,6	1,6	0,2	275,4
Miscanthus-HW 5 MW mit Netz	7,0	430	47,2	1,0	0,5	0,7	0,1	271,9

Hzg= Zentralheizung; HW = Heizwerk; HS= Hackschnitzel; KUP= Kurzumtriebsplantage

Die Kosten für Wärme aus biogenen Festbrennstoffen liegen bis 2010 in einer recht engen Bandbreite von 5-11 €cent/kWh_{th}, bei Wärme aus KUP steigt die obere Grenze bis gut 14 c/kWh_{th}. Beachtlich sind die hohen Werte für die Getreideverbrennung.

Der Vergleich der dezentralen Zentralheizungen mit Nahwärmesystemen belegt, dass schon 2010 Heizwerke für Holzhackschnitzel bzw. KUP-Holz deutlich günstigere Wärmekosten erlauben, auch wenn die Netzkosten einbezogen werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse für das Jahr 2030.

Tabelle 23 Datengrundlage zur Auswahl bei Wärme aus fester Biomasse – Jahr 2030

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ kWh _{th}	Arbeit Pers./ TWh _{th}	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / kWh _{th}	Fläche m ² / MWh _{th}
Holz								
Holzhackschnitzel-Hzg 10 kW	7,5	348	28,7	0,4	0,6	0,8	0,1	0,2
Holzhackschnitzel-Hzg 50 kW	6,2	265	28,3	0,4	0,6	0,8	0,1	0,2
Holz-Pellet-Hzg 10 kW	11,5	421	36,3	0,4	0,5	1,6	0,1	0,5
Holz-Pellet-Hzg 50 kW	11,1	396	35,8	0,4	0,4	1,6	0,1	0,5
Holz-Pellet-HW 0,5 MW mit Netz	8,7	786	44,3	0,4	0,4	2,2	0,1	0,8
Holz-HS-HW 1 MW mit Netz	5,5	328	35,6	0,4	0,4	1,6	0,1	0,7
Holz-HS-HW 5 MW mit Netz	4,8	342	33,3	0,4	0,4	1,6	0,1	0,7
Stroh/Getreide								
Stroh-Vergaser-Hzg	6,0	405	10,0	0,4	0,3	0,3	0,0	0,2
Stroh-Ballen HW 5 MW mit Netz	7,7	339	32,6	0,7	0,7	1,6	0,1	0,7
Getreide-Hzg	12,4	780	144,9	1,8	1,6	2,8	0,3	462,0
KUP-Pappel/Miscanthus								
KUP-Holz-Pellet-Hzg 10 kW	14,1	1.277	58,1	0,5	0,6	1,7	0,2	280,1
KUP-Holz-Pellet-Hzg 50 kW	13,7	1.234	57,1	0,5	0,5	1,7	0,1	273,9
KUP-Holz-Pellet-HW 0,5 MW+Netz	11,4	1.697	67,5	0,5	0,5	2,3	0,2	298,3
KUP-Holz-HW 1 MW mit Netz	7,2	1.232	53,5	0,5	0,4	1,6	0,1	305,2
KUP-Holz-HW 5 MW mit Netz	7,0	1.231	52,3	0,5	0,4	1,6	0,1	298,4
Miscanthus-HW 1 MW mit Netz	6,8	399	54,4	1,4	0,4	1,8	0,1	266,0
Miscanthus-HW 5 MW mit Netz	7,3	418	45,8	1,0	0,5	0,8	0,1	265,7

Hzg= Zentralheizung; HW = Heizwerk; HS= Hackschnitzel; KUP= Kurzumtriebsplantage

Wiederum können z.T. beachtliche Kostensenkungen erreicht und die Emissionen reduziert werden, womit die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Öl und Erdgas steigen wird.

Die Datenbasis für die Technologieauswahl im Bereich *biogener Kraftstoffe* zeigt die folgende Übersicht zu den Lebenswegresultaten.

Hier ist zu beachten, dass bei den Kosten und Beschäftigungswirkungen nur die Bereitstellung und Nutzung der Kraftstoffe in den Pkw, *nicht* jedoch die Herstellung und Unterhaltung der Pkw sowie der Straßen, Parkplätze usw. einbezogen wurden.

Zudem wurden in den Lebenswegen auch Gutschriften in den Bereitstellungsvorketten für Nebenprodukte angerechnet, dies entspricht dem Vorgehen der „Netto“-Bilanzierung bei Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung.

Tabelle 24 Datengrundlage zur Auswahl bei biogenen Kraftstoffen – Jahr 2010

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ P*km	Arbeit Pers./ Mrd. P*km	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / P*km	Fläche m ² / P*km
			g/P*km					
Dieselmotor								
Rapsöl	2,5	186	92,6	0,7	0,4	0,4	0,1	0,4
Rapsöl-öko	3,3	544	14,0	0,1	0,4	0,3	0,0	0,8
SB-Öl	2,5	225	59,5	0,5	0,5	0,4	0,1	0,4
SB-Öl-öko	3,3	623	37,5	0,3	0,7	0,4	0,1	0,9
RME	4,8	193	42,4	0,7	0,3	-2,1	-0,1	0,4
RME-öko	6,4	554	-37,1	0,0	0,3	-2,1	-0,1	0,9
SME	4,8	216	9,6	0,4	0,4	-2,1	-0,1	0,4
SME-öko	6,4	617	-12,6	0,2	0,6	-2,0	-0,1	0,9
BtL-Triticale	10,5	603	-4,0	0,7	0,5	-6,5	-0,2	0,3
BtL-Triticale-öko	12,4	801	-73,8	0,2	0,5	-6,6	-0,3	0,6
Ottomotor								
Bio-EtOH, Weizen	13,7	160	121,6	0,9	0,9	0,4	0,3	0,2
Bio-EtOH, Weizen-öko	15,3	369	75,2	0,6	0,9	0,4	0,3	0,6
Bio-EtOH, ZR	13,8	164	128,8	1,0	1,0	-0,7	0,3	0,2
Bio-MeOH, Waldholz	3,1	43	-50,2	0,7	1,8	-0,1	-0,3	0,0
Bio-MeOH, KUP-Holz	7,7	183	-69,8	0,8	2,0	-9,6	-0,3	0,7
BtL-Waldholz	7,2	54	20,7	0,2	0,4	0,0	0,1	0,0
BtL-KUP-Holz	9,0	147	-69,0	0,2	0,3	-7,5	-0,4	0,5
BtL-Miscanthus	9,1	159	-66,0	0,2	0,3	-7,3	-0,3	0,4

Daten inkl. Gutschriften für Nebenprodukte in den Bereitstellungsvorketten, ohne Kosten für die Pkw

Tabelle 25 Datengrundlage zur Auswahl bei biogenen Kraftstoffen – Jahr 2030

Stoffstromgruppe/ Technologie	Kosten €cent/ P*km	Arbeit Pers./ Mrd. P*km	CO ₂ -Ä.	SO ₂ -Ä.	TOPP	Asche	KEV _{NE} kWh _{pri} / P*km	Fläche m ² / P*km
			g/P*km					
Dieselmotor								
Rapsöl	2,8	140	91,2	0,7	0,4	0,4	0,1	0,3
Rapsöl-öko	3,8	395	10,8	0,1	0,3	0,3	0,0	0,6
SB-Öl	3,8	177	57,8	0,5	0,4	0,4	0,1	0,3
SB-Öl-öko	3,8	485	33,3	0,3	0,6	0,5	0,1	0,7
RME	5,5	145	40,4	0,6	0,3	-2,1	-0,1	0,3
RME-öko	5,5	403	-40,9	0,0	0,3	-2,2	-0,1	0,7
SME	5,5	166	7,3	0,4	0,4	-2,1	-0,1	0,3
SME-öko	7,3	477	-17,4	0,2	0,5	-2,0	-0,1	0,7
BtL-Triticale	8,5	417	32,3	0,7	0,5	-2,5	0,0	0,2
BtL-Triticale-öko	10,2	524	-21,1	0,2	0,5	-2,6	0,0	0,3
Ottomotor								
Bio-EtOH, Weizen	14,3	123	120,6	0,9	0,9	0,4	0,3	0,2
Bio-EtOH, Weizen-öko	16,1	272	73,8	0,6	0,9	0,4	0,2	0,4
Bio-EtOH, ZR	14,6	150	125,1	1,0	1,0	-0,9	0,3	0,2
Bio-MeOH, Waldholz	2,9	39	-30,2	0,3	1,2	-0,1	-0,2	0,0
Bio-MeOH, KUP-Holz	6,9	175	2,1	0,5	1,3	0,1	-0,1	0,6
BtL-Waldholz	4,9	36	-29,1	0,1	0,3	-3,0	-0,1	0,0
BtL-KUP-Holz	7,6	125	-8,0	0,3	0,4	-3,0	0,0	0,4
BtL-Miscanthus	7,7	134	-7,0	0,3	0,4	-2,8	0,0	0,3

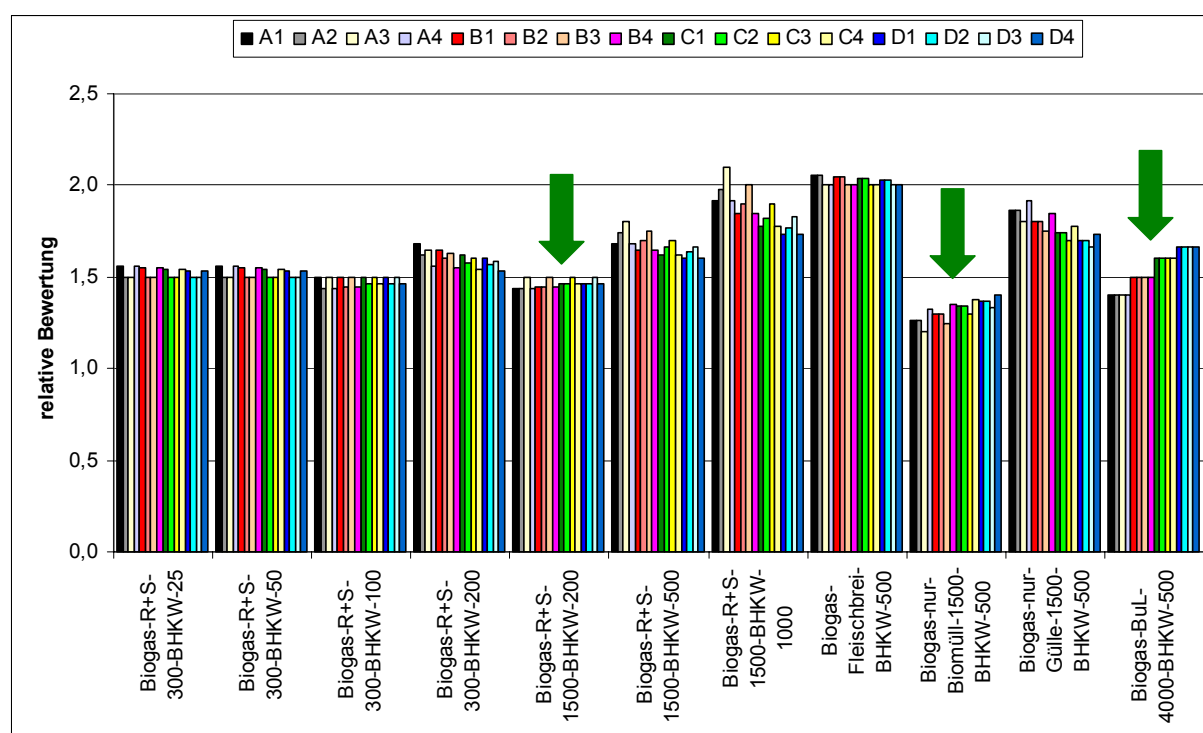
Daten inkl. Gutschriften für Nebenprodukte in den Bereitstellungsvorketten, ohne Kosten für die Pkw

4.3 Ergebnisse der Technologieauswahl

Mit den vorstehenden Resultaten der Lebenswegbilanzen und der im Kapitel 4.1 dargestellten Methodik erfolgte die Technologieauswahl für die Zeitpunkte 2010 und 2030 für die jeweiligen Stoffstromgruppen bei der biogenen Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung.

Im folgenden werden die Ergebnisse für die Gewichtungsvariationen A1-D4 bezogen auf das Jahr 2030 grafisch dargestellt³² und jeweils die für die Szenarien ausgewählten Technologien durch einen grünen Pfeil markiert.

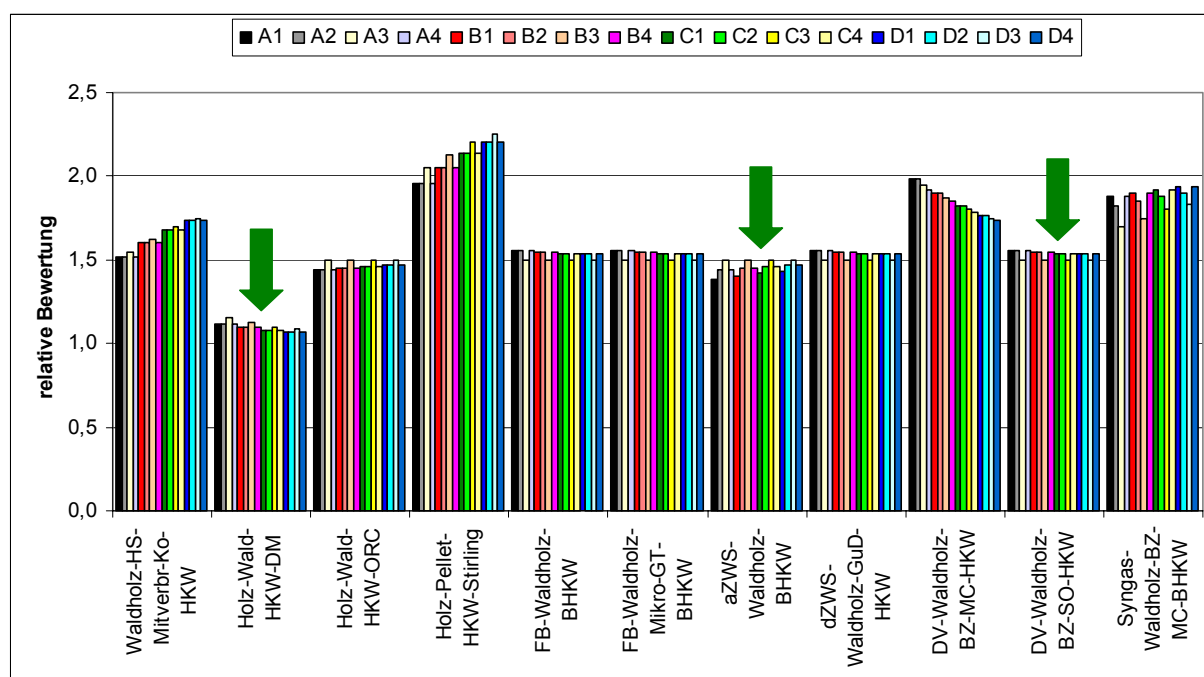
Bild 17 Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus Biogas (2030)



Bei der Strom- und Wärmebereitstellung aus Biogas sind die drei günstigsten bewertungsrobusten Technologien mit einem grünen Pfeil markiert. Der mittelgroße Biogas-Fermenter (1500 m³) mit 200-kW_{el}-BHKW, der entsprechende Fermenter für Biogas aus Biomüll mit einem 500-kW_{el}-BHKW und ein ebensolches für Biogas aus einem großen (4000 m³) Fermenter für Biomüll und Landschaftspflegeschnitt (als Kosubstrat) sind die Technologien, die bei den Gülle- und Biomüll-Stoffströmen vergleichsweise stabile Ergebnisse im jeweils oberen Drittel der Gesamtbewertung aufweisen.

³² Die gesamte Bandbreite der Ergebnisse zur Technologieauswahl inklusive der Resultate für das Jahr 2010 sind in einer Excel-Arbeitsmappe enthalten, die zusammen mit den anderen EDV-Werkzeugen auf der Projekt-CDROM verfügbar ist.

Bild 18

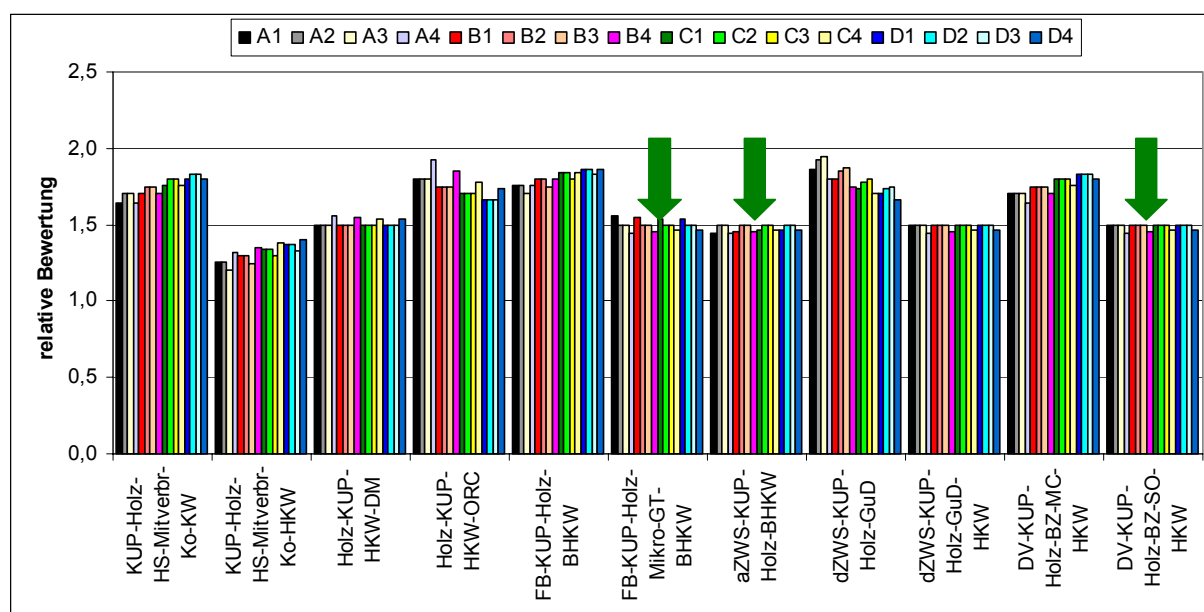
Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus Waldholz (2030)


Beim Waldholz sind das Dampfmotor-BHKW für Hackschnitzel und das Gasmotor-BHKW mit atmosphärischer Vergasung in zirkulierender Wirbelschicht sowie das Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW mit Dampfvergasung die bewertungsrobusten günstigen Optionen.

Die relativen Unterschiede zu den „nächstbesten“ Optionen mit ORC-Prozessen sowie den Gasmotor- und Mikrogasturbinen-BHKW mit vorgeschalteter Festbettvergasung sind im Jahr 2030 zwar klein, aber in den – hier nicht dargestellten - Ergebnissen für das Jahr 2010 deutlich größer.

Das Brennstoffzellen-BHKW wurde dabei auch deshalb einbezogen, um eine derzeit noch vergleichsweise spekulative Technologie mit hohem langfristigem Potenzial in den Szenarien zu berücksichtigen.

Bild 19 Ergebnis der Auswahlvarianten für Strom aus KUP-Holz (2030)



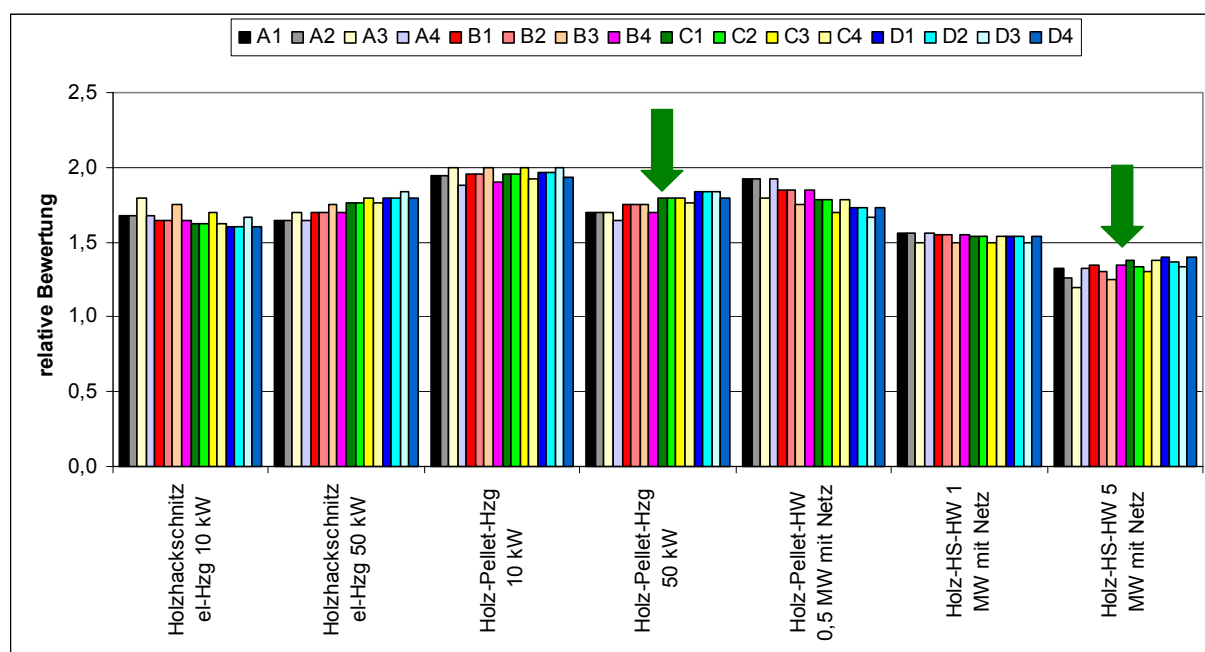
Beim Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind die Gasmotor-BHKW mit vorgeschalteter Festbettvergasung und mit atmosphärischer Vergasung in zirkulierender Wirbelschicht sowie wiederum das Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW mit Dampfvergasung die bewertungsrobusten günstigen Optionen.

Die Mitverbrennung wurde hier nicht als Option ausgewählt, da sie aufgrund der in den Szenarien deutlich sinkenden Zahl mittelgroßer Kohle-Heizkraftwerke nur eine „Übergangstechnologie“ darstellt, also kein langfristiges eigenes Entwicklungspotenzial aufweist³³.

³³ In den Szenarien wurde bei der Stromerzeugung im Zeitraum von 2010-2020 die Mitverbrennung in Kohle-HKW im Rahmen des Szenarios BIOMASSE (vgl. Kapitel 6.4.3) berücksichtigt.

Bild 20

Ergebnis der Auswahlvarianten für Wärme aus Waldholz (2030)



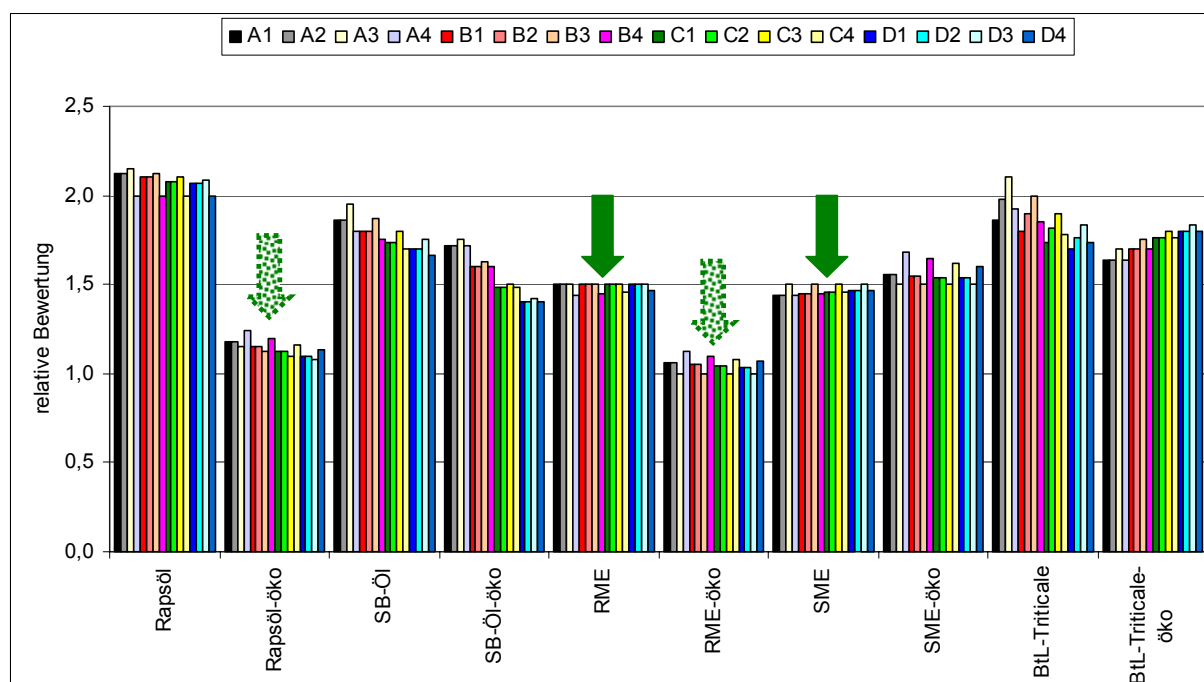
Bei der *reinen Wärmebereitstellung* aus Waldholz schneidet die mittlere Pellet-Heizung sowie Nahwärme aus großen Holz-Hackschnitzel-Heizwerken am günstigsten ab, wobei sich die Auswahl zwischen den kleineren ($10 \text{ kW}_{\text{th}}$) und mittleren ($50 \text{ kW}_{\text{th}}$) Pellet-Heizungen auf die geringeren absoluten Werte der Emissionen und Kosten begründet.

Nicht grafisch dargestellt sind die Ergebnisse der Auswahl für Wärme aus Stroh – hier zeigte sich, dass die größere Teilvergaser-Heizung und das größere Stroh-Heizwerk bewertungsrobuste Optionen darstellen.

Bei der Auswahl der Technologien für die *biogenen Kraftstoffe* wird zwischen solchen für Diesel- und Ottomotor-Fahrzeugen unterschieden.

Bei den Kraftstoffen für Dieselmotoren zeigt sich folgendes Ergebnis.

Bild 21 Ergebnis der Auswahlvarianten für Dieselmotor-Kraftstoffe (2030)



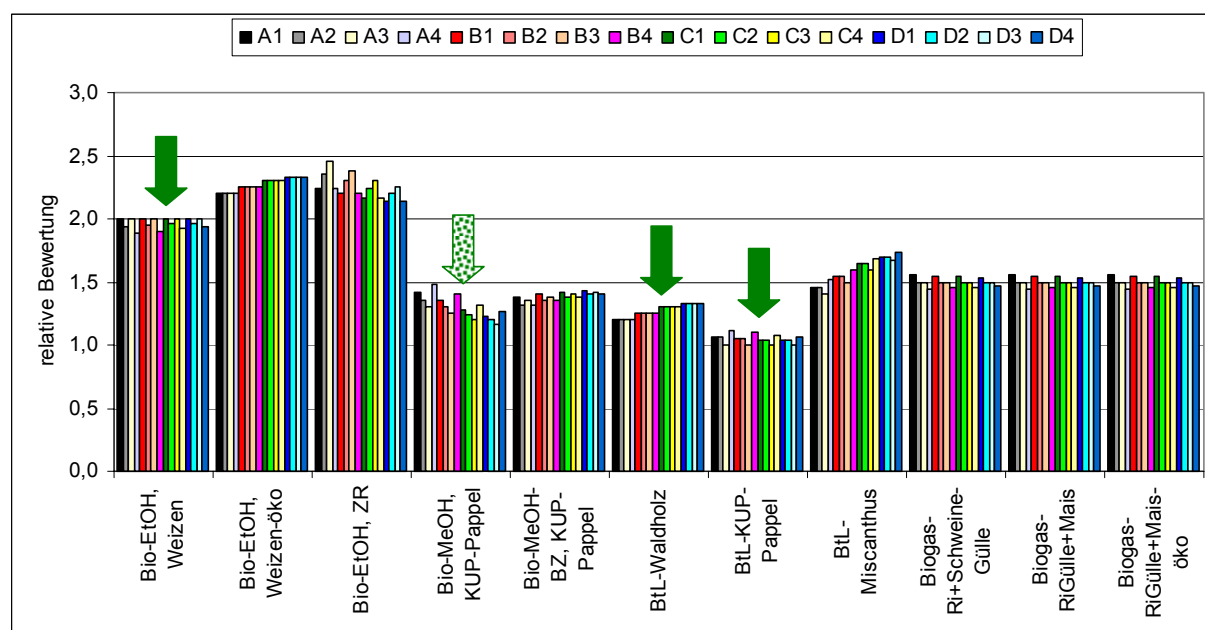
Am günstigsten und zugleich bewertungsrobust wären die Optionen „Rapsöl aus ökologischem Anbau“ sowie die „RME-Bereitstellung aus ökologischem Anbau“ (gepunktete grüne Pfeile).

Da diese Optionen jedoch einen sehr hohen spezifischen Flächenbedarf aufweisen und so die mögliche Menge an Kraftstoffen bei gegebenen Flächenpotenzialen für den Energiepflanzenanbau (vgl. Kapitel 5.7.4) gegenüber den anderen Optionen stark einschränken würden, ergab die Technologieauswahl die „nächstbesten“ Kandidaten RME bzw. SME als bewertungsrobuste günstige Optionen³⁴.

Die Ergebnisse für die biogenen Kraftstoffe für Ottomotor-Pkw zeigt die folgende Grafik.

³⁴ In den Szenarien wurde aufgrund dieser Ergebnisse eine Variante des UMWELT-Szenarios (vgl. Kapitel 6.2.2) gerechnet, bei der die biogene Kraftstoffbereitstellung nur aus Prozessketten mit ökologischem Anbau erfolgt. Diese Variante zeigt den Umfang der entsprechenden Nutzungsrestriktion für biogene Kraftstoffe.

Bild 22

Ergebnis der Auswahlvarianten für Ottomotor-Kraftstoffe (2030)


Bei den biogenen Ottokraftstoffen sind bis 2030 die Optionen „BtL aus KUP“ sowie „BtL aus Waldholz“ die günstigsten robusten Systeme, die „nächstbesten“ wären dann die Bereitstellung von Biomethanol aus KUP-Holz bzw. dessen Nutzung in Brennstoffzellen-Fahrzeugen.

Die Technologiedaten für die Biomethanolbereitstellung erscheinen jedoch vor allem in Kostenhinsicht insgesamt nicht belastbar genug und wurden deshalb nicht für die Szenarien ausgewählt.

Die Kraftstoffe aus Biogas wären weitere Kandidaten, die jedoch aufgrund der relativ geringen Potenziale an Reststoffen einerseits und – bei Biogas aus Energiepflanzen wie Mais – aus Gründen des Naturschutzes andererseits ausgeschlossen wurden.

Ebenso wurde Miscanthus als potenzielles Eingangsstoff für BtL aus Naturschutzgründen abgewertet, so dass sich als dritte robuste Technologie für biogene Ottokraftstoffe die – teurere – Option „Bioethanol aus Weizen“ ergibt.

Die in diese Auswahl stark eingehenden Aspekte des Naturschutzes beim Anbau von Energiepflanzen, die auch später bei den Szenarien interessieren, werden im Folgenden näher ausgeführt.

4.4 Qualitative Naturschutzfragen beim Energiepflanzenanbau

Bei den Energiepflanzen sind neben den direkt quantifizierbaren Umwelt- und Kostenaspekten sowie der Beschäftigung auch Naturschutzfragen für eine Strategie zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse wichtig, da die entsprechenden Anbauflächen potenziell starke Auswirkungen auf den Natur- und Landschaftsschutz haben können.

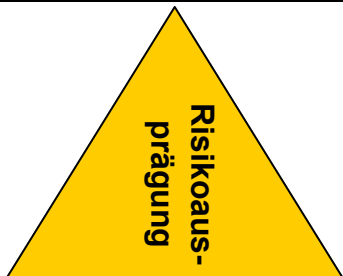
Hierzu wurde im Projekt auf Ergebnisse eines parallel laufenden Forschungsvorhabens des BfN zurückgegriffen, das sich speziell mit Naturschutzfragen bei der Biomassenutzung auseinandersetzt (vgl. IFEU/IUS 2004).

Wesentlich für die Auswahl von Prozessen zum Anbau von Energiepflanzen aus Sicht des Natur- und Landschaftsschutzes ist eine Matrix, die das genannte Projekt für verschiedene mögliche Energiepflanzenkulturen erstellt und die in der folgenden Tabelle wiedergegeben sind.

Tabelle 26 Änderung des Risikos von Wirkungen auf Natur und Landschaft bei Kulturarten im Vergleich zur Rotationsbrache sowie quantifizierte Umweltaspekte beim Energiepflanzenanbau und daraus resultierende Bewertung

Risiko für Natur/ Landschaft	Weizen	Triticale	Raps	Sonnenblume	Mais	Zucker- rübe
Erosion	A	A	B	C	D	E
Schadverdichtungen	A	A	A	A	C	E
Eutrophierung	A	A	B	B	C	B
Belastung mit PSM	A	A	C	A	C	A
Belastung Grundwasser	A	A	B	B	C	B
Belastung Oberflächengewässer	A	A	B	C	C	C
Verlust von Lebensräumen bzw. Artenvielfalt	B	B	A	A	B	B
Quantifizierte Umweltaspekte	Relative Bewertung					
CO ₂ -Äquivalent-Emissionen	-	-	+	+/-	-	+/-
SO ₂ -Äquivalent-Emissionen	-	-	+	+/-	-	+
Flächenbedarf	-	-	+/-	+	-	+/-
Relative Bewertung						
Natur + Umwelt gesamt	1	1	2	2	2-3	3

Erläuterungen:

Kategorien für Natur und Landschaft	Symbole für Umweltaspekte	Gesamtbewertung
A B C D E 	- = gering +/- = moderat + = hoch (jeweils relativ in Zeilen)	1 = günstig 2 = mittel 3 = ungünstig

Quelle: obere Matrix zu Risiken für Natur/ Landschaft nach IFEU/IUS (2004), untere Matrizen zu quantifizierten Umweltaspekten und zur Gesamtbewertung nach eigenen Arbeiten im Projekt

Die obere Risikomatrix wurde dabei im Rahmen des Projekts durch die untere relative Bewertung der quantifizierten Umweltaspekte und eine nachfolgende Gesamtbewertung ergänzt.

Daraus ergibt sich, dass die einjährigen Kulturen Weizen und Triticale am günstigsten abschneiden, während die Ölpflanzen Raps und Sonnenblume eine mittlere Bewertung erhalten. Mais steht dann zwischen den Ölpflanzen und dem als ungünstig bewerteten Zuckerrübenanbau.

Bei dieser Bewertung ist anzumerken, dass die relative Gewichtung sowohl der Risiken für Natur und Landschaft (obere Matrix)³⁵ als auch die der quantifizierten Umweltaspekte subjektive Wertungen darstellen.

Weiterhin ist anzumerken, dass bei den mehrjährigen Kulturen wie Pappeln oder Weiden im Kurzumtrieb bzw. Energiegräsern wie *Miscanthus* aus Sicht des Natur- und Landschaftsschutzes eine Präferenz für heimische Arten besteht und diese wiederum tendenziell als weniger risikoreich als annuelle Kulturen eingestuft werden.

Die im Projekt aus Sicht der Beschäftigung und geschlossener Stoffkreisläufe interessant erscheinende Option des Energiepflanzenanbaus in sog. *Feuchtgutlinien* konnte bislang nicht explizit unter Natur- und Landschaftsschutzaspekten gewürdigt werden. Hier ist allerdings ein hohes Potenzial an Synergie zu vermuten, da diese Anbauoption weitestgehend ohne Pestizideinsatz auskommt und ein sehr breites Spektrum von annuellen Kulturen einsetzen kann.

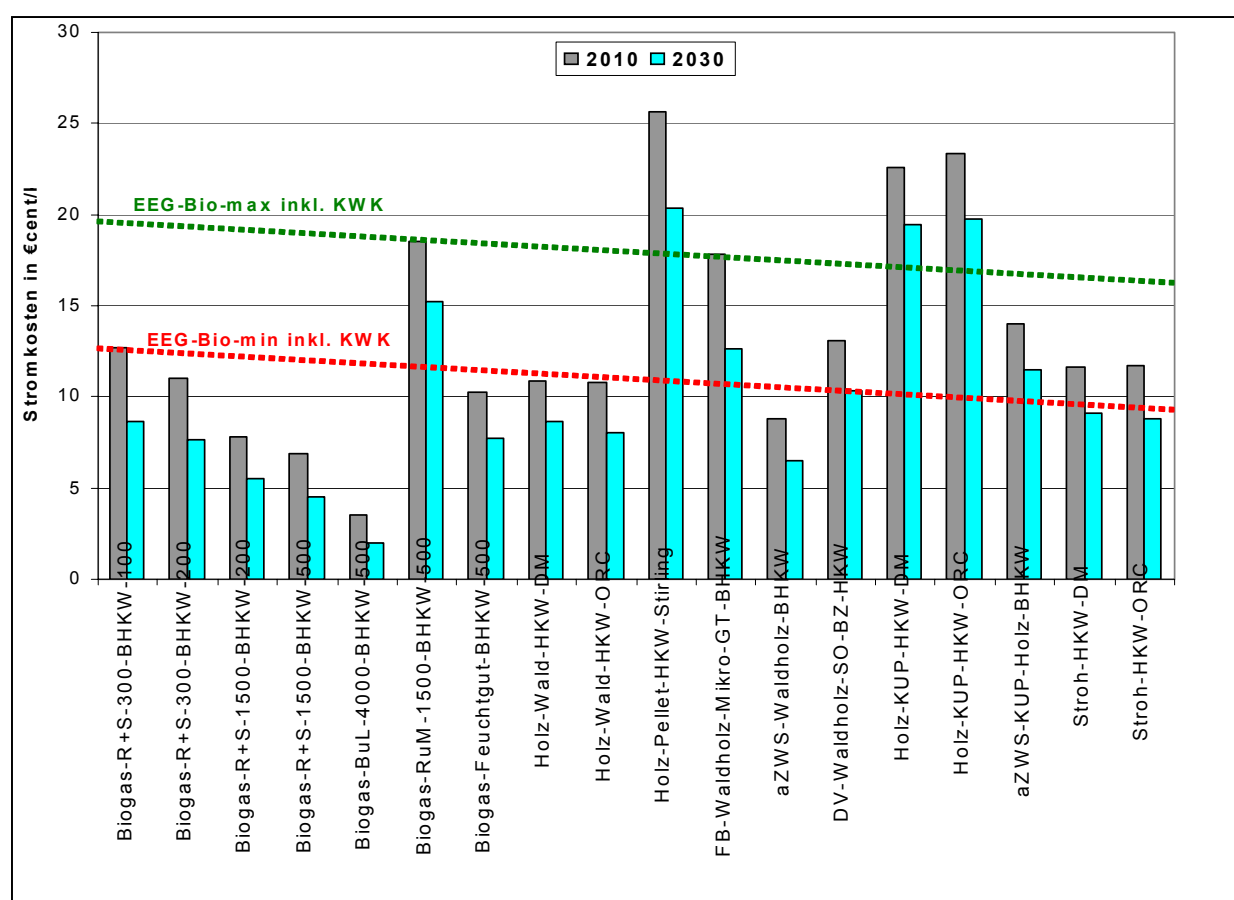
³⁵ Die Risikobewertung von IFEU/IUS (2004) stützte sich dabei auf eine Expertenumfrage.

4.5 Vergleich der Stromerzeugungskosten mit dem EEG

Mit den Daten zu Lebenswegbilanzen der biogenen Stromerzeugung, die für die Technologieauswahl berechnet wurden, kann auch ein Vergleich der Kosten mit den Vergütungssätzen der Erneuerbare-Energien-Gesetzes-Novelle vom August 2004 erfolgen.

Die Ergebnisse eines solchen Vergleichs zeigt die folgende Grafik für die Jahre 2010 und 2030.

Bild 23 Vergleich der Erzeugungskosten ausgewählter biogener Stromsysteme mit den Vergütungssätzen der EEG-Novelle



Angaben für alle Prozesse einheitlich für Neuanlagen, 7% Kapitalzins (real); EEG-Vergütung inklusive Bonus für KWK, Degression der Vergütungssätze von 2005 bis 2030 im Verlauf der Linien angedeutet (Datenstand zur EEG-Novelle: Beschluss des Dt. Bundestags vom 2. April 2004).

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht, dass die Novelle des EEG für die meisten der hier dargestellten Technologien zur biogenen Stromerzeugung mehr als kostendeckende Vergütungen erlaubt wird und so eine *erhebliche Anschubwirkung* zu erwarten ist.

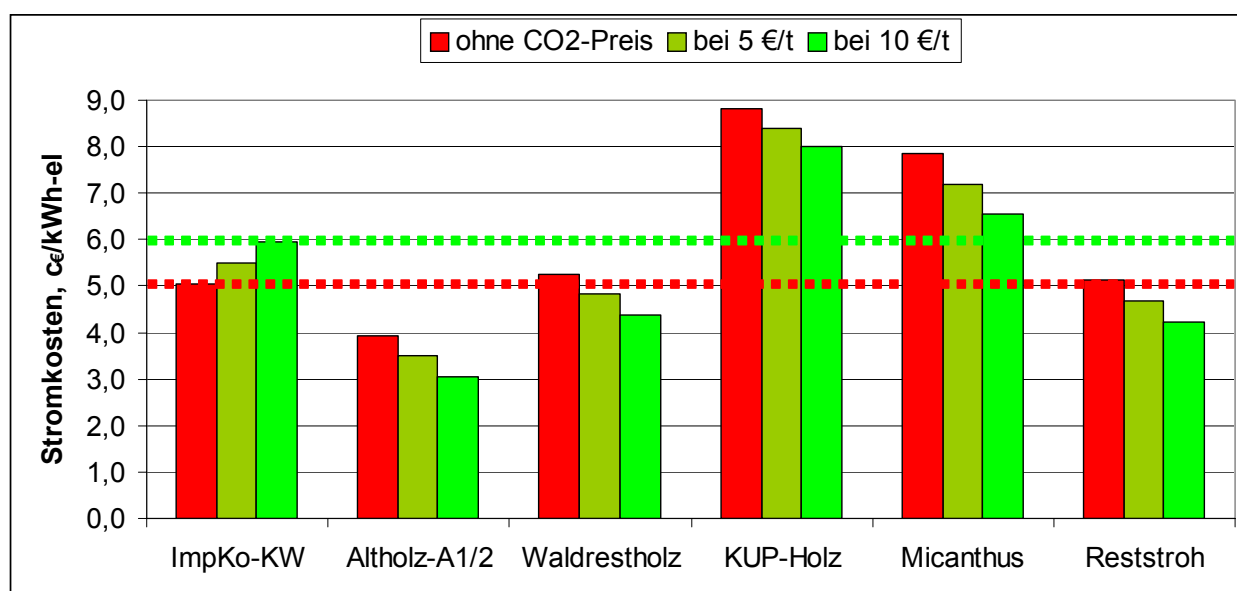
Es zeigt sich aber auch, dass einige Technologien (z.B. Stirling) und Stoffströme (insb. KUP) noch weiterer Förderung bedürfen, um für Privatbetreiber wirtschaftlich zu werden.

4.6 Mögliche Effekte des Emissionshandels auf die Biomasse

Neben dem EEG ist der *Emissionshandel* ein neues Instrument, das die energetische Biomassenutzung indirekt fördern kann. Dies gilt insbesondere für die Stoffströme und Technologien, die nicht im EEG einbezogen sind – aus Sicht der Technologieauswahl ist dies vor allem die Mitverbrennung.

Um die mögliche Förderwirkung des Emissionshandels für die Mitverbrennung zu quantifizieren, wurde im Projekt die Kostenwirkung für verschiedene biogene Festbrennstoffe im Jahr 2010 berechnet, wobei eine Bandbreite von 5 bis 10 € je Tonne vermiedenen CO₂ angesetzt wurde. Das Ergebnis zeigt die folgende Grafik.

Bild 24 Vergleich der Erzeugungskosten ausgewählter biogener Mitverbrennungssysteme bei Vergütung der CO₂-Einsparung durch den Emissionshandel



Angaben für alle Prozesse einheitlich für Neuanlagen, 7% Kapitalzins (real); Kostenbasis Jahr 2010

Gegenüber den Stromkosten aus einem neuen Importsteinkohlekraftwerk würden sich die Stromgestehungskosten für Waldholz und Stroh schon bei CO₂-Preisen um 5 €/t günstiger darstellen.

Für die Energiepflanzen KUP und Miscanthus wäre allerdings der Anreiz auch bei 10 €/t noch nicht groß genug - der CO₂-Handel ist für diese längerfristigen Optionen somit kein ausreichendes Anreizinstrument.

Kurzfristig könnte der Emissionshandel jedoch die Nutzung von Waldholz und Stroh befördern und so den Aufbau entsprechender Logistiksysteme befördern.

4.7 Die Rolle der Einspeisung biogener Gase in Netze

Neben den Technologien zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus Bioenergie interessiert zunehmend auch eine weitere technische Option, die eine verstärkte energetische Biomassenutzung unterstützen soll: die *Einspeisung* von biogenen Gasen in Erdgasnetze.

Dieses Konzept verfolgt die Idee, analog zum EEG mit seiner Vergütung der regenerativen Stromeinspeisung in Netze von Stromunternehmen nun auch die Einspeisung von biogenen Gasen in die Netze von Gasversorgungsunternehmen durch besondere Vergütungssätze zu fördern. Als Begründung wird meist angeführt, dass viele biogene Gase relativ verbraucherfern anfallen bzw. erzeugt werden und damit die Nutzung von z.B. Abwärme bei der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung schwierig wäre. Zudem könne dezentral anfallendes Biogas oft nur in kleineren Anlagen mit vergleichsweise geringen Nutzungsgraden und höheren Kosten Verwendung finden. Wird Biogas nun so aufbereitet, dass es der Qualität von Erdgas entspricht, könnte es über die vorhandenen Erdgasnetze zu allen Verbrauchern bzw. gezielt zu größeren (KWK-)Anlagen an günstigen Standorten transportiert werden.

Zur Beantwortung der Frage, ob biogene Gaseinspeisung zu den interessanten Technologien zu zählen ist, wurden entsprechende Datensätze für eine dezentrale Gasaufbereitung (1 MW_{th} Gasleistung) und eine mittelgroße Variante (4 MW_{th} Gasleistung) erstellt und in Vergleichsrechnungen die Lebenswegbilanzen für Kosten und Emissionen bestimmt. Als Datengrundlage wurde eine Untersuchung des BEI (2004) verwendet und die dortigen Daten überprüft.

Für die dezentrale Gasaufbereitung wurde eine kleinere Biogasanlage mit 300-m³-Fermenter und einem Modellmix von Rinder- und Schweinegülle mit Erntereststoffen als Kosubstrat angenommen, für die mittelgroße Anlage eine entsprechende Biogasanlage mit 1500 m³ Fermentervolumen. Die Fortschreibung der Kenndaten bis zum Jahr 2030 erfolgte über die im Kapitel 3 dargestellten Lernkurven.

Auf dieser Basis ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Ergebnisse.

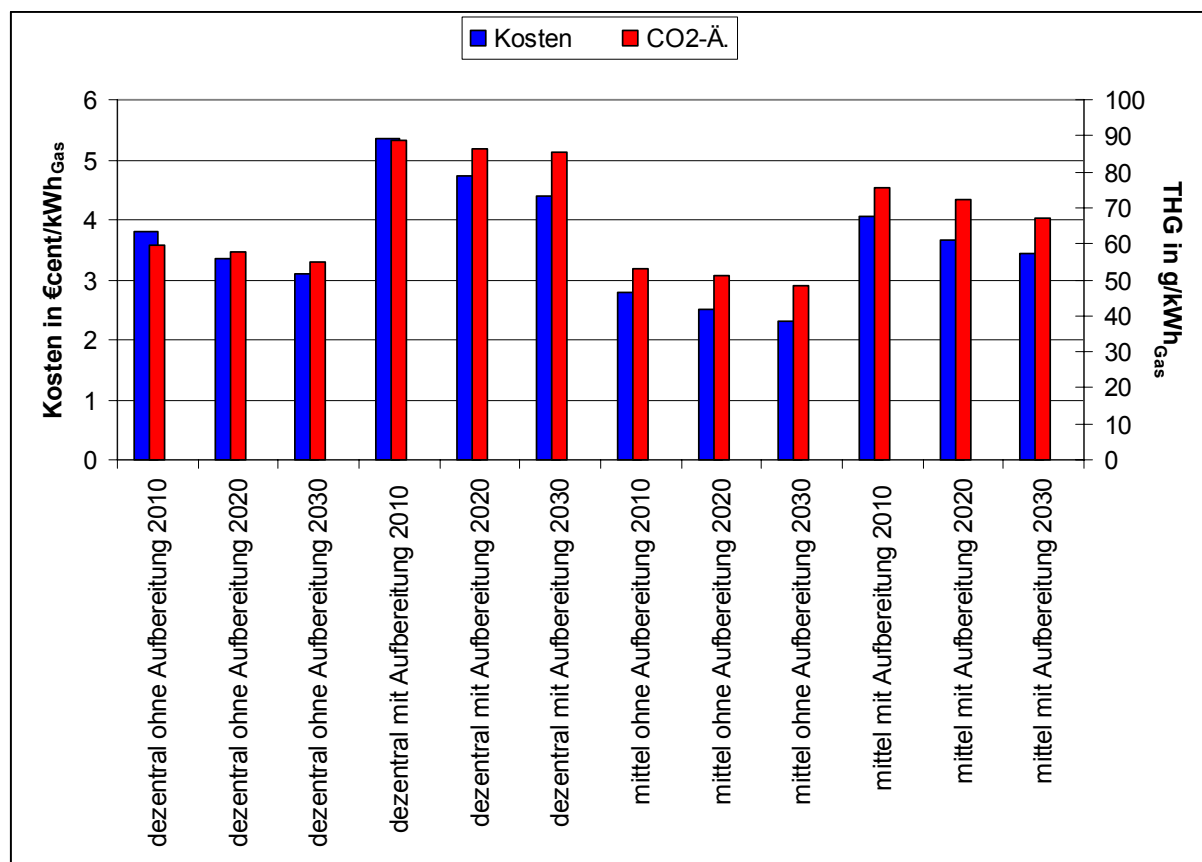
Tabelle 27 Lebenswegbilanzen für die Biogasaufbereitung zur Einspeisung in Netze

	Kosten	Arbeit	CO ₂ - Ä.	SO ₂ - Ä.	TOPP- Ä.	Asche	KEV _{NE}	Fläche
Option	€cent/ kWh _{Gas}	Pers./ GWh _{Gas}	g/kWh _{Gas}				kWh _{pri} / kWh _{Gas}	m ² / MWh _{Gas}
dezentral o. Aufbereitung 2010	3,8	0,4	59,8	0,3	0,5	1,4	0,2	0,7
dezentral o. Aufbereitung 2020	3,4	0,3	57,6	0,3	0,4	1,4	0,2	0,7
dezentral o. Aufbereitung 2030	3,1	0,3	54,9	0,2	0,4	1,4	0,2	0,6
dezentral + Aufbereitung 2010	5,4	0,5	88,6	0,3	0,5	3,3	0,3	1,3
dezentral + Aufbereitung 2020	4,7	0,4	86,2	0,3	0,4	3,4	0,3	1,2
dezentral + Aufbereitung 2030	4,4	0,3	85,5	0,3	0,4	3,4	0,3	1,2
mittel o. Aufbereitung 2010	2,8	0,3	53,0	0,3	0,4	1,0	0,2	0,7
mittel o. Aufbereitung 2020	2,5	0,2	51,0	0,3	0,4	1,0	0,2	0,6
mittel o. Aufbereitung 2030	2,3	0,2	48,1	0,2	0,4	1,0	0,2	0,6
mittel + Aufbereitung 2010	4,1	0,3	75,4	0,3	0,5	2,5	0,3	1,1
mittel + Aufbereitung 2020	3,7	0,2	72,4	0,3	0,4	2,5	0,2	1,0
mittel + Aufbereitung 2030	3,4	0,2	67,3	0,3	0,4	2,3	0,2	0,9

Lebenswegergebnisse nur für die Bereitstellung des Biogases (d.h. ohne seine Nutzung)

Dies zeigt die folgende Grafik nochmals für Kosten und Treibhausgasemissionen.

Bild 25 Kosten und Treibhausgase bei der Aufbereitung von Biogas zur Netzeinspeisung



Lebenswegergebnisse nur für die Bereitstellung des Biogases (d.h. ohne seine Nutzung)

Die Gasaufbereitung erfordert gegenüber der reinen Bereitstellung von Biogas sowohl bei der dezentralen wie auch der mittelgroßen Biogasanlage Mehrkosten von ca. 1,5 €/kWh_{Gas} und Mehremissionen von CO₂-Äquivalenten 30 g/kWh_{Gas}.

Diesem Zusatzaufwand müsste nun ein entsprechend höherer Nutzen als bei der direkten Verwendung des nicht aufbereiteten Biogases gegenüberstehen, um die Gasaufbereitung als günstige Option auszuweisen.

Zur Prüfung dieser Frage wurden nun ergänzende Lebenswegbilanzen ermittelt, denen folgende Annahmen zugrunde liegen:

- Die *direkte* Biogasnutzung erfolgt im dezentralen Fall mit Klein-BHKW (25 kW_{el}), im mittelgroßen Fall mit einem 200 kW_{el}-BHKW: Im Fall (a) erhalten alle BHKW erhalten die *volle* Wärmegutschrift, im Fall (b) wird bei jeweils *nur die Hälfte* der Wärmegutschrift angenommen.
- Bei der dezentralen bzw. mittelgroßen Aufbereitung des Biogases zur Gaseinspeisung wird mit einem großen BHKW (1000 kW_{el}) bzw. einem GuD-HKW (50 MW_{el}) gerechnet.

Die Ergebnisse der entsprechenden Lebenswegbilanzen zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 28 Vergleich von Kosten und Treibhausgasemissionen von KWK-Varianten mit und ohne Biogas-Aufbereitung zur Netzeinspeisung

Option	Daten für 2010		Daten für 2030	
	CO ₂ -Ä. g/kWh _{el}	Kosten €cent/kWh _{el}	CO ₂ -Ä. g/kWh _{el}	Kosten €cent/kWh _{el}
Biogas-BHKW 25 kW direkt (a)	-329	14,0	-279	10,0
Biogas-BHKW 25 kW direkt (b)	-59	16,6	-54	12,6
Biogas-BHKW 200 kW direkt (a)	-296	11,0	-225	7,6
Biogas-BHKW 200 kW direkt (b)	-52	13,3	-38	9,9
Biogas-BHKW 1 MW + Aufbereitung	-116	13,5	-87	9,6
Biogas-GuD-HKW + Aufbereitung	-100	8,8	-95	6,3

(a) = bei voller Wärmegutschrift; (b) bei nur 50% Wärmegutschrift

Es zeigt sich sehr klar, dass die dezentrale Aufbereitung zur Gaseinspeisung *nur dann* günstiger ist als die direkte Nutzung, wenn so der Biogaseinsatz in sehr kleinen BHKW ersetzt werden könnte, die nur einen Teil der Wärmegutschrift realisieren. Bei mittleren BHKW-Größen ist die direkte Nutzung der Aufbereitung solange überlegen, wie ca. $\frac{3}{4}$ der potenziellen Wärmegutschrift realisiert werden kann. Bis 2010 sind die Kosten der dezentralen Gasaufbereitung aber selbst dann höher, wenn das mittlere BHKW nur 50% der Wärmegutschrift erhielte.

Für den Fall der großen Gasaufbereitung + Nutzung des Biogases in einem 50-MW_{el}-GuD-HKW ließen sich bis 2010 deutlich günstigere Kosten als bei der direkten Nutzung erzielen, bis 2030 würde dieser Abstand aber gegenüber der direkten Nutzung sinken. Bei der Treibhausgasbilanz wäre die große Aufbereitung + GuD-HKW dann der direkten Nutzung überlegen, wenn diese deutlich weniger als 75 % der Wärmegutschrift erzielen.

Die Annahme, dass die große Aufbereitung von Biogas zu seiner Nutzung in einem GuD-Heizkraftwerk führen wird und dafür *keine* Transportkosten anfallen ist extrem günstig und stellt eine fiktive Grenzsituation dar. Realiter würden wohl Transitkosten von mindestens 1 €cent/kWh_{Gas} angerechnet werden müssen, womit die Kostenvorteile der Biogasaufbereitung sich in Mehrkosten gegenüber der dezentralen Nutzung wandeln würden.

Damit ist die Biogasaufbereitung und Einspeisung in Netze als eine wichtige und sinnvolle Option *für die Fälle* zu werten, in denen keine oder nur eine geringe Abwärmenutzung bei der Verstromung von Biogas möglich ist. Eine generelle Aufbereitung von Biogas und Einspeisung in Gasnetze hätte demgegenüber keine erkennbaren Umwelt- oder Kostenvorteile.

4.8 Sensitivitätsanalyse für die Technologie-Auswahl

Naturgemäß sind die Lebenswegergebnisse der Biomasse-Technologien mit Unsicherheiten behaftet, die im Folgenden für ausgewählte ökonomische Aspekte dargestellt werden. Als relevante Parameter für die Sensitivitätsanalyse wurde der Kapitalzins für die Finanzierung der Investitionen sowie die Wärmegutschrift variiert, da diese den größten Einfluss auf die Ergebnisse haben³⁶. Aufgrund der großen Bedeutung der Strom- und Wärmebereitstellung für die künftige energetische Biomassenutzung wird diese Sensitivitätsbetrachtung am Beispiel der biogenen Stromerzeugung und Systemen mit Kraft-Wärme-Kopplung durchgeführt.

4.8.1 Sensitivität der berechneten Kosten für Kapitalzins-Änderungen

Bei der Berechnung der Kosten der Biomasse-Technologien gehen die Investitionskosten über eine annuitätische Berechnung mit ein, wobei die Kapitalkosten u.a. vom angesetzten Zinssatz für die Kapitalbeschaffung beeinflusst werden. Die folgenden Tabellen zeigen diesen Einfluss auf die Stromgestehungskosten der Biomasse-Technologien zur Stromerzeugung, da diese Technologien relativ gesehen die höchsten Kapitalkostenanteile aufweisen.

Tabelle 29 Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei biogenen Gasen

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Zinssatz für Kapital			Zinssatz für Kapital		
	4%	7%	12%	4%	7%	12%
Option						
Biogas-R+S-300-BHKW-25	13,0	14,0	16,0	9,1	10,0	11,6
Biogas-R+S-300-BHKW-50	13,2	14,2	16,2	9,2	10,1	11,6
Biogas-R+S-300-BHKW-100	11,9	12,7	14,2	8,0	8,6	9,8
Biogas-R+S-300-BHKW-200	10,3	11,0	12,4	7,1	7,6	8,7
Biogas-R+S-1500-BHKW-200	7,2	7,8	9,0	5,1	5,5	6,4
Biogas-R+S-1500-BHKW-500	6,4	6,9	7,8	4,1	4,5	5,3
Biogas-R+S-1500-BHKW-1000	6,0	6,5	7,3	4,3	4,6	5,3
Biogas-Fleischbrei-BHKW-500	13,3	14,7	17,2	11,3	12,6	14,8
Biogas-nur-Biomüll-1500-BHKW-500	6,8	8,1	10,6	4,9	5,9	7,8
Biogas-nur-Gülle-1500-BHKW-500	8,1	9,6	12,3	6,8	8,1	10,5
Biogas-BuL-4000-BHKW-500	3,0	3,5	4,6	1,5	2,0	2,8
Biogas-RuM-1500-BHKW-500	18,0	18,5	19,4	14,8	15,2	16,0
Biogas-RuM-öko-1500-BHKW-500	23,5	24,0	24,9	19,5	19,9	20,7
Biogas-Feuchtgut-BHKW-500	9,0	10,2	12,5	6,8	7,7	9,6
Klärgas-BHKW-50	-0,1	0,3	1,1	-0,3	0,1	0,9
Klärgas-BHKW-200	-1,3	-1,1	-0,7	-1,4	-1,2	-0,8
Klärgas-BHKW-1000	-1,2	-1,1	-0,8	-1,4	-1,2	-0,9
Deponiegas-BHKW-50	2,7	3,1	3,9	2,2	2,7	3,4
Deponiegas-BHKW-200	0,4	0,7	1,3	0,1	0,3	0,7
Deponiegas-BHKW-1000	0,1	0,3	0,6	-0,2	0,0	0,3

R+S = Rinder- und Schweinegülle; BHKW = Blockheizkraftwerk; BuL = Biomüll und Landschaftspflegeschnitt; RuM = Rindergülle und Mais; RuM-öko = Rindergülle und Mais aus ökologischem Anbau; die Zahlen am Ende der Optionen-Bezeichnung verweisen auf die elektrische Leistung; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, ohne Kosten für Wärmenetze

³⁶ Die Brennstoffkosten sind ebenfalls ein wesentlicher Parameter, wurden aber im Projekt als für alle Szenarien gleich angesetzt.

Tabelle 30 Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei Wald- und Altholz

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Zinssatz für Kapital			Zinssatz für Kapital		
Option	4%	7%	12%	4%	7%	12%
Altholz-A1-4-KW	7,2	8,0	9,4	6,7	7,4	8,6
Altholz-A1/2-Mitverbr-Ko-KW	3,9	3,9	4,0	3,9	3,9	4,0
Altholz-HKW-DM	5,5	6,8	9,4	3,7	4,8	7,0
Altholz-HKW-ORC	4,4	6,1	9,4	2,3	3,7	6,5
FB-Altholz-A1/2-BHKW-GM	15,7	17,0	19,5	11,6	12,5	14,2
FB-Altholz-A1/2-BHKW-Mikro-GT	14,5	15,6	17,7	10,1	10,7	11,9
aZWS-Altholz-A1/2-BHKW	6,6	7,2	8,3	4,5	4,9	5,7
dZWS-Altholz-A1/2-GuD	7,9	8,5	9,6	6,4	6,9	7,6
dZWS-Altholz-A1/2-Mitverbr-GuD	7,0	7,5	8,3	5,5	5,9	6,5
DV-Altholz-A1/2-MC-BZ-HKW	11,4	12,1	13,4	10,5	11,1	12,2
DV-Altholz-A1/2-SO-BZ-HKW	11,1	11,8	13,0	10,1	10,7	11,7
Holz-Wald-HS-Mitverbr-Ko-KW	5,2	5,3	5,4	5,2	5,3	5,4
Holz-Wald-HS-Mitverbr-Ko-HKW	1,9	2,0	2,1	1,8	1,9	2,0
Holz-Wald-HKW-DM	9,6	10,9	13,3	7,5	8,6	10,7
Holz-Wald-HKW-ORC	9,2	10,8	13,9	6,6	8,0	10,6
Holz-Pellet-HKW-Stirling	24,0	25,6	28,4	19,2	20,4	22,5
FB-Waldholz-BHKW	17,9	19,3	21,7	13,7	14,6	16,3
FB-Waldholz-Mikro-GT-BHKW	16,7	17,8	19,9	12,0	12,6	13,8
aZWS-Waldholz-BHKW	8,2	8,8	9,9	6,1	6,5	7,3
dZWS-Waldholz-GuD	9,1	9,6	10,8	7,8	8,2	9,0
dWSF-Waldholz-Mitverbr-GuD	8,4	8,8	9,7	6,9	7,2	7,8
dZWS-Waldholz-GuD-HKW	6,8	7,5	8,7	4,9	5,3	6,1
DV-Waldholz-MC-BZ-HKW	14,8	15,5	16,8	13,6	14,2	15,3
DV-Waldholz-SO-BZ-HKW	12,4	13,1	14,4	11,4	11,9	13,0
Syngas-Waldholz-BZ-MC-BHKW	9,8	10,5	12,0	9,6	10,3	11,7
Syngas-Waldholz-BZ-SO-BHKW	10,6	11,4	12,8	10,1	10,7	11,9

KW = Kraftwerk; DM = Dampfmotor; ORC = Organic Rankine Cycle; FB = Festbett-Vergasung; BHKW = Blockheizkraftwerk; GM = Gasmotor; GT = Gasturbine; aZWS = atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD = Gas- und Dampfturbine; dZWS = druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; DV = Dampfvergasung; BZ = Brennstoffzelle; MC = Schmelzkarbonat (molten carbonate); SO = Festoxid (solid oxide); HKW = Heizkraftwerk; Syngas = Synthesegas; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, ohne Kosten für Wärmenetze

Tabelle 31 Sensitivität der Stromkosten für Kapitalzinsänderungen bei KUP-Holz, Miscanthus und Stroh

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Zinssatz für Kapital			Zinssatz für Kapital		
Option	4%	7%	12%	4%	7%	12%
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-KW	8,8	8,8	8,9	8,8	8,8	9,0
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	7,5	7,6	7,7	7,7	7,7	7,9
Holz-KUP-HKW-DM	21,2	22,6	25,1	18,3	19,5	21,7
Holz-KUP-HKW-ORC	21,8	23,4	26,4	18,3	19,7	22,3
FB-KUP-Holz-BHKW	25,0	26,3	28,8	20,1	21,0	22,7
FB-KUP-Holz-Mikro-GT-BHKW	23,6	24,7	26,7	17,9	18,6	19,8
aZWS-KUP-Holz-BHKW	13,5	14,0	15,1	11,1	11,5	12,2
dZWS-KUP-Holz-GuD	12,5	13,1	14,2	11,5	11,9	12,7
dZWS-KUP-Holz-GuD-HKW	10,7	11,4	12,6	9,0	9,4	10,2
DV-KUP-Holz-BZ-MC-HKW	17,3	18,0	19,3	14,4	15,0	16,1
DV-KUP-Holz-BZ-SO-HKW	16,5	17,2	18,5	13,7	14,3	15,3
Miscanthus-Mitverbr-Ko-HKW	7,8	7,8	8,0	7,2	7,3	7,4
Stroh-Mitverbr-Ko-KW	5,1	5,1	5,2	5,1	5,1	5,2
Stroh-Mitverbr-Ko-HKW	1,7	1,8	1,9	1,2	1,3	1,4
Stroh-HKW-DM	10,1	11,7	14,6	7,8	9,1	11,6
Stroh-HKW-ORC	9,9	11,7	15,3	7,2	8,8	11,8
Stroh-Syngas-GuD	8,2	8,7	9,7	8,1	8,6	9,5
Stroh-Syngas-BZ-MC	9,6	10,4	11,8	9,5	10,2	11,5
Stroh-Syngas-BZ-SO	9,3	10,0	11,4	9,2	9,9	11,3

HS = Hackschnitzel; KW = Kraftwerk; KUP = Kurzumtriebsplantage; HKW = Heizkraftwerk; DM = Dampfmotor; ORC = Organic Rankine Cycle; FB = Festbett-Vergasung; GT = Gasturbine; BHKW = Blockheizkraftwerk; aZWS = atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD = Gas- und Dampfturbine; dZWS = druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; DV = Dampfvergasung; BZ = Brennstoffzelle; MC = Schmelzkarbonat (molten carbonate); SO = Festoxid (solid oxide); Syngas = Synthesegas; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, ohne Kosten für Wärmenetze

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass mit Ausnahme der ORC- und DM-Prozesse sowie der FB-BHKW die meisten der Biomasse-Technologien vergleichsweise wenig sensibel auf Änderungen des Kapitalzins reagieren, da sie i.d.R. höhere Brennstoff- und Betriebskostenanteile aufweisen.

4.8.2 Sensitivität der berechneten Kosten für die KWK-Wärmegutschrift

Als zweite Unsicherheit für die Ergebnisse zu den Kosten der Biomasse-Technologien ist im Bereich der Stromerzeugung mit KWK-Anlagen die Anrechnung einer Gutschrift für die ausgekoppelte und genutzte Abwärme zu sehen, da hier je nach Randbedingung (Wärmeabsatz, Verfügbarkeit von Wärmenetzen, Auslastung) mehr oder weniger günstige Situationen auftreten können.

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse für die Stromkosten biogener KWK-Systeme, wenn die Gutschrift für ausgekoppelte Wärme entsprechend variiert wird.

Tabelle 32 Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei biogenen Gasen

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]			Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]		
Option	1,5	2,8	4,0	1,9	3,5	5,0
Biogas-R+S-300-BHKW-25	16,4	14,0	11,9	12,4	10,0	7,7
Biogas-R+S-300-BHKW-50	16,7	14,2	11,9	12,4	10,1	7,9
Biogas-R+S-300-BHKW-100	14,7	12,7	10,8	10,8	8,6	6,6
Biogas-R+S-300-BHKW-200	13,1	11,0	9,0	9,7	7,6	5,7
Biogas-R+S-1500-BHKW-200	10,0	7,8	5,9	7,6	5,5	3,6
Biogas-R+S-1500-BHKW-500	8,6	6,9	5,3	6,3	4,5	2,9
Biogas-R+S-1500-BHKW-1000	8,1	6,5	5,0	6,2	4,6	3,1
Biogas-Fleischbrei-BHKW-500	16,4	14,7	13,1	14,3	12,6	10,9
Biogas-nur-Biomüll-1500-BHKW-500	9,9	8,1	6,5	7,6	5,9	4,2
Biogas-nur-Gülle-1500-BHKW-500	11,3	9,6	7,9	9,8	8,1	6,4
Biogas-BuL-4000-BHKW-500	5,3	3,5	1,9	3,7	2,0	0,3
Biogas-RuM-1500-BHKW-500	20,3	18,5	16,9	17,0	15,2	13,5
Biogas-RuM-öko-1500-BHKW-500	25,8	24,0	22,4	21,7	19,9	18,3
Biogas-Feuchtgut-BHKW-500	12,0	10,2	8,6	9,5	7,7	6,1
Klärgas-BHKW-50	2,7	0,3	-1,9	2,5	0,1	-2,1
Klärgas-BHKW-200	0,9	-1,1	-3,0	0,8	-1,2	-3,1
Klärgas-BHKW-1000	0,5	-1,1	-2,5	0,4	-1,2	-2,7
Deponiegas-BHKW-50	5,5	3,1	0,9	5,0	2,7	0,5
Deponiegas-BHKW-200	2,8	0,7	-1,3	2,3	0,3	-1,6
Deponiegas-BHKW-1000	1,9	0,3	-1,2	1,6	0,0	-1,5

R+S= Rinder- und Schweinegülle; BHKW= Blockheizkraftwerk; BuL= Biomüll und Landschaftspflegeschutt; RuM= Rindergülle und Mais; RuM-öko= Rindergülle und Mais aus ökologischem Anbau; Zahlen am Ende der Optionen-Namen sind el. Leistung; KWK-Systeme mit Wärmegutschrift Basis Gas-Heizung, o. Wärmenetzkosten

Tabelle 33 Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei Wald- und Altholz

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]			Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]		
Option	1,5	2,8	4,0	1,9	3,5	5,0
Altholz-A1/2-Mitverbr-Ko-HKW	2,6	-0,1	-2,6	2,5	-0,4	-3,1
Altholz-HKW-DM	13,1	6,8	1,1	11,2	4,8	-1,1
Altholz-HKW-ORC	13,7	6,1	-0,9	11,2	3,7	-3,3
FB-Altholz-A1/2-BHKW-GM	18,8	17,0	15,3	14,3	12,5	10,8
FB-Altholz-A1/2-BHKW-Mikro-GT	17,6	15,6	13,8	12,5	10,7	9,0
aZWS-Altholz-A1/2-BHKW	8,7	7,2	5,7	6,5	4,9	3,4
DV-Altholz-A1/2-BZ-MC-HKW	12,1	12,1	12,1	11,9	11,1	10,3
DV-Altholz-A1/2-BZ-SO-HKW	11,8	11,8	11,8	11,3	10,7	10,1
Holz-Wald-HS-Mitverbr-Ko-HKW	4,7	2,0	-0,5	4,8	1,9	-0,8
Holz-Wald-HKW-DM	17,0	10,9	5,2	14,9	8,6	2,8
Holz-Wald-HKW-ORC	18,3	10,8	3,9	15,4	8,0	1,1
Holz-Pellet-HKW-Stirling	30,5	25,6	21,1	25,1	20,4	15,9
FB-Waldholz-BHKW	21,1	19,3	17,6	16,4	14,6	12,9
FB-Waldholz-Mikro-GT-BHKW	19,8	17,8	16,0	14,5	12,6	10,9
aZWS-Waldholz-BHKW	10,3	8,8	7,3	8,1	6,5	5,0
dZWS-Waldholz-GuD-HKW	8,9	7,5	6,1	6,9	5,3	3,8

Ko= Steinkohle; HKW= Heizkraftwerk; DM= Dampfmotor; ORC= Organic Rankine Cycle; FB= Festbett-Vergasung; BHKW= Blockheizkraftwerk; GM= Gasmotor; GT= Gasturbine; aZWS= atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD= Gas- und Dampfturbine; dZWS= druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; DV= Dampfvergasung; BZ= Brennstoffzelle; MC= Schmelzkarbonat (molten carbonate); SO= Festoxid (solid oxide); HKW= Heizkraftwerk; Syngas= Synthesegas; KWK-Systeme mit Wärmegutschrift auf Basis Gas-Heizung, o. Wärmenetzkosten

Tabelle 34 Stromkostensensitivität für Wärmegutschriftänderungen bei für KUP-Holz, Miscanthus und Stroh

Kosten [€cent/kWh _{el}] bei	Jahr 2010			Jahr 2030		
	Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]			Wärmegutschrift [€cent/kWh _{th}]		
Option	1,5	2,8	4,0	1,9	3,5	5,0
KUP-Holz-HS-Mitverbr-Ko-HKW	10,3	7,6	5,0	10,6	7,7	5,0
KUP-Holz-HKW-DM	28,7	22,6	16,9	25,7	19,5	13,6
KUP-Holz-HKW-ORC	30,2	23,4	17,1	26,5	19,7	13,3
FB-KUP-Holz-BHKW	28,2	26,3	24,7	22,8	21,0	19,3
FB-KUP-Holz-Mikro-GT-BHKW	26,7	24,7	22,8	20,4	18,6	16,9
aZWS-KUP-Holz-BHKW	15,6	14,0	12,6	13,1	11,5	10,0
dZWS-KUP-Holz-GuD-HKW	12,8	11,4	10,0	11,0	9,4	7,9
Miscanthus-Mitverbr-Ko-HKW	10,6	7,8	5,3	10,2	7,3	4,6
Stroh-Mitverbr-Ko-HKW	4,5	1,8	-0,8	4,2	1,3	-1,4
Stroh-HKW-DM	18,4	11,7	5,5	15,8	9,1	2,8
Stroh-HKW-ORC	19,2	11,7	4,8	16,1	8,8	1,9

KUP = Kurzumtriebsplantage; HS = Hackschnitzel; Ko= Steinkohle; HKW = Heizkraftwerk; DM = Dampfmotor; ORC = Organic Rankine Cycle; FB = Festbett-Vergasung; GT = Gasturbine; BHKW = Blockheizkraftwerk; aZWS = atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; GuD = Gas- und Dampfturbine; dZWS = druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung; Daten für KWK-Systeme mit Gutschrift für genutzte Abwärme auf Basis Gas-Heizung, ohne Kosten für Wärmenetze

Es zeigt sich deutlich, dass vor allem die Stromkosten der DM-, ORC- und Stirling-Prozesse stark von der Höhe der Wärmegutschrift abhängen, da diese Systeme eine relativ geringe Stromkennzahl aufweisen und damit relativ viel Abwärme bereitstellen, für die eine Wärmegutschrift angerechnet wird. Mit Blick auf das Jahr 2030 reduziert sich diese Empfindlichkeit aufgrund höherer Stromkennzahlen.

Die Gasmotor- und Mikrogasturbinen-BHKW sowie insbesondere die KWK-Prozesse mit GuD und Brennstoffzellen sind demgegenüber vergleichsweise „robust“ – da sie insgesamt thermodynamisch hochwertiger ausgelegt sind und so je kWh Strom nur relativ wenig Abwärme bereitstellen, wirkt sich die Variation der angerechneten Wärmegutschrift auch entsprechend schwächer aus.

5 Potenziale zur energetischen Biomassenutzung

Neben der Frage, welche Technologien künftig zur energetischen Biomassenutzung zur Verfügung stehen und attraktiv sind, ist es für die Erstellung von Szenarien wichtig zu wissen, *wie viel Energie* aus Biomasse *unter welchen Bedingungen* zur Verfügung stehen kann. Im Folgenden wird dieser Frage durch die Bestimmung technischer Energiepotenziale der verschiedenen Biomasse-Stoffströme nachgegangen.

5.1 Fragestellung und Methodik der Potenzialanalysen

Für die Potenziale sind die unterstellten Systemgrenzen wichtig, d.h. die Abgrenzung des Untersuchungsraums, die parallel auch für die Szenarien gilt.

Generell wurde bei der Potenzialanalyse für Biomasse-Reststoffe ein *Vorrang der stofflichen Nutzung* angenommen, da die so genutzten Biomassen in der Regel wiederum als biogene Reststoffe bzw. Abfälle (z.B. organische Anteile von Hausmüll) verfügbar sind.

Dabei erfolgt für die Stoffstrompotenziale stets auch ein kurzer Ergebnisvergleich mit anderen Arbeiten, wobei insbesondere die Arbeit von Kaltschmitt/Thrän (2003) herangezogen wird.

5.1.1 Zum Potenzialbegriff im Projekt

Die Bestimmung von Potenzialen bedarf der Definition von Systemgrenzen und Randbedingungen. Daher verwendet die Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen zu Energiepotenzialen Potenzialbegriffe, die durch Adjektive – z.B. „theoretisch“, „technisch“ „wirtschaftlich“ konkretisiert werden. Hierzu zählen insbesondere (Kaltschmitt/Thrän 2003):

Das *theoretische* Potenzial an Bioenergieträgern ergibt sich aus dem physikalischen Angebot der Biomasse und stellt damit eine theoretische Obergrenze des verfügbaren Energieangebots dar. Wegen grundsätzlich unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken, die z.B. auch der vielfältigen Optionen der stofflichen Biomassenutzung Rechnung tragen, kann das theoretische Potenzial nur zu sehr geringen Anteilen erschlossen werden und ist deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit des erneuerbaren Energieangebots hier nicht relevant.

Das *technische* Potenzial beschreibt demgegenüber den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der *derzeitigen* technischen Möglichkeiten nutzbar ist. Im Einzelnen werden bei der Berechnung die verfügbaren Nutzungstechniken, ihre Wirkungsgrade, die Verfügbarkeit von Standorten auch im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen sowie „unüberwindbare“ strukturelle, ökologische (z. B. Naturschutzgebiete) und weitere nicht-technische Beschränkungen berücksichtigt.

Unter dem *wirtschaftlichen* Potenzial wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der im Kontext der gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Um die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des betrachteten Energieträgers bzw. -systems zu beurteilen, sind die innerhalb der jeweiligen Einsatzbereiche konkurrierenden anderen Energiebereitstellungssysteme heranzuziehen. Das wirtschaftliche Potenzial zur Nutzung regenerativer Energien wird damit sowohl von den konventionellen Energiesystemen als auch den Energieträgerpreisen beeinflusst.

Das *erschließbare* Potenzial beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag, es ist in der Regel zumindest zeitweise geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da dieses im Allgemeinen nicht sofort und vollständig nur sehr langfristig (z. B. wegen begrenzter Herstellungskapazitäten oder mangelnder Information) erschließbar ist. Das erschließbare Potenzial kann aber auch größer als das wirtschaftliche sein, wenn beispielsweise der betreffende Energieträger subventioniert wird (z. B. Markteinführungsprogramm).

5.1.2 Potenziale in Szenarien

Für die meisten Energieträger sind technische Potenziale *auch in Szenarien sinnvoll verwendbar*, da sich z.B. die geologischen Bedingungen für fossile und geothermale Lagerstätten, die meteorologisch-klimatischen Bedingungen für Solar- und Windenergie sowie die geo- und orografischen Verhältnisse für Wasserkraft nur sehr wenig ändern und daher bei Szenariozeiträumen unter 50 Jahren als statisch angesehen werden können³⁷. Szenarien für solche Energieträger bestehen daher im Wesentlichen aus Annahmen *zur Umsetzung der technischen Potenziale* und der entsprechenden Technologien.

Die Potenziale für Bioenergie können sich aber im Zeitverlauf wandeln, wenn sich ihre Randbedingungen ändern – sie müssen daher *dynamisch* ermittelt werden. Dazu erfolgte im Projekt die Definition und Ausformung von Szenarien (vgl. Kapitel 6), die eine Anpassung der Potenziale an die zeitliche Entwicklung (Dynamik) gestatten und folgende *externe Faktoren* berücksichtigen können:

- Energetisch nutzbare biogene Reststoffe sind stark an die land-, forst- und abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Flächen, Anbau- und Bewirtschaftungsform, Konkurrenznutzung) gekoppelt – ändern diese sich über die Zeit und in den Szenarien, so *variieren auch die Potenziale* entsprechend.
- Die Verfügbarkeit biogener Reststoffe und - in noch höherem Maße - von Energiepflanzen hängt stark von den Szenarioannahmen ab (z.B. Nutzungsrestriktionen) – je nach Szenario kann viel oder wenig eines Stoffstroms zur Nutzung verfügbar werden.

Weiterhin trennt das Projekt die *eigentliche Nutzung* der energetischen Biomassepotenziale (im Sinne der Bereitstellung von *Endenergieträgern*) ab und untersucht diese in einem eigenen Schritt³⁸, da hierbei Faktoren wie z.B. die technisch-ökonomische Entwicklung der *Biomassenutzungstechnologien* sowie die Preisentwicklung konkurrierender Energiesysteme eingehen.

Durch diese Disaggregation wird die *größtmögliche Transparenz* und Nachvollziehbarkeit der Szenario-Annahmen erreicht und eine künftige Nutzung des im Modell entwickelten Stoffstrommodells auch für andere Randbedingungen und Annahmen erleichtert.

³⁷ Dies gilt allerdings nicht für die wirtschaftlichen bzw. erschließbaren Potenziale, die je nach Annahmen zu Energiepreisen, usw. in den Szenarien differieren. Außerdem können z.B. auf von Szenario-Annahmen stark abhängigen Stilllegungsflächen auch PV-Freiflächenanlagen oder Erdwärmekollektorsysteme etc. eingerichtet werden.

³⁸ Dieser Schritt wird mit dem EDV-gestützten Szenariomodul (vgl. Kapitel 2.2.3) unter Verwendung der Technologiedatenbasis (vgl. Kapitel 3) durchgeführt.

Im Folgenden wird daher stets das *technische Brennstoffpotenzial* beschrieben, das sich unter den *jeweiligen Szenarioannahmen für die Szenariozeitpunkte* ergibt. Es umfasst die Bioenergieträger (z. B. Waldrestholz, Biogas), die unter definierten Randbedingungen technisch verfügbar gemacht werden können.

Diese technischen Energiepotenziale repräsentieren nur wenig „verarbeitete“ Stoffströme (Ausnahme: Biogas), um maximale Freiheit in den Szenarien zum Einsatz von Nutzungstechniken zu bieten³⁹. Dabei wird stets unterstellt, dass

- alle Arten von stofflicher Nutzung bzw. Aussicht auf stoffliche Nutzung gegenüber einer energetischen Nutzung *den Vorrang* erhalten,
- Naturschutzziele – je nach Szenario - umfassender realisiert sind als gegenwärtig.

Weiterhin erfolgt die Definition der Randbedingungen in diesem Projekt mittels verschiedener Szenarien, die über den Zeitraum 2000 bis 2030 entwickelt werden. Dadurch ist es möglich, *explizit* den Einfluss der land-, forst- und abfallwirtschaftlichen Systeme auf die Biomassepotenziale differenziert darzustellen:

Die Bilanzierung der Potenziale erfolgte über die Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der jeweiligen Stoffströme – differenziert für die Szenarien – und dann durch die Umrechnung in Energiepotenziale, wobei die jeweiligen Heizwerte der Stoffströme verwendet wurden⁴⁰.

5.1.3 Systemgrenzen der Potenzialanalysen

Die Land-, Forst- und Abfallwirtschaft werden jeweils als eigene Quellen von potenziell energetisch nutzbaren Biomasse-Stoffströmen gesehen und auch die dort anfallenden Rest- und Abfallstoffe, die z.Zt. in die Abfallwirtschaft gehen, mit einbezogen. Ebenfalls werden die indirekten Stoffströme aus diesen Quellen, die bei der Verarbeitung in der Lebensmittel-, Holz-, Papier/Pappe- und Möbelindustrie entstehen, so weit wie möglich quantifiziert.

In die Potenzialanalyse gehen einige potenziell energetisch nutzbare Stoffströme aufgrund der gewählten Systemgrenzen *nicht* ein:

- Reststroh beim Anbau von Raps und Mais – beide werden aufgrund der Annahmen zur landwirtschaftlichen Modellierung außer Betracht gelassen, da das entsprechende EDV-Modell HEKTOR (vgl. Kapitel 2.2.2) *nur Daten zu Getreidestroh* enthält. Beim Anbau von Raps und Mais (Ganzpflanze) auf Stilllegungsflächen wurden die Systemgrenzen beim Raps so gewählt, dass anfallendes Rapsstroh durch Unterpflügen auf dem Feld verbleibt und so den Düngereinsatz reduziert, während bei Mais-Ganzpflanzen-Nutzung kein Reststroh verfügbar ist, da der gesamte Aufwuchs geerntet wird.

³⁹ Nutzungstechnologien zeigen dynamische Veränderungen der Kenndaten (z.B. Kosten) – siehe hierzu Kapitel 3.2.

⁴⁰ Eine Übersicht zu den Elementaranalysen und Heizwerten, die im Projekt verwendet wurden, gibt das Arbeitspapier „Brennstoff-Daten“, das im Excel-Format vorliegt. Die wichtigsten Kenndaten sind im Anhangband wiedergegeben.

- Waldrestholz aus theoretisch möglichem höherem Einschlag sowie potenzielle Mittel- oder Niederwaldnutzung - die z.Zt. im Wald befindliche „Nutzungsreserve“ wurde aufgrund der unklaren Datenlage und den offenen Fragen der Kosten *ausgenommen*. Bei der aus Naturschutzsicht gewünschten Mittel- bzw. Niederwaldnutzung würde die energetische Nutzung zu entsprechenden Ausfällen bei der Stammholzproduktion führen und damit nicht dem generell unterstellten Vorrang der stofflichen Nutzung genügen.
Zudem gibt es hier offene Fragen zu Ernteverfahren und den Kosten für das bereitgestellte Energieholz. Der Aufbau von Mittel- bzw. Niederwäldern würde zudem bis 2030 dauern, so dass im Szenario-Zeitraum keine nutzbaren Potenziale existierten.

Außerdem wurden einige kleinere Potenziale aufgrund von fehlenden Daten zum Aufkommen sowie offenen Fragen bei Gewinnungs- und Nutzungstechnologien nicht weiter einbezogen – dies gilt insbesondere für Biomasse aus Landschaftspflegeschnitt für Offenlandflächen (vgl. Kapitel 5.8).

5.2 Energetische Biomassepotenziale aus landwirtschaftlichen Reststoffen

Im Rahmen des Projekts wurde das EDV-Modell HEKTOR entwickelt, das den Flächenbedarf für den Ernährungssektor in Deutschland quantifiziert⁴¹.

HEKTOR ermittelt die Anbauflächen für einzelne Kulturen sowie die Tierbestände, die für die menschliche Ernährung notwendig sind, bis zum Jahr 2030. Die Grundlage liefern hierfür Annahmen zu Flächenerträgen, Pro-Kopf-Verbrauch von Nahrungsmitteln und Bevölkerungszahl⁴².

Die Reststoffmengen in der Landwirtschaft wurden anhand der Anbauflächen und Tierbestände abgeleitet.

5.2.1 Energetisch nutzbares Biomassepotenzial aus Getreidestroh

Mit einer Anbaufläche von knapp 6 Mio. ha ist Getreide eines der wichtigsten landwirtschaftlichen Produkte in Deutschland⁴³. Das Korn ist das Hauptprodukt, doch auch für Stroh gibt es verschiedene Nutzungsmöglichkeiten innerhalb der Landwirtschaft, andere Wirtschaftsbereiche nutzen Stroh bisher kaum (Kolloch 1990).

HEKTOR liefert die Getreideerträge in den Szenarien – hieraus wird das Strohaufkommen mit Hilfe des Korn:Stroh-Verhältnisses berechnet (vgl. Bild 26).

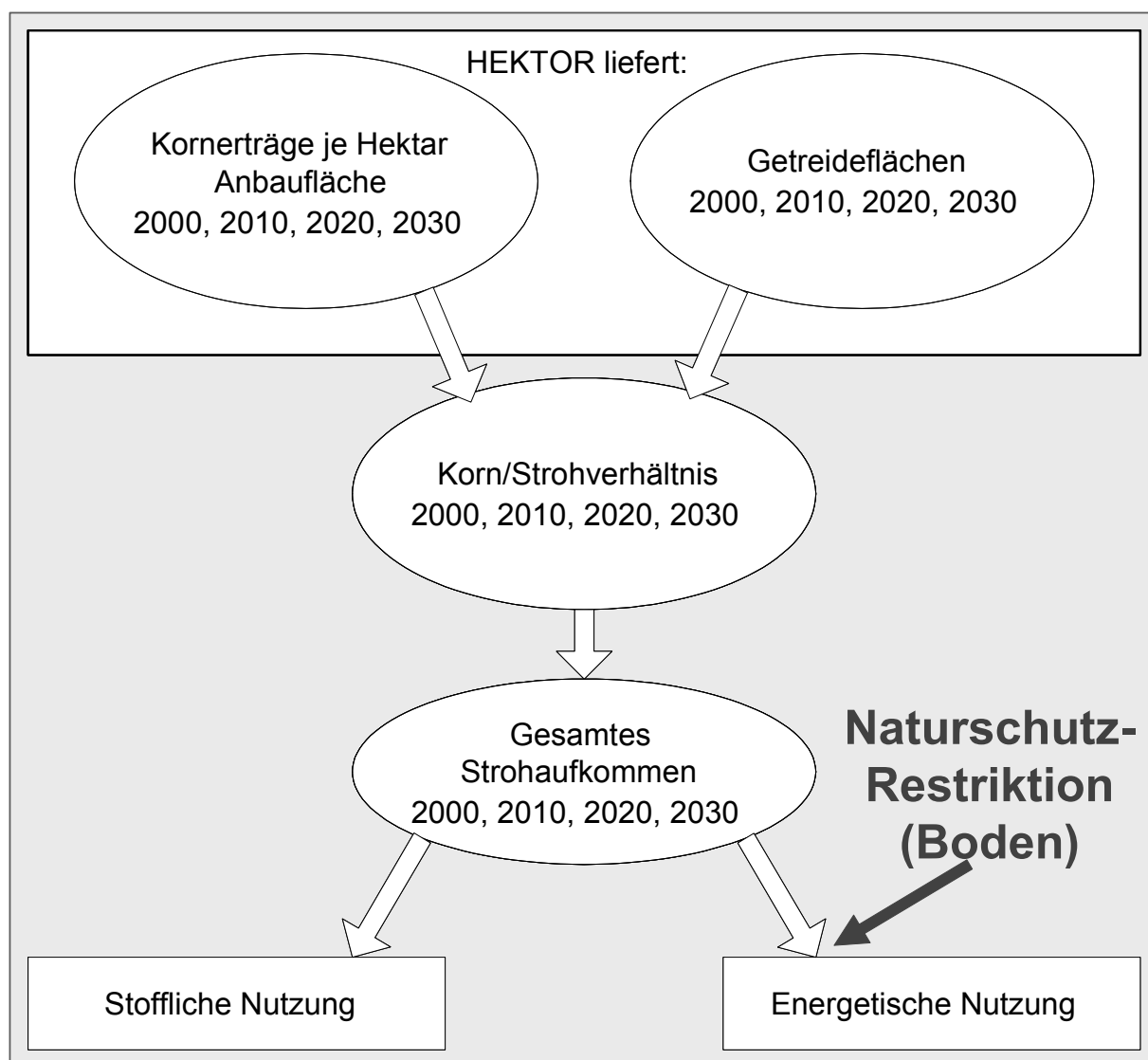
⁴¹ HEKTOR steht als Akronym für Hektar Kalkulator.

⁴² Die in HEKTOR implementierten Grunddaten für die Szenarien wurden vom Öko-Institut und der TU München mit dem laufenden BMBF-geförderten Projekt „Ernährungswende“ (siehe www.ernaehrungswende.de) abgestimmt. In der Datendokumentation des Modells (vgl. Anhangband auf beigefügter CDROM) werden die Szenario-Annahmen näher beschrieben.

⁴³ Nicht betrachtet werden in HEKTOR Strohpotenziale sonstiger Strohsorten (insb. Mais- und Ölsaatenstroh), da hierfür keine Fortschreibung und keine Analyse der Nutzungskonkurrenzen erfolgt. Die nicht einbezogene Strohmenge liegt nach Kaltschmitt/Thrän (2003) bei 1,7 Mio. t Frischmasse, d.h. Energieäquivalent von ca. 24 PJ, und damit innerhalb der hier ermittelten Potenzialbandbreite für Getreidestroh – je nach Szenario – von 60 bis 110 PJ im Jahr 2000 (vgl. Tabelle 42).

Bild 26

Methodik der Ermittlung des Strohpotenzials



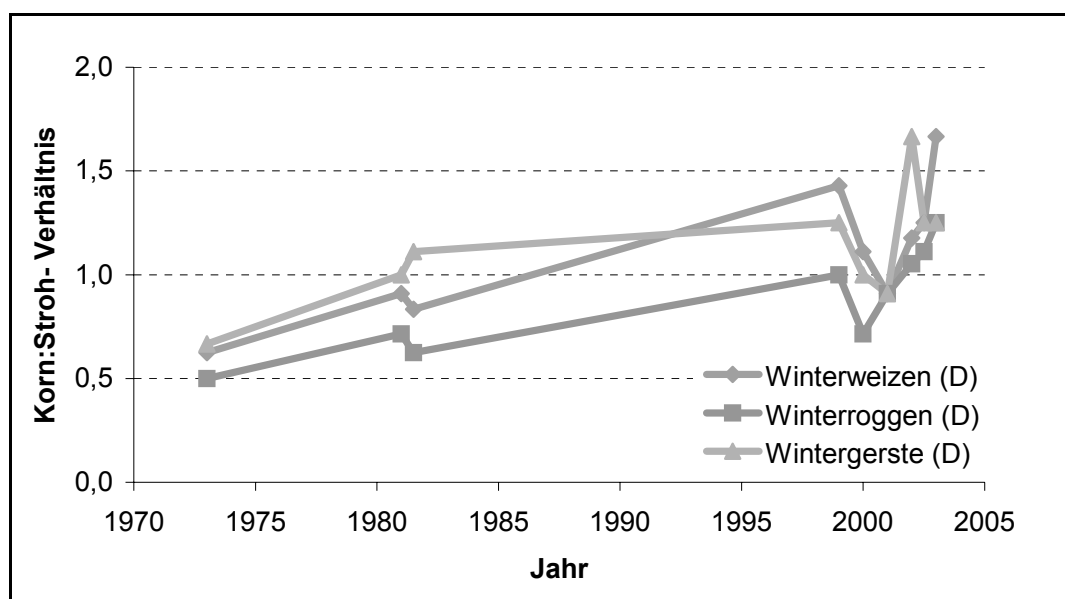
Nicht das gesamte Strohaufkommen steht zur energetischen Nutzung zur Verfügung, da die Landwirtschaft Stroh als Stalleinstreu und Bodenverbesserer benötigt. Der Bedarf für diese stofflichen Nutzungen wird für die Szenarien einzeln abgeschätzt, nur der Rest geht in die Potenzialbeurteilung ein.

Korn:Stroh-Verhältnis

Das Korn:Stroh-Verhältnis gibt an, in welchem Massenverhältnis Korn- und Strohertrag je ha Anbaufläche zueinander liegen. Liegt das Korn:Stroh-Verhältnis z.B. bei 1:0,8 (= 1,25), fällt bei der Ernte von 1,25 t Getreide 1 t Stroh an, bzw. 0,8 t Stroh entfällt auf 1 t Korn.

Da der Gewinn des Getreideanbaus über den Kornverkauf erfolgt, zielte in der Vergangenheit die Züchtung allein auf die Steigerung des Kornertrages ab.

Bild 27 Entwicklung des Korn:Stroh-Verhältnisses seit 1970



Datenquellen siehe Tabelle 35

Das Korn:Stroh-Verhältnis könnte allerdings je nach Priorität in der Züchtung sowohl zugunsten des Kornertrages als auch zugunsten des Strohertrages geändert werden, wie dies teilweise im ökologischen Landbau betrieben wird (BUND 2000).

Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Korn:Stroh-Verhältnisse von 1970 bis heute in Zahlen.

Tabelle 35 Literaturdaten zur Entwicklung des Korn:Stroh-Verhältnisses seit 1970

	Jahr	Zusatz	Winter- weizen	Winter- roggen	Winter- gerste	Sommer- gerste	Hafer
LWK Westfalen Lippe	2003		1,67	1,25	1,25		1,25
www.landundforst.de	2003		1,25	1,11	1,25	1,25	0,91
Röhrich et al.	2002	min	1,00	0,91	1,43		
		max	1,43	1,25	2,00		
		Mittel	1,18	1,05	1,67		
FNR	2001	2000	0,91	0,91	0,91		
Twistel et al.	2000		1,11	0,71	1,00	0,91	0,83
Boelcke	1999	min	1,00	0,71	1,00		
		max	2,50	1,67	1,67		
		Mittel	1,43	1,00	1,25		
Seifert (aus Boelcke)	1982		0,83	0,63	1,11	1,25	0,83
ZfS Nossen	1981		0,91	0,71	1,00	1,00	1,00
Kroschewski	1973		0,63	0,5	0,67	0,71	0,63

Stoffliche Nutzung von Getreidestroh

Kaltschmitt (2003) geht davon aus, dass bundesweit etwa 20 % des gesamten Strohaufkommens für die energetische Nutzung verfügbar sind. Im Folgenden werden die mit Hilfe von HEKTOR ermittelten Zahlen zur – vorrangigen – nichtenergetischen Strohnutzung dokumentiert und daraus der energetisch nutzbare Anteil abgeleitet.

Bodenverbesserer

Die Wirkung der Strohdüngung im Boden beruht einerseits auf der Rückführung der im Stroh enthaltenen Nährstoffe, v.a. Kalium und andererseits auf der Zufuhr von organischer Substanz. In welchem Maße Stroh auf dem Acker verbleiben soll, hängt wesentlich vom Standort, der Fruchtfolge und der Gabe sonstiger organischer Dünger ab. Im Rahmen des Biomasseprojekts werden jedoch die Fruchtfolgen nicht im Detail betrachtet, so dass die Humusbilanz nur auf der Gesamtfläche ausgeglichen wird. Sonstige organische Dünger werden nicht berücksichtigt.

Zwar sind schwere Böden bei der Strohumsetzung insgesamt träger als leichte. Im Rahmen des Biomasseprojekts wird allerdings nicht nach unterschiedlichen Bodentypen differenziert, da für Getreidestroh kaum Unterschiede auftreten (Roschke 2000) und im Projekt keine weiteren Strohsorten betrachtet werden. Erfahrungswerte für den Strohbedarf auf dem Acker liegen zwischen 67 % und 80 % (Boelcke 2003; BUND 2000; Dissemond 1995; Dreyer 2003), findet der Anbau ohne Zwischenfrüchte statt, kann der Bedarf auch bei 100 % liegen (Roschke 2000).

Einstreustroh

Der Bedarf an Einstreustroh wird über die Tierzahlen und den Einstreu- und Futterbedarf je nach Haltungsform hochgerechnet (vgl. folgende Tabelle). Das eingestreute Stroh wird nicht direkt der energetischen Nutzung zugeführt, sondern als Bodenverbesserer eingesetzt. Entsprechend werden hierfür keine Potenziale ausgewiesen.

Tabelle 36 Mit HEKTOR ermittelter Bedarf an Einstreustroh für die einzelnen Szenarien

Einstreubedarf in Mio. t	2000	2010	2020	2030
Referenz	8,45	7,69	5,88	5,36
Umwelt	8,45	10,10	8,85	8,76
Biomasse	10,90	12,50	11,20	11,00

Der in Biomasse gegenüber den anderen Szenarien erhöhte Einstreubedarf im Jahr 2000 ist nur fiktiv – er ergibt sich aus der theoretischen Umsetzung der Szenario-Annahmen auf die Daten des Basisjahres. Im Falle des Biomasse Szenarios bedeutet das, dass auf den Weidegang bei Rindern verzichtet wird, um das Biogaspotenzial zu erhöhen.

Regionale Differenzierungen werden nicht vorgenommen – es kann also nicht abgebildet werden, dass verfügbares Stroh zwischen Ackerbau- und Viehregionen stark variiert. Angaben über den Strohbedarf in der Tierhaltung in der Literatur liegen bei etwa 30 % der Erntemenge (Twistel u.a. 2000). Die Berechnungen mit HEKTOR basieren auf Annahmen des Stroheinstreubedarfs nach KTBL (2000). Der Strohbedarf zur Einstreu für den Pferdebestand in Deutschland lässt sich relativ genau durch das vorhandene Haferstroh decken. Daher fällt Hafer im Weiteren aus der Betrachtung heraus.

Gärtnereien und Baumschulen

Neben der stofflichen Nutzung in der Landwirtschaft werden geringe Mengen Stroh von Gärtnereien und Baumschulen nachgefragt, der Bedarf beläuft sich auf insgesamt etwa 2 % (Twistel u.a. 2000). Diese werden in der Rechnung nicht extra aufgeführt, sondern gehen allgemein in der Beschreibung für die Mobilisierung auf.

Strohnutzung bei verschiedenen Landbauweisen

Das Referenz- und Umweltszenario für die Landwirtschaft unterscheiden sich lediglich um die Annahmen zur Agrarwende, das heißt der Anteil der ökologischen Landwirtschaft ist im Umwelt- gegenüber dem Referenzszenario deutlich gesteigert. Unterschiede zwischen beiden Wirtschaftsweisen liegen bei den Strohmengen für die Tiereinstreu.

Konventionelle Landwirtschaft

In den letzten 30 Jahren hat sich im konventionellen Getreideanbau der Strohertrag pro Hektar halbiert. Auch für die Zukunft rechnen Experten mit einem weiteren, wenn auch moderaten Absinken des Strohanteils (Obenauf 2003; Boelcke 2003). Die folgende Tabelle zeigt die Annahmen des Korn:Stroh-Verhältnisses für Weizen, Roggen und sonstiges Getreide.

Tabelle 37 Annahmen für das Korn:Stroh-Verhältnis für Weizen, Roggen und sonstiges Getreide in der konventionellen Landwirtschaft

Jahr	Weizen	Roggen	Sonstiges Getreide
2000	1,25	1,11	1,25
2010	1,33	1,18	1,33
2020	1,43	1,25	1,43
2030	1,54	1,33	1,54

Zu beachten ist, dass sich bei der Entwicklung der Stroherträge zwei Effekte überschneiden: Die Korn- und Stroherträge je Hektar steigen bis 2030 an, wenngleich der Zuwachs beim Stroh hinter dem Zuwachs bei den Kornerträgen zurückbleibt.

Ökologische Landwirtschaft

Im ökologischen Landbau kommen noch vermehrt langhalmige Sorten zum Einsatz und es werden keine Halmverkürzer eingesetzt, weshalb das Korn:Stroh-Verhältnis zugunsten des Strohs verschoben ist.

Tabelle 38 Annahmen für das Korn:Stroh-Verhältnis bei Weizen, Roggen und sonstiges Getreide im ökologischen Landbau

Jahr	Weizen	Roggen	Sonstiges Getreide
2000	1,00	0,71	1,00
2010	1,05	0,74	1,05
2020	1,11	0,76	1,11
2030	1,18	0,79	1,18

Hemmnisse bzw. Nutzungskonkurrenz

Als mögliches indirekt wirkendes Hemmnis der energetischen Strohnutzung kann sich die Nutzung von Festmist als Kosubstrat in Biogasanlagen erweisen. Üblicherweise wird Festmist⁴⁴ ähnlich wie Stroh als Strukturverbesserer und Humusdünger im Ackerbau genutzt. Das bedeutet, dass mit dem Festmist 60 – 80 % des Einstreustrohs den Weg zurück auf den Acker finden, der Rest sind Rotteverluste bei der Mistlagerung.

⁴⁴ Bei Festmist müssen je nach Lagerung und Pflege mit Rotteverlusten zwischen 20 und 40 % des Frischmistes berücksichtigt werden (Ertl/Birneck 1988)

Noch nicht erforscht ist, inwiefern die Kohlenstoffverluste durch die Vergärung die Funktion von Festmist als Strukturverbesserer und Humuslieferant verschlechtern. In diesem Falle müsste der Kohlenstoffverlust durch die Vergärung berücksichtigt und durch zusätzliche organische Düngung ausgeglichen werden.

Nach Möller (2003) werden beim Faulprozess in Biogasanlagen vorwiegend leicht zersetzbare, organische Verbindungen abgebaut. Die für die Bildung von Dauerhumus wichtigeren Lignine bleiben dagegen weitestgehend erhalten und können somit auch nach der Nutzung in einer Biogasanlage im selben Maße zur Humusbildung beitragen. Laut Möller (2003) können diese Ergebnisse für Güllevergärung auch für Festmistübertragen angenommen werden. Damit ist auch bei ausgeprägter Nutzung von Festmist als Kosubstrat in Biogasanlagen nicht von einem steigenden Bedarf von Stroh als Bodenverbesserer (Humusbildung) auszugehen.

In den Szenarien, die politischen Forderungen für eine Agrarwende berücksichtigen, steigt der Anteil ökologischer Landwirtschaft deutlich an und damit auch die Zahl der Tiere die auf Festmist stehen. Da die Richtlinien der einzelnen Öko-Anbauverbände keine zusätzliche Strohzufuhr im Falle einer Festmistvergärung vorsehen, werden keine weiteren Annahmen getroffen, die als Hemmnis der direkten Strohverbrennung gelten müssen.

Das Strohaufkommen in den Szenarien

Das Strohaufkommen resultiert aus den in HEKTOR getroffenen Szenarioannahmen zum Getreideanbau für den Nahrungs- und Futtermittelverbrauch. Das Korn:Stroh-Verhältnis wird in den unterschiedlichen Szenarien nicht variiert, es wird jedoch zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft unterschieden⁴⁵.

Das Stroh, das für die Tiereinstreu genutzt wird, gelangt in Form von Festmist als organischer Dünger stets auf den Acker zurück. Daher wird in allen Szenarien das Stroh im Festmist mit der direkten Strohdüngung verrechnet. Für das Stroh im Festmist wird dabei ein Rotteverlust von 30 % angenommen.

Über die Strohdüngung und Tiereinstreu hinaus nutzen noch Gärtnereien und Baumschulen Stroh. Zudem kann es durch räumliche Verteilung, Erntebedingungen und Wachstumsbedingungen zu Minderungen des Potenzials kommen. Dies wird in einem Mobilisierungsfaktor zusammengefasst, der für alle Szenarien auf etwa 90 % geschätzt wird.

Energetisch nutzbares Strohpotenzial im Referenzszenario

Im Referenzszenario verzeichnet die ökologische Landwirtschaft einen moderaten Zuwachs, die Entwicklung der Vergangenheit wird als linearer Trend fortgesetzt. Die Weidehaltung von Milchkühen und Rindern ist bis ins Jahr 2030 rückläufig. Für Getreidestroh wird pauschal die Annahme getroffen, dass dieses zu 80 % auf dem Acker verbleibt.

⁴⁵ Zu weitere Annahmen siehe HEKTOR-Dokumentation (ÖKO/TUM 2003, wiedergegeben im Anhangband auf beigefügter CDROM).

Tabelle 39 Strohpotenzial im Referenzszenario

Angaben in Mio. t/a	2000	2010	2020	2030
Weizen	18,75	16,90	15,89	14,65
Roggen	2,56	2,43	2,29	2,10
Sonstiges Getreide	10,85	10,47	9,92	9,44
Industriegetreide/Vermehrungs- flächen/Verluste	3,94	4,51	5,05	5,48
Summe Getreidestroh	36,01	34,10	32,81	31,18
Einstreu	-8,45	-7,69	-5,88	-5,36
Bodeneinarbeitung	-22,90	-21,90	-22,13	-21,19
Mobilisierungsrate	90%	90%	90%	90%
Strohpotenzial insgesamt	4,20	4,06	4,32	4,17

Energetisch nutzbares Strohpotenzial im Umwelt-Szenario

Das Umwelt-Szenario unterstellt, dass die von der Politik angestrebte Agrarwende erfolgreich umgesetzt wird - entsprechend steigt der Anteil der ökologischen Landwirtschaft deutlich an: auf 20 % in 2010 bis 30 % in 2030. Für die ökologische Rindermast und Milchkuhhaltung wird ein höherer Weidegang angenommen. Gleichzeitig hat die ökologische Tierhaltung einen höheren Einstreubedarf, so dass die Strohnachfrage seitens der Landwirtschaft steigt. Wie im Referenz-Szenario wird die Annahme getroffen, dass Stroh zu 80 % auf dem Acker bleibt.

Tabelle 40 Strohpotenzial im Umweltszenario

Angaben in Mio. t/a	2000	2010	2020	2030
Weizen	18,75	16,43	15,41	14,34
Roggen	2,56	3,24	3,22	3,13
Sonstiges Getreide	10,85	12,55	12,30	12,06
Industriegetreide/Vermehrungs- flächen/Verluste	3,94	4,56	4,89	5,36
Summe Getreidestroh	36,01	35,88	34,77	33,41
Einstreu	-8,45	-10,11	-8,85	-8,76
Bodeneinarbeitung	-22,90	-21,62	-21,63	-20,59
Mobilisierungsrate	90%	90%	90%	90%
Strohpotenzial insgesamt	4,20	3,73	3,87	3,65

Energetisch nutzbares Strohpotenzial im Biomasse-Szenario

Beim Biomasse-Szenariogelten dieselben Ertragsannahmen wie im Umwelt- und Referenzszenario (s.o.) jedoch wird der Anteil des Strohs zur Bodenverbesserung auf 67 % reduziert (statt 80 %). Dies stellt den *unteren Rand* der ermittelten Bandbreite für den Strohbedarf auf dem Acker dar.

Im Biomasse-Szenario werden alle Rinder mit Ausnahme der Mutterkuhhaltung im Stall gehalten. Auf diese Weise ist zwar der Einstreubedarf größer, doch steigt der Anteil von Mist und Gülle für die Vergärung (vgl. nachfolgendes Kapitel).

Tabelle 41 *Strohpotenzial im Biomasse-Szenario*

Angaben in Mio. t/a	2000	2010	2020	2030
Weizen	18,75	14,00	11,38	10,57
Roggen	2,56	3,13	2,71	2,63
Sonstiges Getreide	10,85	11,49	9,78	9,57
Industriegotreide/Vermehrungsflächen/Verluste	3,94	4,36	4,89	5,36
Summe Getreidestroh	36,01	32,27	27,70	26,63
Einstreu	-10,87	-12,52	-11,18	-10,97
Bodeneinarbeitung	-16,40	-12,75	-10,64	-10,09
Mobilisierungsrate	90%	90%	90%	90%
Strohpotenzial insgesamt	7,87	6,30	5,29	5,04

Überblick zum energetischen Nutzungspotenzial für Stroh in den Szenarien

Aus den Potenzialen zum Strohaufkommen in den Szenarien wurde nun über den Heizwert das energetisch nutzbare Potenzial berechnet. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 42 *Energetisches Nutzungspotenzial für Stroh in den Szenarien*

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	58,8	56,9	60,5	58,3
Umwelt	58,8	52,2	54,2	51,1
Biomasse	110,2	88,2	74,1	70,5

Nach Kaltschmitt (2003) ergibt sich ein Potenzial von etwa 106,4 PJ pro Jahr unter der Annahme, dass ca. 20 % des gesamten Getreidestrohs in Deutschland energetisch nutzbar sind.

Das entspricht dem Potenzial für das Biomasse-Szenario im Jahr 2000. Hier ist die Gesamtmenge des Getreidestrohs gleich hoch (statistische Daten) und die Annahme für den Anteil der stofflichen Nutzung liegt ebenfalls bei etwa 20 %. In den Jahren von 2010 bis 2030 bleibt dieser Anteil zwar etwa konstant, doch absolut sinkt das Potenzial aufgrund der angenommenen Absenkung der Selbstversorgungsgrade.

Im Referenz- und Umweltszenario sind die Strohpotenziale geringer, da der Bedarf der Strohdüngung höher angesetzt ist. Insgesamt ergibt sich damit in beiden Szenarien jeweils nur ein Anteil von etwa 12 % zur energetischen Nutzung.

5.2.2 Technisches Brennstoffpotenzial aus Gülle und Festmist

In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung fällt eine große Menge an Exkrementen als Gülle oder Festmist und Jauche an, die derzeit vorwiegend direkt als Wirtschaftsdünger ausgebracht wird. Gülle und Mist enthalten einen hohen Anteil an Biomasse, der durch Vergärung energetisch genutzt werden kann, wobei die Nährstoffe anschließend weiterhin als Wirtschaftsdünger zur Verfügung stehen (Edelmann 2001). Allerdings können aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht alle Exkremente für eine Vergärung erfasst werden, etwa bei Weidehaltung oder bei kleinen Beständen (Hartmann/Kaltschmitt 2002). Um das Potenzial an Exkrementen zu ermitteln, werden verschiedene Annahmen zu den relevanten Tierbeständen und den anfallenden Exkrementmengen pro Tier getroffen und diese anschließend hochgerechnet.

Berücksichtigte Tierbestände

Im Rahmen des Projekts werden nur Exkremente erfasst, die im Stall und in größeren Tierbeständen anfallen. In die Berechnungen gehen daher Rinder, Schweine, Masthühner und Mastputen sowie ein Teil der Legehennen ein, soweit sie nicht im Freiland gehalten werden. Nicht berücksichtigt wurden die Exkremente von Schafen, da diese vorwiegend auf Weiden gehalten werden (Schneider/Kaltschmitt 2002). Darüber hinaus werden auch die Exkremente von Pferden, Ziegen, Enten und Gänsen vernachlässigt, da diese ebenfalls zum großen Teil im Freiland gehalten werden (Kaltschmitt 1993) und zudem die Gesamtbestände in Deutschland relativ klein sind.

Außerdem wurden in Anlehnung an Wilfert/Schattauer (2002) Tierbestände vernachlässigt, die zu klein sind und sich daher für eine Biogasanlage nicht eignen. Entsprechend dem Trend zu immer größeren Tierbeständen wurden die Anteile an Rindern, Schweinen und Geflügel abgeschätzt, die bis 2030 Exkremente für die Vergärung liefern.

Tabelle 43 Anteil der Tierbestände, deren Exkremente für eine Vergärung in Frage kommen, 2000 - 2030

		2000	2010	2020	2030
Rinder	>50 Tiere	83%	90%	95%	99%
Schweine	>100 Tiere	94%	96%	99%	99%
Legehennen	>5000 Tiere	83%	85%	90%	95%
Mastgeflügel	>3000 Tiere	98%	99%	99%	99%

Quelle: für 2000 nach BMVEL 2001, danach eigene Berechnungen

Berechnung des Exkrementaufkommens

Für die Berechnung des Exkrementanfalls pro Tier wird auf die Daten zurückgegriffen, die im Computermodell *GEMIS* für die verschiedenen Bereiche der Tierproduktion vorliegen (ÖKO 2003a). Die *GEMIS*-Prozesse erfassen das Exkrementaufkommen eines Tieres über dessen gesamte Lebenszeit bis zur Schlachtung. Berücksichtigt werden darin verschiedene Haltungssysteme, die sich nach Aufstallung auf Festmist oder Gülle unterscheiden. Bei Rindern wird außerdem der Weidegang in Anlehnung an das Ammoniak-Emissionsinventar (Döhler u.a. 2001) berücksichtigt.

Daneben spiegeln diese Prozesse unterschiedliche Fütterungsintensitäten sowie den Leistungsunterschied zwischen konventionellem und ökologischem Landbau wieder. Beides führt zu unterschiedlichen Exkrementaufkommen pro Tier. Die Spezifikationen der jeweiligen *GEMIS*-Prozesse zur Tierhaltung kann in den Datendokumentationen zum Programm nachgelesen werden (vgl. ÖKO 2003a).

Da bei Geflügel nur für Masthühner ein *GEMIS*-Prozess vorliegt, wurde das Exkrementpotenzial pro Tier für Legehennen und Truthühner aus Daten von Wilfert/Schattauer (2002) berechnet. Die Prozesse und Exkrementaufkommen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 44 Exkrementaufkommen nach Tierarten und Haltungsform für Rinder, Schweine und Geflügel

Tierart		Haltungsform (GEMIS-Prozess)			
Kühe	Einheit	Maissilage	Grassilage	Gras/Weide	Ökokuh
Gülle	t/Tier	82,1	82,1	0,0	0,0
Mist	t/Tier	1,28	1,28	35,1	38,9
Mastrinder		Bulle Maissilage	Bulle Grassilage	Ochsen von Milchkuh	Ochsen von Mutterkuh
Gülle	t/Tier	10,3	10,3	0,0	0,0
Mist	t/Tier	1,28	1,28	6,93	8,04
Schwein		intensiv	"normal" auf Gülle	"normal" auf Mist	Ökoschwein
Gülle	t/Tier	0,79	0,83	0,0	0,0
Mist	t/Tier	0,0	0,0	0,59	0,61
Geflügel		Masthühner	Mastputen	Legehennen	Legehennen frei
Mist	kg/Tier	1,80	15,3	42,1	-

Quelle: ÖKO (2003a); Die Einheit t/Tier ergibt sich aus den *GEMIS*-Prozessen, in welchen analog zu den Lebensfutterplänen die Exkremente über die gesamte Lebenszeit eines Tieres aufsummiert werden

Zur Absicherung der Exkrementmengen aus den *GEMIS*-Prozessen wurden diese mit Daten des KTBL (2000) und Wilfert/Schattauer (2002) zum Exkrementaufkommen in der Tierhaltung verglichen.

Um die gesamten verfügbaren Exkremente für Deutschland hochzurechnen werden die Exkremente pro Tier mit der Tierzahl multipliziert. Die zukünftigen Tierzahlen wurden dem Modell HEKTOR entnommen. Als Zwischenschritt wird die verbrauchte Fleischmenge und daraus Tierzahlen berechnet. Da HEKTOR auch für die Berechnung der Futterfläche auf die oben beschriebenen GEMIS-Prozesse zugreift, können diese direkt für die Erhebung der Exkrementpotenziale übernommen werden.

Biogas aus Gülle und Mist

Rinder- und Schweinegülle sind die Grundssubstrate für die meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Wilfert/Schattauer 2002). Gülle ist besonders geeignet, da sie bereits flüssig anfällt. Die Vergärung selbst führt zu einer Reihe von Vorteilen, wie eine bessere Pflanzenverträglichkeit, geringere Geruchsbelastung und das Abtöten der in der Gülle enthaltenen Keime und Unkrautsamen (Hartmann 1995). Darüber hinaus führt die Vergärung von Gülle zu einer Verringerung der Methanemissionen (Edelmann 2001).

Auch Festmist eignet sich prinzipiell zur Vergärung. Für die Fermenterprozesse in GEMIS wurde allerdings ein maximaler Anteil an Trockensubstanz (TS) im Substrat von 15 % festgelegt. Da Festmist aber eine höhere TS hat, muss er zunächst mit Wasser versetzt werden. Derzeit verwenden etwa 40% der Biogasanlagen Rinderfestmist zur Biogaserzeugung, während Geflügelmist eine untergeordnete Rolle spielt (Wilfert/Schattauer 2002)⁴⁶.

Tabelle 45 Biogasausbeuten verschiedener Exkremente

		m ³ Biogas pro t Gülle	m ³ Biogas pro t Mist
Rind	Milchkühe	14,1	42,5
	Kälber bis 6 Monate	9,3	
	Sonstige Rinder	34,4	
Schwein		23,8	55,0
Geflügel		nicht berücksichtigt	129,7

Quelle: Wilfert/Schattauer 2002

Je nach dem, von welcher Tierart die Exkremente stammen, können unterschiedliche Biogaserträge erzielt werden. Für die Potenzialabschätzung wurde ein mittlerer Heizwert von 6 kWh/m³ Biogas und Ausbeuten an Biogas aus den Exkrementen nach Wilfert/Schattauer (2002) benutzt.

Derzeitiges Biogaspotenzial

Anhand der GEMIS-Prozesse und der Tierzahlen aus HEKTOR wurde das Biogaspotenzial aus Gülle und Mist für das Jahr 2000 berechnet. Die Biogaspotenziale der verschiedenen Tierarten und Exkrementformen zeigt die nachfolgende Tabelle. Die Rinderhaltung hat dabei mit über 70 % den größten Anteil am Gesamtpotenzial, während Hühnermist nur 8 % zum Potenzial beiträgt.

⁴⁶ Festmist wird überwiegend als Kosubstrat eingesetzt und daher im Rahmen des Biomasseprojekts auch entsprechend berücksichtigt.

Tabelle 46 Biogaspotenzial aus Gülle und Mist, 2000

Angaben in Mio. m ³ Biogas	Gülle	Festmist	%
Rinder (>50 Tiere)	2.059	814	70%
Schweine (>100 Tiere)	596	273	22%
Geflügel (>5000 Tiere)	-	334	8%
Summe	4.075		100%

Diese Daten wurden zur Validierung der Potenzialberechnung mit Berechnungen des Instituts für Energetik und Umwelt (IE) zum Biogaspotenzial verglichen (Wilfert/Schattauer 2002). In dieser Studie wurden Biogaspotenziale für Rinder, Schweine und Geflügel anhand der Tierbestände berechnet, die durch die Agrarstatistik für die Jahre 1999 bis 2001 erhoben wurden. Der Vergleich ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 47 Vergleich der Biogaspotenziale nach IE mit HEKTOR/GEMIS

Angaben in Mio. m ³	Biogas aus Rinderhaltung	Biogas aus Schweinehaltung	Biogas aus Geflügelhaltung	Biogas gesamt
IE Mittelwert 1999-2001	3.256	1.103	359	4.718
IE für 2001	3.172	1.112	346	4.630
GEMIS/HEKTOR	3.478	923	402	4.804
	Abweichung in %			
IE Mittelwert 1999-2001	100%	100%	100%	100%
IE für 2001	97%	101%	96%	98%
GEMIS/HEKTOR	107%	84%	112%	102%

Quelle: Wilfert/Schattauer (2002) und eigene Berechnungen

Die Mittelwerte der Biogaspotenziale nach IE für die Jahre 1999-2001 werden dabei als 100% gesetzt. Im Vergleich zu den Einzelwerten aus dem Jahr 2001 weisen die Potenziale nach GEMIS und HEKTOR größere Schwankungen bis zu 16% auf, die sich jedoch insgesamt wieder ausgleichen.

Das höhere Potenzial aus der Rinderhaltung ergibt sich aus dem Weidegang nach Döhler u.a. (2001), der etwas geringer ist als bei Wilfert/Schattauer (2002). Die Abweichung für die Schweinehaltung ist auf einen geringeren Festmistanfall für Schweine in GEMIS zurückzuführen, der allerdings durch Daten der KTBL (2000) bestätigt wird.

Das erhöhte Potenzial bei Geflügel beruht auf einer weniger gesicherten Datenbasis, wirkt sich aber aufgrund der relativ geringen Menge an Geflügelmist nur wenig auf das Gesamtpotenzial aus.

Biogaspotenziale in den Szenarien

Die Biogaspotenziale in den Szenarien basieren auf den Tierzahlen und den verschiedenen Haltungsformen, die in HEKTOR erfasst sind⁴⁷. Eine kurze Übersicht hierzu sowie darüber hinaus getroffene Annahmen sind im Folgenden dokumentiert.

Referenzszenario

Im Referenzszenario, das die bisherige Agrarpolitik weiterführt, rechnet HEKTOR mit sinkender Bevölkerung und wachsenden Leistungen sowie einer leichten Verschiebung in den Ernährungsgewohnheiten (i. S. einer Trendverlängerung). Daraus ergeben sich sinkende Rinder-, Schweine- und Legehennenbestände und ein Zunahme des Mastgeflügelbestands.

Darüber hinaus wird eine Zunahme der ökologischen Landwirtschaft ebenfalls auf Basis der bisherigen Trends angenommen.

Auch in der ökologischen Landwirtschaft bestehen keine Restriktionen bezüglich der Vergärung von Gülle und Festmist aus dem eigenen Betrieb (Möller 2003). Als Substrat für die Biogaserzeugung steht daher die gesamte Gülle und der gesamte Festmist aller großen Bestände zur Verfügung.

Tabelle 48 Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Referenz-Szenario bis 2030

		2000	2010	2020	2030
Biogaspotenzial	Mio m³	4.075	3.902	3.939	3.851
	PJ	88,0	84,3	85,1	83,2
Für Rind	PJ	62,1	60,5	61,0	59,7
Für Schwein	PJ	18,8	18,7	18,6	17,6
Für Geflügel	PJ	7,2	5,0	5,6	6,0

Umwelt-Szenario

Im Vergleich zum Referenz-Szenario wird im Umwelt-Szenario ein höherer Anteil an ökologischer Landwirtschaft angenommen, der bis auf 30 % im Jahr 2030 ansteigt. Aufgrund der generell etwas geringeren Leistung im ökologischen Landbau errechnet HEKTOR höhere Tierzahlen im Umweltszenario. Daher steigt auch die anfallende Exkrementmenge. Die Potenziale sind daher im Umweltszenario geringfügig höher.

⁴⁷ Die Annahmen für das Referenz- und das Umwelt-Szenario sind in HEKTOR dokumentiert (vgl. ÖKO/TUM 2003).

Tabelle 49 Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Umwelt-Szenario bis 2030

		2000	2010	2020	2030
Biogaspotenzial	Mio m³	4.075	4.016	4.082	4.006
	PJ	88,0	86,8	88,2	86,5
Für Rind	PJ	62,1	61,9	62,8	61,6
Für Schwein	PJ	18,8	20,0	20,1	19,3
Für Geflügel	PJ	7,2	4,8	5,3	5,7

Biomasse-Szenario

Im Biomasse-Szenario gelten prinzipiell die Annahmen des Umweltszenarios. Im Zuge einer Maximierung der Anbauflächen für die Biomasseerzeugung wird aber die Selbstversorgungsquote für Rindfleisch für die Stützzeitpunkte 2020 und 2030 auf 100 % gesenkt.

Um das Biogaspotenzial aus Exkrementen dennoch zu maximieren, wird im Biomasse-Szenario auf Weidegang bei Milchkühen und Mastrindern verzichtet, um alle Exkremente zu erfassen.

Tabelle 50 Biogaspotenziale aus der Tierhaltung im Biomasse-Szenario bis 2030

		2000	2010	2020	2030
Biogaspotenzial	Mio m³	4.332	4.360	4.424	4.356
	PJ	93,6	94,2	95,6	94,1
Für Rind	PJ	67,6	69,3	70,1	69,1
Für Schwein	PJ	18,8	20,0	20,1	19,3
Für Geflügel	PJ	7,2	4,8	5,3	5,7

Übersicht zu den Biogaspotenzialen aus Gülle und Festmist in den Szenarien

Die Biogaspotenziale in den Szenarien zeigt die folgende Tabelle nochmals in der Übersicht.

Tabelle 51 Biogaspotenziale aus der Tierhaltung in den Szenarien bis 2030

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	88,0	84,3	85,1	83,2
Umwelt	88,0	86,8	88,2	86,5
Biomasse	93,6	94,2	95,6	94,1

Das in Biomasse gegenüber den anderen Szenarien erhöhte Potenzial im Jahr 2000 ist nur fiktiv – es ergibt sich aus der theoretischen Umsetzung der Szenario-Annahmen auf die Daten des Basisjahrs.

5.2.3 Technisches Brennstoffpotenzial aus landwirtschaftlichen Ernterückständen

In der Pflanzenproduktion fällt neben den Ernteprodukten Biomasse als Nebenprodukt oder Abfallstoff an. Diese werden nur teilweise stofflich als Futtermittel genutzt oder zur Gründüngung benötigt. Ein erheblicher Anteil steht daher für die Energiegewinnung zur Verfügung. Bei Reststoffen mit hohem Trockenmasseanteil, wie z.B. Stroh steht die Vergärung in Konkurrenz zur Verbrennung, dagegen eignen sich sehr feuchte Substrate eher für eine Vergärung, da hier keine aufwändige Trocknung nötig ist. Besonders wasserhaltige und daher für die Kofermentation in Biogasanlagen geeignete Reststoffe sind Rübenblatt und Kartoffelkraut⁴⁸.

Biogas aus Rübenblatt

In Deutschland werden derzeit vorwiegend Zuckerrüben angebaut. Futterrüben spielen in der Tierernährung nur noch eine geringe Rolle, daher kann Futterrübenblatt als Substrat vernachlässigt werden. Bei der Ernte fallen Rübe und Blatt in einem Massenverhältnis von 1:0,8 mit einem Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) von ca. 10 % an (Kaltschmitt u.a. 2003).

Dies entspricht bei einem derzeitigen Ertrag von 56,2 t/ha (BMVEL 2001) einer oTS von 4,5 Tonnen pro Hektar (t/ha). Der spezifische Gasertrag von Rübenblattsubstrat beträgt dabei 0,475 Kubikmeter pro Kilogramm (m³/kg) organischer Trockensubstanz.

Der Heizwert von Biogas wird generell mit 21,6 MJ/m³ angesetzt (Wilfert/Schattauer 2002).

Biogas aus Kartoffelkraut

Auch Kartoffelkraut weist bei 20 % oTS einen recht hohen Wasseranteil auf. Im Vergleich zu Rübenblatt ist der Ertrag jedoch deutlich geringer, da das Verhältnis Kartoffel zu Kraut nur 1:0,4 beträgt und davon aus technischen Gründen nur 50 % vom Feld gewonnen werden können (Kaltschmitt u.a. 2003). Bei aktuell 43,3 t/ha Kartoffelertrag nach BMVEL (2001) und einem oTS-Gehalt von 20% (Kaltschmitt u.a. 2003) fallen daher nur etwa 1,73 t/ha oTS zur Vergärung an. Allerdings weist Kartoffelblatt mit 0,89 m³/kg oTS einen wesentlich höheren spezifischen Gasertrag auf (Kuhn/Döhler 1995).

Aktuelles Stoffpotenzial für Ernterückstände

2000 wurden in Deutschland auf ca. 450 000 ha 28 Mio. t Zuckerrüben angebaut (BMVEL 2001). Die Zuckerrübenblätter werden teilweise siliert und in der Rinderfütterung genutzt. Der Rest wird meistens als Gründünger eingearbeitet. Unter Berücksichtigung dieser Nutzungskonkurrenz können von etwa 25-50 % der Flächen die Rübenblätter als Substrat für die Biogaserzeugung genutzt werden (Kaltschmitt u.a. 2003). Die Kartoffelernte im Jahr 2000 brachte in Deutschland ca. 13 Mio. t auf 280 000 ha.

Das Kartoffelkraut verbleibt momentan immer auf dem Feld, da es nicht in der Fütterung verwertet werden kann. Daher stehen 33-66 % der Kartoffelfläche für die Kosubstratgewinnung zur Verfügung (Kaltschmitt u.a. 2003).

⁴⁸ Andere landwirtschaftliche Erntereststoffe werden hier vernachlässigt.

Szenarien für Biogas aus Ernterückständen

Um die Stoffpotenziale für den Betrachtungszeitraum bis 2030 abzuschätzen, wurde auf die Annahmen zurückgegriffen, die für das Modell HEKTOR zur Flächenentwicklung der Landwirtschaft getroffen wurden.

Im Rahmen des Modells wurden Verbrauchstrends für Zucker und Speisekartoffeln basierend auf den aktuellen Trends bis 2030 berechnet. Über die Zuckerausbeute wurde anschließend der Verbrauch an Zuckerrüben ermittelt.

Für den zukünftigen Kartoffelverbrauch musste zusätzlich zu den Speisekartoffeln der Verbrauch an Industrie-, Futterkartoffeln etc. ermittelt werden. Dazu wurde der Trend für das Verhältnis von Speisekartoffeln zu den übrigen Kartoffeln bis 2030 fortgeschrieben.

Sowohl für Zuckerrüben als auch Kartoffeln wurde davon ausgegangen, dass die oben genannten Verhältnisse von Erntemenge zu Reststoffen auch bei steigenden Erträgen von Zuckerrüben und Kartoffeln konstant bleiben.

Referenz- und Umweltszenario

Das Referenzszenario geht von einer Weiterführung der Agrarpolitik, einschließlich der Zuckermarktordnung aus. Daraus wird eine relativ konstante Zuckererzeugung geschätzt bei einer Selbstversorgungsquote zwischen 150-160 %. Im Bereich Kartoffeln, der nur zu einem geringen Teil einer Marktordnung unterliegt, wird die langjährige Vollversorgung fortgeschrieben, wobei der relative Anteil an Speisekartoffeln leicht abnimmt.

Im Umweltszenario wird eine Umsetzung der Agrarwende angenommen. Dies wird sich allerdings nicht auf den Verbrauch an Zuckerrüben und Kartoffeln sowie die Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union auswirken, weswegen hier die gleichen Potenziale wie im Referenzszenario angenommen wurden.

Für beide Szenarien werden Flächenanteile von 25 % bei Rüben und 33 % bei Kartoffeln angesetzt. Ausgehend von den oben angegebenen Verhältnissen von Erntegut zu Reststoff wurden zukünftige Stoffpotenziale errechnet. Diese und die daraus resultierenden Energiepotenziale sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 52 Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen im Referenz- und Umweltszenario

	Einheit	2000	2010	2020	2030
Rübenblatt	Mio. t FS	22,3	22,0	22,2	21,8
Energiepotenzial	PJ	5,72	5,65	5,68	5,60
Kartoffelblatt	Mio. t FS	2,64	2,25	2,20	2,11
Energiepotenzial	PJ	3,35	2,85	2,80	2,68
Summe Energiepotenzial	PJ	9,07	8,50	8,48	8,28

Aufgrund des leicht sinkenden Anbaus an Zuckerrüben und Kartoffeln wird auch das Reststoffpotenzial bis 2030 leicht sinken.

Biomasse-Szenario

Im Biomasse-Szenario gelten fast alle Annahmen wie im Umwelt- und Referenzszenario. Um die Fläche für den Anbau von Energiebiomasse zu maximieren, wird jedoch bei Zuckerrüben auf eine „Überversorgung“ verzichtet. Die Selbstversorgungsquoten für Zucker sinken auf 130 % in 2010 und 100 % ab 2020.

Die Selbstversorgung bei Kartoffeln bleibt über den gesamten Zeitraum bei 100 %. Allerdings wird nun von einem höheren Flächenanteil ausgegangen von dem die Reststoffe gewonnen werden.

Bei Rüben werden die Blätter von 50 % der Anbauflächen genutzt, bei Kartoffeln sogar von 66 %. Dadurch wird der Verlust an Reststoffen durch eine geringere Selbstversorgung mehr als ausgeglichen.

Tabelle 53 Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen im Biomasse-Szenario

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Energiepotenzial Rübenblatt	11,4	9,6	7,3	7,0
Energiepotenzial Kartoffelblatt	6,7	5,7	5,6	5,4
Summe Energiepotenzial	18,1	15,3	12,9	12,4

Überblick zum Biogaspotenzial aus Ernterückständen in den Szenarien

Die folgende Tabelle zeigt nochmals die Biogaspotenziale aus Ernterückständen in der Übersicht.

Tabelle 54 Biogaspotenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	9,1	8,5	8,5	8,3
Umwelt	9,1	8,5	8,5	8,3
Biomasse	18,1	15,3	12,9	12,4

Das in Biomasse gegenüber den anderen Szenarien erhöhte Potenzial im Jahr 2000 ist nur fiktiv – es ergibt sich aus der theoretischen Umsetzung der Szenario-Annahmen auf die Daten des Basisjahrs.

5.3 Energetische Biomassepotenziale aus forstwirtschaftlichen Reststoffen

In Deutschland werden etwa 10,7 Mio. ha Wald bewirtschaftet. Bei der wirtschaftlichen Nutzung und der Pflege dieser Waldfläche fallen große Mengen Biomasse an, die für eine energetische Nutzung infrage kommen: Restholz, das beim Stammholzeinschlag anfällt, und das kontinuierlich als Pflegerückstand anfallende Schwach- und Durchforstungsholz. Für die Waldholzsznarien wurde ein EDV-Teilmodell aufgebaut, mit dessen Hilfe die Szenarien bis zum Jahr 2030 bestimmt und auf Plausibilität geprüft werden können (Öko 2003d).

5.3.1 Ermittlung des Waldholzpotenzials für die energetische Nutzung

Die Ermittlung des energetisch nutzbaren Waldholzpotenzials basiert auf einer Energieholzstudie aus dem Jahr 2001 (BFH 2001) unter Einbezug von weitergehenden forst- und forstwirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Aufbauend auf den Ergebnissen der BFH-Studie werden die Szenarien bis zum Jahr 2030 entwickelt.

Die für die Szenarien herangezogenen Walddaten aus BFH (1996) und (2001) basieren jeweils auf den Daten der ersten Bundeswaldinventur (Stichtag 01.10.1987). Während der Projektlaufzeit wird von der BFH die zweite Bundeswaldinventur durchgeführt, mit belastbaren Ergebnissen und Aussagen zum Rohholzpotenzial und einem daraus abgeleitetem Energieholzpotenzial ist jedoch frühestens im Laufe des Jahres 2004 zu rechnen. Daher können diese Ergebnisse für dieses Vorhaben nicht verwendet werden.

Methodik

Detaillierte Informationen zum Szenarioaufbau finden sich in der Modelldokumentation des EDV- Teilmodells für die Waldholzsznarien (Öko 2003d). Das Waldholzpotenzial steht dabei unter dem Einfluss der wirtschaftlichen Nutzung der Wälder, der Konkurrenz zur stofflichen Holznutzung, den Bemühungen um eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sowie strukturellen Problemen, die eine 100%ige Erschließung der Potenziale verhindern.

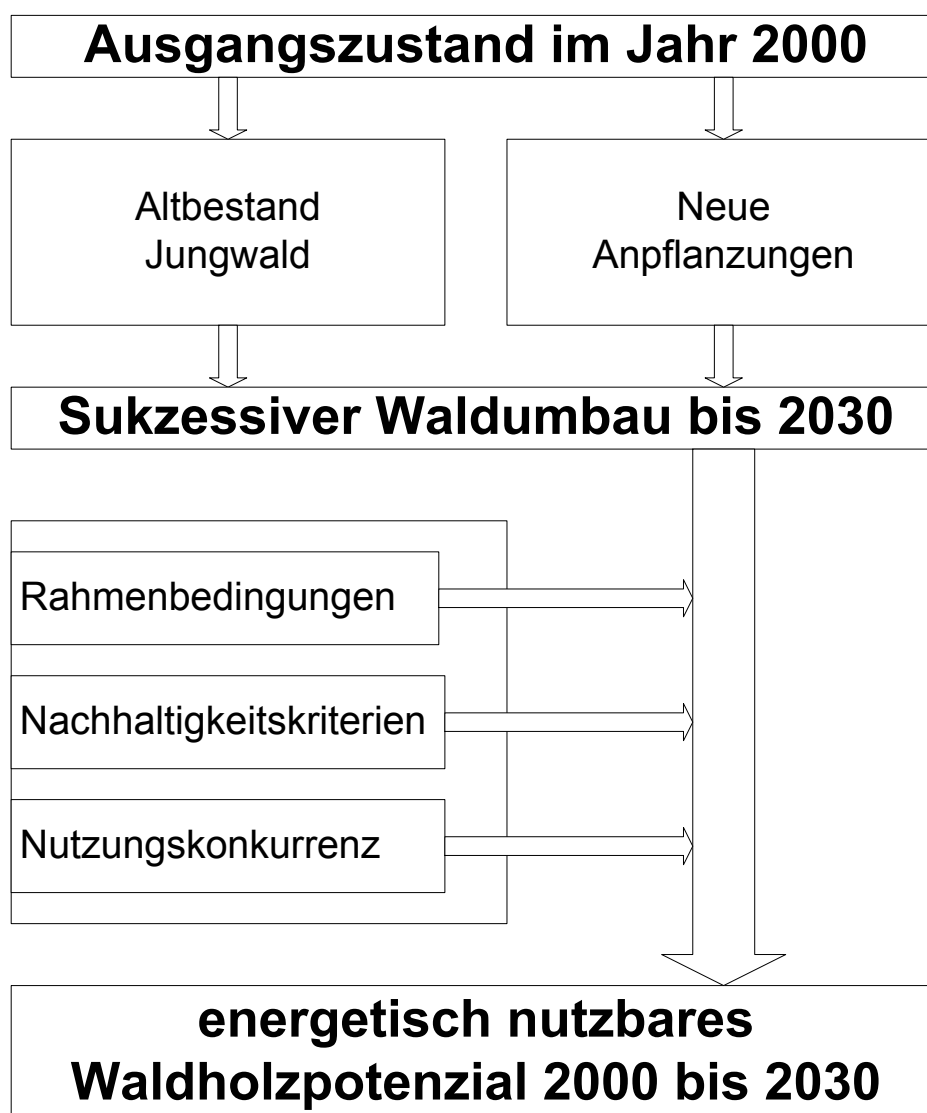
Durch den mit der nachhaltigen Waldbewirtschaftung verbundenen Waldumbau (Schaffung naturnaher Waldgesellschaften mit standortgemäßen Baumarten, erhöhter Mischung und erhöhtem Strukturreichtum) treten über den Szenariozeitraum zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten von Waldflächen auf, für die zunächst unterschiedliche Annahmen getroffen werden müssen.

Dabei handelt es sich um die *Altbestände*, die bis zum Ende des Szenariozeitraums nicht abgeerntet werden, auf denen aber Pflegemaßnahmen stattfinden. Daneben gibt es den *Jungwald*, der auf jenen Flächen vorliegt, auf denen während des Betrachtungszeitraums nicht nur Pflegemaßnahmen, sondern auch Ernte- und Verjüngungsmaßnahmen stattfinden. Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Waldflächen besteht darin, dass die Baumartenzusammensetzung des Jungwaldes im Vergleich zur Baumartenzusammensetzung des Altbestandes *aktiv beeinflusst* werden kann. Die Baumartenzusammensetzung des Altbestandes bleibt dagegen während des gesamten Zeitraums konstant, sodass für diese Flächen zunächst die bisher bestehenden Prognosen gelten können.

Für die Jungwälder soll davon ausgegangen werden, dass bei der Verjüngung die langfristig angestrebte Baumartenzusammensetzung erfüllt wird und somit modifizierte Annahmen zu treffen sind. Erkenntnisse über geänderte Ertragserwartungen durch den Waldumbau liegen nicht vor, weshalb davon ausgegangen wird, dass sich die flächenspezifischen Potenziale der einzelnen Baumarten durch den Waldumbau nicht ändern (Hofmann u.a. 2000). Damit können die Ergebnisse der bestehenden Studien der Altbestände leicht auf den Jungwald mit seiner geänderten Baumartenzusammensetzung angewendet werden. Das gesamte Potenzial hängt damit direkt von der Baumartenzusammensetzung ab. Diese Annahme ermöglicht es, die Waldfläche in Deutschland für die Szenarien wieder als eine gesamte Waldfläche zu betrachten, deren Baumartenverteilung sich durch den Waldumbau sukzessive ändert.

Bild 28

Methodik zur Ermittlung des energetisch nutzbaren Waldholzpotenzials



Auf das gesamte energetisch nutzbare Waldholzpotenzial werden anschließend die Rahmenbedingungen und die Restriktionen aus der nachhaltigen Waldbewirtschaftung und der Nutzungskonkurrenz zur stofflichen Nutzung angewendet.

Resultat ist das energetisch nutzbare Waldholzpotenzial des jeweiligen Szenarios. Tabelle 55 zeigt die in BFH (2001) ermittelten, energetisch nutzbaren Waldholzpotenziale für die vier Hauptbaumarten Eiche, Buche, Fichte und Kiefer. Es unterteilt sich in die Kompartimente Schwachholz in den BHD- Klassen 8 bis 12 cm und 12 bis 16 cm sowie Waldrestholz. Stockholz (Stumpf und Wurzelmasse) sowie Stammholz sind nicht im Waldholzpotenzial enthalten.

Tabelle 55 *Energetisch nutzbares Waldrest- und Schwachholzpotenzial bis 2005*

Hackschnitzel aus	Baumartengruppe [t(atro)/a]				
	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer	Gesamt
Schwachholz (BHD 8-12 cm)	139.039	581.785	1.191.148	815.293	2.727.265
Schwachholz (BHD 12-16 cm)	211.732	905.606	1.965.533	1.187.421	4.267.292
Restholz	584.032	3.166.389	4.091.108	1.753.074	9.594.603
Summe (BHD > 8 cm)	934.803	4.653.780	7.247.789	3.752.788	16.589.160
Summe (BHD > 12 cm)	795.764	4.071.995	6.056.641	2.937.495	13.861.895

Quelle: BFH 2001

Das energetisch nutzbare Waldholzpotenzial nach BFH 2001 unterliegt folgenden, für die Szenariobildung relevanten Annahmen:

- Das Rohholzpotenzial wird zu 100% (zur stofflichen Nutzung) eingeschlagen; dementsprechend viel Waldrestholz fällt an. Tatsächlich werden aber nur etwa 67 % (BFH 2002, Stand 2000) eingeschlagen.
- Der Mobilisierungsgrad liegt bei 100 %. Vorhandene strukturelle Probleme in der Forstwirtschaft werden nicht beachtet.
- Aus Gründen des Naturschutzes werden die Kernzonen der Naturschutzgebiete und Biosphärenreservate aus der Nutzung ausgeschlossen. Weitere Naturschutz- oder Nachhaltigkeitsrestriktionen werden nicht betrachtet.
- Der Nutzungskonkurrenz wird mit Abschneidung oberhalb eines Bruthöhendurchmessers (BHD) von 16 cm begegnet. Weitere Annahmen werden nicht getroffen.

Ungenutztes Rohholzpotenzial - Stammholz

Derzeit wird die Kapazität des Waldes zur Produktion von Stammholz nicht voll genutzt. Insbesondere bei Kiefer, Buche und Eiche ist eine deutliche geringere Ausnutzung festzustellen, womit sich ein *theoretisch zusätzliches* Potenzial für die vollständige Nutzung des Stammholzes und den daraus resultierenden Restholzmengen ergäbe.

Im Prinzip stünde dieses Potenzial von 140 PJ/a zur Verfügung, ohne das Kriterium der nachhaltigen Waldwirtschaft⁴⁹ zu verletzen.

Bei einer Aktivierung dieses Potenzials würde sich gleichzeitig das hier ausgewiesene Waldrestholzpotenzial (vgl. Kapitel 5.3.6) erhöhen, da die Mobilisierungsquote für Waldrestholz sich deutlich steigern würde.

In BFH (1996) wurden die möglichen Hemmnisse einer gesteigerten Stammholznutzung diskutiert. Als ein Haupthemmnis wird dabei der *nicht kostendeckende Ertrag* bei der Stammholzproduktion angesehen. Daher wird hier das genannte *theoretisch zusätzliche* Potenzial aus Stammholz *nicht* betrachtet:

Für die hier betrachteten Restholzmengen wird implizit unterstellt, dass bei ihrer Bergung kein oder nur ein untergeordneter Deckungsbeitrag zur forstwirtschaftlichen Tätigkeit (Pflanzung, Pflege, Unterhalt) erbracht werden muss, da der Deckungsbeitrag *stets durch die Stammholzproduktion* aufgebracht wird. Würde nun mehr Stammholz geschlagen, das aber „unter Wert“ auf dem Markt untergebracht werden müsste, so wäre dem daraus resultierenden Restholzpotenzial ein echter Deckungsbeitrag anzulasten, der die – heute schon hohen - Gestehungskosten drastisch weiter steigen ließe.

Im Gegensatz zum Restholzpotenzial in dieser Studie lägen dem zusätzlichen Stammholzpotenzial damit *andere wirtschaftliche Rahmenbedingungen* zugrunde. Daher wird in dieser Studie nur das Restholzpotenzial betrachtet.

Bestimmung der Heizwerte

Die Daten der zugrunde gelegten Studie der BFH liegen als Massepotenziale in der theoretischen Einheit [t(atro)] für absolut trockenes Holz vor. Sämtliche Berechnungen im EDV- Teilmodell für die Forstwirtschaft werden in dieser Einheit durchgeführt, die Bestimmung des Primärenergiepotenzials in [PJ] erfolgt erst am Ende des Rechenprozesses.

Für die Szenarien werden die Heizwerte für absolut trockenes Holz mit 18,8 MJ/kg (Nadelholz) und 18,4 MJ/kg (Laubholz) angenommen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass das Waldholz bei seiner energetischen Nutzung einen Wassergehalt von 30 % aufweist.

Bei Beachtung des Wassergehaltes ergibt sich ein korrigierter mittlerer Heizwert von 17,6 MJ/(kg atro) (Nadelholz (17,8 MJ/kg) und Laubholz (17,4 MJ/kg)) bezogen auf die Holztrockenmasse kg(atro). Für feuchtes Holz ergeben sich damit Heizwerte von 12,5 MJ/kg (Nadelholz) bzw. 12,2 MJ/kg (Laubholz).

Tabelle 56 fasst die angenommenen Heizwerte in Abhängigkeit vom Wassergehalt zusammen.

⁴⁹ unter Beachtung von Nutzungseinschränkungen; dieses theoretisch zusätzliche Potenzial ist nicht in den weiteren Potenzialangaben enthalten.

Tabelle 56 verwendete Heizwerte für Waldholz in Abhängigkeit vom Wassergehalt

	Wassergehalt	Nadelholz	Laubholz	Mittelwert
Heizwert bezogen auf Gesamtmasse [MJ/kg]	0% (atro)	18,8	18,4	18,6
	30%	12,5	12,2	12,3
Heizwert bezogen auf Trockenmasse [MJ/kg(atro)]	0% (atro)	18,8	18,4	18,6
	30%	17,8	17,4	17,6

Quelle: FNR 2000 und eigene Berechnung

5.3.2 Wirtschaftliche Nutzung der Wälder

Rohholzaufkommen

Bei den energetisch nutzbaren Holzsortimenten handelt es sich um Restprodukte der Forstwirtschaft. Schwachholz fällt kontinuierlich in bewirtschafteten Wäldern an, unabhängig davon ob ein Rohholzeinschlag stattfindet oder nicht. Waldrestholz hingegen fällt nur beim Einschlag von Rohholz an. Sein Aufkommen hängt somit direkt vom jährlichen Rohholzeinschlag ab.

Um diese Abhängigkeit auch für die Szenarien bis 2030 abbilden zu können, wurden im Forstmodell Annahmen zur künftigen wirtschaftlichen Nutzung der Wälder getroffen (Öko 2003d). Diese Annahmen basieren auf den vorangegangenen Entwicklungen des Holzmarktes in Deutschland (BFH 2002). Demnach steigt der Rohholzeinschlag jährlich um 0,5 % von 19,3 Mio. t(atro) im Jahr 2000 auf 22,3 Mio. t(atro) am Ende des Szenariozeitraums. Die Ausnutzung des Rohholzpotenzials steigt damit von 67 % im Jahr 2000 auf 78 % im Jahr 2030 an; dementsprechend steigt auch das realisierbare Waldrestholzpotenzial. Die angenommene Industrieholznachfrage steigt vom Jahr 2000 bis 2004 von 5 Mio. t(atro) auf 7 Mio. t(atro) an (Mantau u.a. 2002), um anschließend weiter jährlich um etwa 1 % bis auf 8,9 Mio. t(atro) zu steigen. Mit diesen Annahmen soll das künftige Wachstum der Nachfrage der Holzverarbeitenden Industrie gesichert werden.

Mobilisierung des Rohholzes

Mit 46 % befindet sich knapp die Hälfte der Waldfläche in Deutschland in Privatbesitz. Vielfach handelt es sich dabei um Klein- und Kleinstwälder ohne Anbindung an einen landwirtschaftlichen Betrieb, die über keinen oder einen nur unzureichenden Maschinenpark verfügen.

Dies führt dazu, dass die Potenziale in diesen kleinen Waldbetrieben oft nur unzureichend genutzt werden (vgl. oben). Diesen strukturellen Problemen wird mit der Berücksichtigung eines *Mobilisierungsgrades* Rechnung getragen. Durch die Bemühungen im strukturellen Bereich (z.B. Förderung von Forstwirtschaftsgemeinschaften) sind künftige gesteigerte Mobilisierungsgrade zu erwarten (Hofmann u.a. 2000). Der VHI geht in seinem Erfahrungsbericht zum EEG (VHI 2002) von einem Mobilisierungsgrad von kurzfristig 75 % und langfristig 85 % aus, jedoch sind diese Werte Schätzungen.

5.3.3 Nachhaltige Waldbewirtschaftung

Mit dem nationalen Waldprogramm reagiert Deutschland auf internationale Verpflichtungen zur Förderung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung im Rahmen der nachhaltigen Entwicklung. Ziel ist es, den sorgsam Umgang mit dem Wald weiterzuentwickeln, um die vielfältigen Interessen an der Nutzung der Wälder auch in Zukunft vereinbaren zu können. (BMELF 2000).

Auf der gesamten Waldfläche soll von einem sukzessiven Waldumbau hin zu einer naturnahen Waldgesellschaft mit standortgemäßen Baumarten, erhöhter Mischung und erhöhtem Struktur-reichtum ausgegangen.

Der Umbau in naturnahe Wälder wird voraussichtlich einen der wichtigsten Beiträge zur Erfüllung von Naturschutzziele auf der Gesamtfläche des Wirtschaftswaldes leisten (Hofmann u.a. 2000). Dies ist ein langfristiger Prozess, für dessen Umsetzung angenommen wird, dass sie im Jahr 2100 abgeschlossen sein wird.

Für die Szenarien soll davon ausgegangen werden, dass bundesweit der Laubbaumanteil auf 60 % gesteigert wird, mit dem Hauptgewicht auf der Buche (siehe Tabelle 57). Dies entspricht einem Mittelwert der bekannten Langzeitziele der Bundesländer (ÖKO 2003d). Das energetisch nutzbare Waldholzpotenzial in den Szenarien hängt unmittelbar von der angenommenen Baumartenzusammensetzung ab. Es kann aber vorweggenommen werden, dass der Waldumbau nur einen untergeordneten Einfluss auf das energetisch nutzbare Waldholzpotenzial hat.

Tabelle 57 Angenommene Hauptbaumartenverteilung in Deutschland von 1990 bis 2030

Baumart	1990	2000	2010	2020	2030
Buche	25 %	27 %	29 %	30 %	31 %
Eiche	9 %	10 %	10 %	11 %	11 %
Fichte	35 %	34 %	33 %	31 %	31 %
Kiefer	31 %	30 %	29 %	27 %	27 %

Um die möglichen Folgen der nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder für das energetisch nutzbare Waldholzpotenzial abschätzen zu können wurden weiterhin Nachhaltigkeitskriterien nach den Vorbildern des FSC (2001) und des PEFC (2000; 2003a) aufgestellt und Annahmen zur Größe der nachhaltig bewirtschafteten Waldfläche getroffen (Öko 2003d).

Die in BFH (2001) behandelten Waldholzsortimente wurden anschließend auf die Einhaltung dieser Kriterien hin untersucht.

Schwachholz: Auf das Schwachholz sind mehrere Restriktionen anwendbar. Da BFH (2001) bei der Bestimmung des Schwachholzpotenzials von einer maximalen Schwachholznutzung ausgeht, führt die Einrichtung von Schutz-/Referenzflächen unmittelbar zu einer Reduktion der nutzbaren Flächen und damit auch zu einer Reduktion des Schwachholzpotenzials. In Anlehnung an den FSC wird angenommen, dass 5 % der Waldfläche als Referenz-/Schutzzonen ausgewiesen werden und damit nicht mehr für eine wirtschaftliche Nutzung zur Verfügung stehen. Dementsprechend reduziert sich das Waldholzpotenzial um 5 %.

Auch der Verbleib von Totholz und der Schutz wertvoller Bäume und Waldbiotope soll das Schwachholzpotenzial reduzieren. Zwar ist beim Schwachholz nicht mit einem hohen Totholzanteil zu rechnen, jedoch können auch einzelne junge Bäume ökologisch wertvolle Individuen darstellen (Nistplatz für Vögel, etc). Für die Abschätzung des Waldholzpotenzials soll angenommen werden, dass die vom FSC gesetzte Obergrenze von 10 Bäumen/ha bundesweit erreicht wird, und damit 1,3 %⁵⁰ der Bäume aus der wirtschaftlichen Nutzung herausfallen und nicht mehr für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen.

Weiterhin übt der geforderte Verbleib des Laubes im Wald einen Einfluss auf das Schwachholzpotenzial aus, da es im Schwachholzpotenzial enthalten ist. Nach den Richtlinien der nachhaltigen Waldbewirtschaftung soll Laub aufgrund seines hohen Nährstoffgehaltes im Wald verbleiben. Der Laubanteil beim Schwachholz liegt bei 7,6 % (Öko 2003d).

Waldrestholz: Auf das Waldrestholz lässt sich lediglich Punkt 4 der Nachhaltigkeitskriterien (Umgang mit Laub und Nadeln) anwenden. Im von BFH (2001) ermittelten Potenzial nimmt Laub einen Anteil von 18,4 % an (Öko 2003d). Für die Nachhaltigkeitsrestriktionen soll daher angenommen werden, dass das Waldrestholzpotenzial analog zum Schwachholzpotenzial um 18,4 % reduziert werden muss. Weitere Restriktionen treffen für das Waldrestholzpotenzial nicht zu. Es wird angenommen, dass die Einrichtung von Schutzzonen auf den gesamten Rohholzeinschlag keinen Einfluss hat, da davon ausgegangen wird, dass der Stammholzeinschlag sämtlich auf nicht restriktiven Flächen stattfindet bzw. gegebenenfalls auf diese ausweicht. Dies gilt analog für den Schutz und Erhalt von Waldbiotopen und Totholz. Auch hier wird angenommen, dass sie den Rohholzeinschlag nicht beeinflussen und zu keiner Minderung des Restholzpotenzials führen.

Rohholz: Auf das Rohholzpotenzial haben lediglich die flächenbezogenen Restriktionen wie die Errichtung von Referenzflächen und Waldbiotope/Totholz einen Einfluss. Da Laub nicht zum Rohholzpotenzial zählt, gilt diese Restriktion hier nicht.

Sortimente, die die Nachhaltigkeitskriterien nicht erfüllen, werden (je nach Szenario) von der energetischen Nutzung ausgeschlossen. Von entscheidender Größenordnung sind hier das anhaftende Laub (und Nadeln), mögliche Referenzflächen sowie kleinflächige Waldbiotope und ökologisch wertvolle Baumindividuen (siehe nachfolgende Tabelle).

⁵⁰ Nach der ersten Bundeswaldinventur (BWI) stehen bundesweit 787 Bäume auf einem Hektar Waldfläche.

Tabelle 58 Einfluss der Nachhaltigkeitskriterien auf das Waldholzpotenzial

Restriktion	Beeinflusst		
	Restholz	Schwachholz	Rohholz
Flächenrestriktionen			
Waldbiotope, Totholz	Nein	1,3 %	1,3 %
Schutz-/Referenzzonen	Nein	5 %	5 %
Sortimentrestriktionen			
Umgang mit Laub	18,4 %	7,6 %	Nein
Allgemeine Restriktionen			
Schonende Forsttechnik	Nein	Nein	Nein
Sonstiges	-	-	-
Summe	18,4 %	13,9 %	6,3 %

Die Nachhaltigkeitskriterien gelten nur auf jenen Flächen, die nachhaltig bewirtschaftet werden. Nach Angaben des PEFC wurden im Jahr 2000 etwa 31 % (3,3 Mio. ha) der Waldfläche in Deutschland nach seinen Kriterien bewirtschaftet, langfristig wird laut einer Umfrage ein Anteil von 72 % (7,7 Mio. ha) erwartet (PEFC 2003a).

5.3.4 Konkurrenz zur stofflichen Nutzung

Waldrestholz und Schwachholz werden als Rohstoffe für die Holzwerkstoff- und Papierindustrie verwendet. Eine klare Abgrenzung zwischen der stofflichen und energetischen Nutzung der behandelten Waldholzkompimente ist nicht möglich. Hier spielen technische und regionale Restriktionen eine Rolle, deren Abbildung über einen Szenariozeitraum von 30 Jahren nicht sinnvoll ist.

Die Nutzungskonkurrenz wird über zwei Mechanismen betrachtet. Im ersten Schritt wird das betrachtete Waldholz auf die Eignung für die Nutzungsvarianten „energetische Nutzung“ und „stoffliche Nutzung“ hin untersucht. An zweiter Stelle steht die Überprüfung der Mengennachhaltigkeit, die gewährleisten soll, dass dem Wald nicht mehr Holz entnommen wird als nachwächst.

Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung

Die Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung ist nur schwer durchführbar, da für beide Nutzungsvarianten ähnliche bis identische Sortimente infrage kommen. Für die Szenarien wird die Abgrenzung durch einen Abgleich der Studien BFH 1996 (Rohholzpotenzial bis 2020) und BFH 2001 (Energieholzstudie) charakterisiert. Aufgrund der unterschiedlichen Aufkommenscharakteristik wird zwischen Waldrest- und Schwachholz unterschieden.

Für das nachhaltig nutzbare Rohholzpotenzial gelten Untergrenzen für die wirtschaftliche Nutzung für jede der vier Hauptbaumarten (BFH 1996), unterhalb derer eine stoffliche Nutzung als uninteressant angesehen werden soll. Für die Konkurrenz Betrachtungen werden diese als die Untergrenzen für die stoffliche Nutzung übernommen.

Beim energetisch nutzbaren Waldholzpotenzial wurden dagegen eine untere und eine obere Nutzungsgrenze festgelegt, die für alle Baumarten gleich ist (BFH 2001). Die obere Grenze soll dabei die Grenze zwischen stofflicher und energetischer Nutzung darstellen. Damit versuchen beide Studien, eine klare Abgrenzung zwischen Nutzung, Nichtnutzung und Konkurrenz zu schaffen.

Überschneiden sich die Sortimente beider Studien, so bildet die Schnittmenge diejenige Menge, für die möglicherweise eine Konkurrenzsituation besteht, da definitionsgemäß beide Nutzungsvarianten möglich sind. Die Teilmengen, die nicht der Schnittmenge angehören, werden explizit der stofflichen bzw. der energetischen Nutzung zugeschrieben. Das folgende Bild verdeutlicht das Vorgehen zur Nutzungskonkurrenz.

Bild 29 Schematische Darstellung der Nutzungskonkurrenz

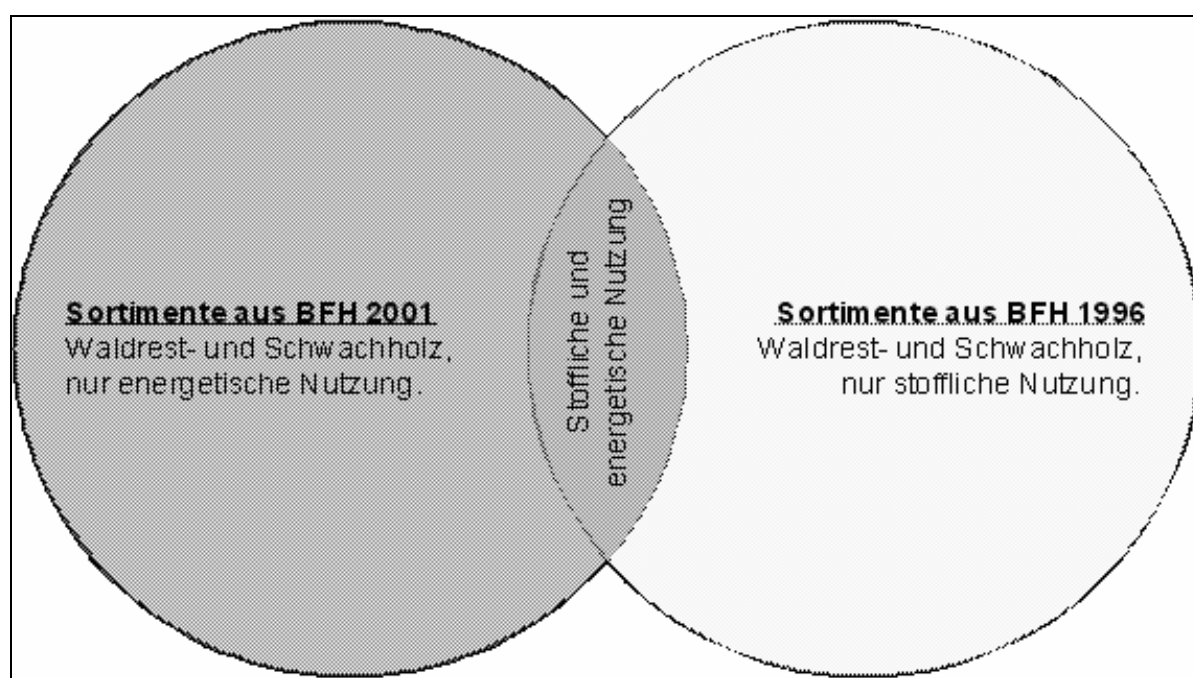


Tabelle 59 zeigt die verwendeten Nutzungsgrenzen des Brusthöhendurchmessers (BHD) für Schwachholz, anhand derer die betrachteten Holzsortimente in die drei Nutzungsklassen „stoffliche Nutzung“ (1), „stoffliche und energetische Nutzung“ (2) sowie „energetische Nutzung“ (3) eingestuft werden können. Da eine solche Einstufung beim Waldrestholz aufgrund fehlender Durchmesserangaben nicht durchführbar ist, wird hier davon ausgegangen, dass für 15 % des Waldrestholzpotenzials eine mögliche Konkurrenzsituation besteht.

Tabelle 59 Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Schwachholz über den Brusthöhendurchmesser (BHD)

Angaben in cm	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer
(1) stoffliche Nutzung	> 16	> 16	> 16	> 16
(2) stoffliche + energetische Nutzung	15 – 16	15 – 16	10 – 16	12 – 16
(3) energetische Nutzung	8 – 15	8 – 15	8 – 10	8 – 12

Die Klassifizierung in die drei Nutzungsklassen ermöglicht es, differenzierte Szenarioannahmen bezüglich des Umgangs mit der möglichen Nutzungskonkurrenz zu treffen.

Mengennachhaltigkeit

Hinter sämtlichen Szenarien liegen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Nachfrage nach Stamm- und Industrieholz, deren Deckung in allen Szenarien Priorität genießt. Die stoffliche Nutzung von Waldrest- und Schwachholz mit einer anschließenden energetischen Verwertung nach Ablauf der Produktlebenszeit stellt im Rahmen der Szenarien den nachhaltigeren Lebensweg dar als die alleinige energetische Nutzung und wird daher bevorzugt behandelt. Stellt sich heraus, dass mit den jeweiligen Szenarioannahmen das Rohholz- und/oder das Industrieholzpotenzial nicht ausreichend zur Deckung der beider Nutzungsvarianten ist, so wird das energetisch nutzbare Potenzial entsprechend reduziert.

Für die Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung und die Überprüfung der Mengennachhaltigkeit wird weiterhin berücksichtigt, dass sich bei der Aushaltung von Holzhackschnitzeln eine Mehrausbeute ergibt (siehe hierzu ÖKO 2003d).

5.3.5 Potenziale für Waldrestholz in den Szenarien

Es werden die Szenarien Referenz, Umwelt und Biomasse behandelt. Folgend wird für diese Szenarien die Anwendung der in der Modelldokumentation vorgestellten Parameter festgelegt.

Die Grundlage für alle Szenarien bildet die Energieholzstudie der BFH (2001). Die holz- und forstwirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind für alle Szenarien gleich. Variiert werden in den Szenarien die Annahmen zu Mobilisierungsgrad, nachhaltiger Waldbewirtschaftung und der Nutzungskonkurrenz. Im Falle der nachhaltigen Waldbewirtschaftung wird für alle Szenarien von denselben Nachhaltigkeitskriterien ausgegangen und lediglich der Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Fläche variiert.

Das energetisch nutzbare Waldholzpотenzial wird für jede der vier Hauptbaumarten in der Einheit $[t(atro)/a]$ bzw. $[t(atro)]$ angegeben. Benutzte Umrechnungsfaktoren sind dem Leitfaden Bioenergie (FNR 2000) entnommen. Die benutzten Heizwerte für die Umrechnung zu Energiepotenzialen in der Einheit $[PJ]$ können Tabelle 56 entnommen werden.

Rechenvorschriften für das Waldrestholzpотenzial in den Szenarien

Die Berechnung des Waldholzpотenzials in den Szenarien erfolgt nach den unten dargestellten Rechenvorschriften. Dabei ist zu beachten, dass die Potenzialdaten nach BFH 2001 für die Stützzeitpunkte 2010, 2020 und 2030 zunächst an die jeweilig angenommene Baumartenzusammensetzung angepasst werden.

Schwachholz

Für jede der vier Baumarten und beide BHD-Klassen (also insgesamt 8-mal) jeweils:

$$P(BMU) = P(BFH) \cdot mg \cdot (1 - F \cdot nh) \cdot \left(1 - \frac{a}{1 + ma}\right), \quad \text{mit}$$

P(BMU)	Schwachholzpotenzial im Stoffstromprojekt
P(BFH)	Schwachholzpotenzial nach BFH 2001
mg	Mobilisierungsgrad Schwachholz
F	Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Waldfläche
nh	Prozentualer Potenzialabschlag durch die nachhaltige Waldbewirtschaftung
a	Anteil von Nutzungsklasse 2 (Konkurrenz der stofflichen und energetischen Nutzung) am Schwachholzpotenzial
ma	Mehrausbeute bei der Aushaltung von Holzhackschnitzeln im Vergleich zu Industrieholz (Standardlängen)

Waldrestholz

Für jede der vier Baumarten jeweils:

$$P(BMU) = P(BFH) \cdot ar \cdot mg \cdot (1 - F \cdot nh) \cdot (1 - a), \quad \text{mit}$$

P(BMU)	Waldrestholzpotenzial im Stoffstromprojekt
P(BFH)	Waldrestholzpotenzial nach BFH 2001
ar	Ausnutzung des Rohholzpotenzials (Restholz fällt nur bei Einschlag von Rohholz an)
mg	Mobilisierungsgrad Waldrestholz
F	Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Waldfläche
nh	Prozentualer Potenzialabschlag durch die nachhaltige Waldbewirtschaftung
a	Anteil von Nutzungsklasse 2 (Konkurrenz der stofflichen und energetischen Nutzung) am Waldrestholzpotenzial

Das Waldrestholzpotenzial im Referenz-Szenario

Das Referenz-Szenario verfolgt keine Nachhaltigkeitsstrategie, weshalb im Bereich der nachhaltigen Waldbewirtschaftung gegenüber dem Ist-Zustand keine Änderung mehr zu verzeichnen sein wird.

Mobilisierungsgrad

Im Referenz-Szenario wird von Mobilisierungsgraden unter 100 % ausgegangen. Dabei wird nach den beiden Kompartimenten Schwachholz und Waldrestholz unterschieden. Für beide Mobilisierungsgrade wird davon ausgegangen, dass Strukturmaßnahmen wie die Bildung von Forstbetriebsgemeinschaften künftig weiter gefördert werden und künftig somit mehr Holz mobilisiert werden kann.

- Schwachholz: Für Schwachholz wird ein geringer Mobilisierungsgrad angenommen. Dies basiert auf der Annahme, dass sich mit Schwachholz die geringsten Preise erzielen lassen und somit der Anreiz der Mobilisierung für den Forstbetrieb am geringsten ist. Die angenommenen Werte werden in Tabelle 60 dargestellt.
- Waldrestholz: Für Waldrestholz wird ein höherer Mobilisierungsgrad angenommen. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass Waldrestholz aus bewirtschafteten Wäldern stammt, die zur Sicherung der Qualität gut gepflegt werden. Dies bedeutet, dass das Waldrestholz zum überwiegenden Teil aus dem Wald entfernt wird.

Nachhaltige Waldbewirtschaftung

Für die nachhaltig bewirtschaftete Waldfläche gelten die in der Modelldokumentation (Öko 2003d) aufgestellten Nachhaltigkeitskriterien. Für den Startzeitpunkt 2000 wird von einem Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Fläche von 31 % (3,3 Mio. ha) ausgegangen.

Zum Jahr 2010 erfolgt dann ein sprunghafter Anstieg auf 60 %, der je Dekade um weitere 10 % gesteigert werden kann. Damit werden im Jahr 2030 mit den gemachten Annahmen 80 % der Waldfläche in Deutschland nachhaltig bewirtschaftet.

Nutzungskonkurrenz

Die mögliche Nutzungskonkurrenz zur stofflichen Nutzung wird im Referenz-Szenario im vollen Umfang berücksichtigt.

Die zweite Nutzungsklasse, deren Holzsortimente sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden können wird nicht mit einbezogen. Damit werden im Referenz-Szenario nur jene Holzsortimente energetisch genutzt, die für eine stoffliche Nutzung nicht infrage kommen.

Unter den gemachten Annahmen reichen das Rohholz- und das Industrielholzpotenzial aus, um die stoffliche und energetische Nachfrage zu decken; die Mengennachhaltigkeit ist gewährleistet.

Tabelle 60 Szenarioparameter für das Referenz-Szenario

	2000	2010	2020	2030
Mobilisierungsgrad				
Schwachholz [%]	85	87	88	90
Waldrestholz [%]	90	92	93	95
Anteil nachhaltig bewirtschafteter Waldfläche [%]	31	60	70	80
Nutzungsklasse 2 einbezogen	nein	nein	nein	nein

Tabelle 61 Abschläge auf das Waldbolzpotezial im Referenzszenario im Jahr 2000

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	32,8%	18,9%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	15,0%	15,0%	10,0%	12,6%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh ⁵¹	4,3%	4,3%	5,7%	5,0%
...die Nutzungskonkurrenz	a ⁵²	12,5%	45,9%	15,0%	24,1%
Gesamt		29%	56%	51%	49%

Tabelle 62 Abschläge auf das Waldbolzpotezial im Referenzszenario im Jahr 2030

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	22,1%	13,0%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	10,0%	10,0%	5,0%	7,4%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh	8,4%	8,4%	11,0%	9,8%
...die Nutzungskonkurrenz	a	11,5%	43,3%	15,0%	22,4%
Gesamt		27%	53%	44%	44%

⁵¹ F = 31%; nh(Schwachholz) = 13,9%; nh(Schwachholz) = 18,4%

⁵² Für Schwachholz: $(a/(1+ma))$

Tabelle 63 *Waldholzpotenzial im Referenz-Szenario*

- Angaben in Mio. t(atro)/a -	2000	2010	2020	2030
Schwachholz (BHD 8-12 cm)	1,93	1,88	1,91	1,93
Schwachholz (BHD 12-16 cm)	1,87	1,84	1,89	1,94
Waldrestholz	4,64	4,73	5,07	5,43
Summe Waldholz	8,44	8,45	8,87	9,29
Summe Waldholz, in [PJ/a]	149	149	156	164

*Das Waldrestholzpotenzial im Umwelt-Szenario**Mobilisierungsgrad*

Im Umwelt-Szenario wird von Mobilisierungsgraden unterhalb von 100 % ausgegangen. Es werden dieselben Werte angenommen wie im Referenzszenario (vgl. weiter oben).

Nachhaltige Waldbewirtschaftung

Für die nachhaltig bewirtschaftete Waldfläche gelten die in der Modelldokumentation (Öko 2003d) aufgestellten Nachhaltigkeitskriterien. Für den Startzeitpunkt 2000 wird von einem Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Fläche von 31 % (3,3 Mio. ha) ausgegangen.

Zum Jahr 2010 erfolgt dann ein sprunghafter Anstieg auf 60 %, der je Dekade um weitere 10 % gesteigert werden kann. Damit werden im Jahr 2030 mit den gemachten Annahmen 80 % der Waldfläche in Deutschland nachhaltig bewirtschaftet.

Nutzungskonkurrenz

Im Umweltszenario ist lediglich das Waldholzpotenzial enthalten, das definitionsgemäß nur für eine energetische Nutzung infrage kommt. Die zweite Nutzungsklasse, deren Holzsortimente sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden können wird nicht mit einbezogen.

Damit werden im Umwelt-Szenario nur jene Holzsortimente energetisch genutzt, die für eine stoffliche Nutzung nicht infrage kommen.

Unter den gemachten Annahmen reichen auch hier die Rohholz- und Industrieholzpotenziale aus, um stoffliche und energetische Nachfrage zu decken; die Mengennachhaltigkeit ist also gewährleistet.

Tabelle 64 Szenarioparameter für das Umwelt-Szenario

	2000	2010	2020	2030
Mobilisierungsgrad				
Schwachholz [%]	85	87	88	90
Waldrestholz [%]	90	92	93	95
Anteil nachhaltig bewirtschafteter Waldfläche [%]	31	60	70	80
Nutzungsklasse 2 eingezogen	nein	nein	nein	nein

Tabelle 65 Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Umweltszenario im Jahr 2000

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	32,8%	18,9%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	15,0%	15,0%	10,0%	12,6%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh	4,3%	4,3%	5,7%	5,0%
...die Nutzungskonkurrenz	a	12,5%	45,9%	15,0%	24,1%
Gesamt		29%	56%	51%	49%

Tabelle 66 Abschläge auf das Waldholzpotenzial im Umweltszenario im Jahr 2030

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	22,1%	13,0%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	10,0%	10,0%	5,0%	7,4%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh	11,2%	11,2%	14,7%	13,1%
...die Nutzungskonkurrenz	a	11,5%	43,3%	15,0%	22,5%
Gesamt		29%	55%	46%	46%

Tabelle 67 Waldholzpotenzial im Umwelt-Szenario

- Angaben in [Mio. t(atro)/a] -	2000	2010	2020	2030
Schwachholz (BHD 8-12 cm)	1,93	1,88	1,88	1,87
Schwachholz (BHD 12-16 cm)	1,87	1,84	1,86	1,88
Waldrestholz	4,64	4,73	4,97	5,20
Summe Waldholz	8,44	8,45	8,70	8,95
Summe Waldholz, in [PJ]	149	149	153	158

Das Waldrestholzpotenzial im Biomasse-Szenario

Das Biomasse-Szenario maximiert die energetische Nutzung von Biomasse und stellt die Obergrenze des energetischen Nutzungspotenzials unter ökologischen Randbedingungen dar.

Mobilisierungsgrad

Im Biomasse-Szenario, welches einen maximalen Ausbau der energetischen Biomassenutzung vorsieht, wird von einem Mobilisierungsgrad von 100 % ausgegangen.

Nachhaltige Waldbewirtschaftung

Für die nachhaltige Waldbewirtschaftung gelten die gleichen Annahmen wie im Umwelt-Szenario.

Nutzungskonkurrenz

Im Biomasse-Szenario wird das Waldholz einbezogen, das zu den Nutzungsklassen „energetische Nutzung“ (3) sowie „stoffliche und energetische Nutzung“ (2) gehört. Bei den gemachten Annahmen reicht das Potenzial aus, um sowohl die angenommene stoffliche Nachfrage als auch die energetische zu bedienen. Damit steht das gesamte nachhaltige Potenzial für die energetische Nutzung bereit. Die Konkurrenz stellt aber ein mögliches Hemmnis für die energetische Nutzung dar.

Tabelle 68 Szenarioparameter für das Biomasse-Szenario

	2000	2010	2020	2030
Mobilisierungsgrad [%]	100	100	100	100
Anteil nachhaltig bewirtschafteter Waldfläche [%]	31	60	70	80
Nutzungsklasse 2 einbezogen	ja	ja	ja	ja

Tabelle 69 Abschlüsse auf das Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario im Jahr 2000

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	32,8%	18,9%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh	4,3%	4,3%	5,7%	5,0%
...die Nutzungskonkurrenz	a	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gesamt		4%	4%	37%	23%

Tabelle 70 Abschlüsse auf das Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario im Jahr 2030

Reduktion durch...	Symbol	Schwachholz		Waldrestholz	Gesamt
		BHD 8 - 12 cm	BHD 12 - 16 cm		
...die Berücksichtigung des realen Rohholzeinschlags	1-ar	0,0%	0,0%	22,1%	13,0%
...den Mobilisierungsgrad	1-mg	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
...die nachhaltige Waldbewirtschaftung	F*nh	11,2%	11,2%	14,7%	13,0%
...die Nutzungskonkurrenz	a	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gesamt		11%	11%	34%	24%

Tabelle 71 Waldholzpotenzial im Biomasse-Szenario

- Angaben in [Mio. t(atro)/a] -	2000	2010	2020	2030
Schwachholz (BHD 8-12 cm)	2,60	2,47	2,41	2,35
Schwachholz (BHD 12-16 cm)	4,07	3,87	3,78	3,68
Waldrestholz	6,06	6,06	6,26	6,44
Summe Waldholz	12,77	12,41	12,45	12,47
Summe Waldholz, in [PJ]	226	219	219	220

Im Biomasse-Szenario führt die Erhöhung des Anteils der nachhaltig bewirtschafteten Waldfläche zu einer Reduktion des Potenzials insbesondere zwischen 2000 und 2010.

5.3.6 Überblick zum energetisch nutzbaren Potenzial an Waldholz

Die folgende Tabelle zeigt nochmals die Potenziale aus Waldholz in der Übersicht.

Tabelle 72 Energetisch nutzbares Waldholzpotenzial in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	149	149	156	164
Umwelt	149	149	153	158
Biomasse	226	219	219	220

Beim Vergleich der hier ermittelten energetischen Restholzpotenziale mit Daten z.B. von Kaltschmitt (2003) ist folgendes zu beachten:

Sowohl Kaltschmitt als auch die vorliegende Studie beziehen ihre Daten aus BFH 2001 und greifen damit auf dieselbe Datenbasis zurück. Sie unterstellen eine maximale Ausschöpfung des Biomassepotenzials (vergleichbar dem Biomasse-Szenario). Dabei stimmen die Zahlen für die ermittelten Schwachholzpotenziale zwischen Biomasse und BFH 2001 gut überein, während das Waldrestholzpotenzial in den Abschätzungen der Stoffstromanalyse ca. 23% geringer ausfällt als das in BFH 2001 dargestellte.

Dieser Unterschied ist methodisch begründet: BFH 2001 (und damit auch Kaltschmitt) geht davon aus, dass *sämtliches* Rohholz eingeschlagen wird - also das ungenutzte Waldholz z.B. als zusätzliches Brennstoffpotenzial verfügbar ist - und dementsprechend viel Waldrestholz anfällt.

In den hier vorliegenden Untersuchungen wird das Waldrestholzpotenzial an den tatsächlichen Rohholzeinschlag von nur etwa 67% (BFH 2002, Stand 2000) gekoppelt. Für die Stoffstromanalyse ist das Restholzpotenzial in den Szenarien dementsprechend vermindert.

Die Ausnutzung des Rohholzpotenzials steigt in den Szenarien von 67% (Jahr 2000) auf 78% im Jahr 2030. Damit wird in der Stoffstromanalyse angenommen, dass gegenwärtig in den Wäldern zur Nutzung verfügbares Stammholz erst sehr lange nach 2030 tatsächlich eingeschlagen würde⁵³.

⁵³ Bei einer Trendfortschreibung des Rohholzeinschlages über das Szenario-Endjahr 2030 hinaus würde ein vollständiger Rohholzeinschlag gegen Ende des Jahrhunderts erreicht. Das bislang ungenutzte Rohholz aus dem Jahr 2000 (vgl. Kapitel 0) stünde dann zur energetischen Nutzung zusätzlich zur Verfügung.

5.4 Energetische Biomassepotenziale aus der Holzindustrie

Die Holzwirtschaft umfasst die Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke (Wirtschaftssektor NACE 20.1), die Holzwerkstoffindustrie mit den Furnier-, Sperrholz-, Holzfaserplatten- und Holzspanplattenwerken (NACE 20.2), sowie die nachfolgenden Holzveredelungswerke (Holzwaren, NACE 20.3-20.5) und die Möbelindustrie (NACE 36.1). Als Industrierestholz werden die durch die Holzbe- und -verarbeitung anfallenden Holzreste inklusive der anfallenden Holzwerkstoffreste angesehen.

Qualität und Anfall der Holzreste in den Bereichen zeigen deutliche Unterschiede, sodass das Potenzial einzeln diskutiert wird.

5.4.1 Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke

In diesem Teilbereich der Holzwirtschaft wird Stammholz, entrindet oder nicht entrindet, in Balken, Latten und Bretter geschnitten. Das Stammholz wird eventuell entrindet und der Zuschnitt von rechteckigen Produkten aus rundem Material führt zu Schneideresten. Je nach zukünftigem Einsatzzweck wird die Rohware gehobelt, getrocknet und imprägniert. Ein weiteres Nebenprodukt stellt Holzwole dar.

Beim Zuschnitt der Rundware fallen ca. 35 % als Schwarten und Spreissel (inkl. Rinde) an. Geht man von einem Input von ca. 15 bis 20 Mill. m³/a Stammholz aus, so fallen ca. 5 bis 7 Mill. m³/a Restholz an. Mit einem Gewicht von 800 kg/m³ (50 % Feuchte) erhält man ca. 4 bis 5,6 Mill. t/a (Frischmasse). Diese Abschätzung stimmt gut mit der Angabe von 5 Mill. t/a (FM) nach Leible (2003) überein.

Die Holzreste werden zu einem geringen Teil energetisch genutzt. Ein großer Teil wird stofflich in Holzwerkstoffwerken und der Papierindustrie eingesetzt. Rinde wird teilweise in den Gartenbau abgegeben.

5.4.2 Holzwerkstoffe

In den Furnier-, Sperrholz-, Holzfaserplatten- und Holzspanplattenwerken werden zum einen Resthölzer aus Sägewerken u.a. Quellen und zum anderen Stammholz und Industrieholz eingesetzt. Im Gegensatz zu Sägewerken ist die Ausbeute deutlich höher. Der Anfall wird nach Leible (2003) auf ca. 0,5 Mill. t/a Frischmasse geschätzt. Die Reste setzen sich aus Rinde und Produktabschnitten zusammen.

5.4.3 Holzverarbeitung und Möbelindustrie

Dieser Bereich umfasst die Herstellung von Konstruktionsteilen und Ausbauteilen (Zimmerei, Tischlerei), die Herstellung von Fertigbauteilen (Holzfertighäuser), Verpackungsmittel (Paletten, Kisten, Fässern und Trommeln) und Möbel (Sofas, Schränke etc.). Die Holz- und Möbelindustrie verarbeitet dabei die Produkte der Sägewerks- und Holzwerkstoffindustrie. Die Erfahrung zeigt, dass der Holzresteanfall deutlich je nach Verarbeitung schwankt. So fallen in der Zimmerei ca. 10 % des Inputs und bei hochqualitativen Anwendungen, z.B. Fenster, ca. 50 % des Eingangsmaterials als Reste an.

Nach Leible (2003) fallen in diesem Bereich ca. 3 Mio. t/a (Frischmasse) an. Der Feuchteanteil wird auf ca. 15 % geschätzt, da hohe Qualitätsansprüche in diesem Bereich herrschen. Das Eingangsmaterial ist meistens getrocknet. Traditionell wird ein hoher Anteil direkt in den Betrieben energetisch genutzt.

5.4.4 Energetisch und stofflich genutzte Resthölzer

Die Bilanz über den Restholzanfall und ihre energetische Nutzung stellt sich nach Leible (2003) wie folgt dar:

Tabelle 73 Restholzanfall und energetische Nutzung von Industrieresthölzern nach Herkunft in Deutschland

Angaben in Mio. t/a Frischmasse	Aufkommen	Energetische Nutzung	Stoffliche Nutzung
Sägewerk	5,0	(0,5)	
Holzwerkstoffindustrie	0,5	0,35	
Holz / Möbelindustrie	3,0	(3)	
Summe	8,5	3,85	4,65

Das Potenzial für energetische Nutzung wird somit auf 3,85 Mill. t/a (Frischmasse) geschätzt. Die verbleibenden 4,65 Mill. t/a werden stofflich in der Holzwerkstoffindustrie (z.B. Spanplatte) oder in der Papierindustrie genutzt. Die Aufgliederung der energetischen Nutzung soll dazu genutzt werden, die Qualität der Resthölzer abzuleiten. Unterstellt man, dass die energetische Nutzung primär in den Herkunftsbereichen durchgeführt wird in denen die Resthölzer auch anfallen, so ist eine Abschätzung des Energiegehalts möglich.

Tabelle 74 Energiepotenzial des Restholzanfalls zur energetischen Nutzung (nach Abzug der stofflichen Nutzung)

Herkunftsbereich	Energetische Nutzung (Mio. t/a Frischmasse)	Feuchte (%)	Heizwert (MJ/kg)	Heizwert Gesamt (PJ/a)
Sägewerk	(0,5)	50	8	4
Holzwerkstoffindustrie	0,35	15	15,3	46
Holz / Möbelindustrie	(3)	15	15,3	5
Mittelwert			14,4	
Summe	3,85			55

Für Holzreste aus Sägewerken wird dabei eine Feuchte von 50 % unterstellt, da das Holz frisch anfällt und Anteile von Rinde enthält. Für Reste aus der Holzverarbeitung und Möbelindustrie sowie der Holzwerkstoffindustrie wird eine Feuchte von 15 % angenommen. Es ergibt sich ein mittlerer Heizwert von 14,4 MJ/kg. Insgesamt berechnet sich ein Potenzial von 55 PJ/a.

5.4.5 Potenzialveränderung in den Szenarien

Eine Veränderung des oben identifizierten Potenzials im Szenariozeitraum unter den verschiedenen Szenariobedingungen kann nicht quantifiziert werden. Folgt man der oben angelegten Ableitung, so wird ein Großteil des Potenzials in der Holzverarbeitung realisiert. Hierzu ist festzuhalten, dass das Potenzial nahezu unabhängig von der Bereitstellung aus der heimischen Forstwirtschaft ist. Der Bedarf der Holzverarbeitung und Möbelindustrie kann dabei aus inländischen wie ausländischen Quellen gedeckt werden.

Die Entwicklung der Nachfrage nach Produkten der Holzverarbeitung bestimmt nach der obigen Ableitung damit das Energiepotenzial. Die Nachfrage wird von der Bauentwicklung getragen:

1. Im Wohnungsneubau ist insgesamt eine abnehmende Tendenz zu beobachten. Träger der Nachfrage ist hier der Wunsch nach Einfamilienhäusern (dort insb. Holz in Dachstühlen). Für das Umweltszenario kann eine weitere Nachfrage in der Errichtung von Holzhäusern angenommen werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass im Umweltszenario die Errichtung von Einfamilienhäusern insgesamt als negativ im Sinne einer Nachhaltigkeitsstrategie beurteilt wird. Somit wäre eine Erhöhung des Anteils der Holzbauweise durch eine im Umweltszenario gegenüber dem Referenzszenario reduzierte Neubautätigkeit bei Einfamilienhäusern ohne Folgen auf den Gesamtbedarf.
2. Eine gegenüber dem Wohnungsneubau bedeutende Nachfrage besteht in der Sanierung von Holzkonstruktionen, insbesondere von Dachstühlen. Diese Nachfrage ist indifferent gegenüber den Szenarioannahmen.
3. Die weitere wirtschaftliche Entwicklung der Holzverarbeitung und Möbelindustrie kann nicht quantifiziert werden. Unterschiede hinsichtlich Referenz- und Umweltszenario können nicht gemacht werden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass eine Abschätzung über die weitere wirtschaftliche Entwicklung der Holzverarbeitung und Möbelindustrie nicht sinnvoll erscheint.

Eine Differenzierung hinsichtlich einer Nachhaltigkeitsstrategie ist komplex und nur an einzelnen Beispielen durchführbar. Dabei ist zu beobachten, dass partiell eine spezifische Steigerung des Holzeinsatzes gefordert wird.

Gleichzeitig wird aber durch andere Maßnahmen die Gesamtnachfrage gedämpft. Die Auswirkungen der diskutierten Beispiele auf die Gesamtnachfrage bleiben dabei gering. Der Einfluss der Konjunkturentwicklung ist bedeutend höher einzuschätzen. Es werden daher für die Potenzialabschätzung keine weiteren zeitlichen wie szenarioabhängigen Maßnahmen eingestellt.

Das Potenzial wird als konstant angenommen.

5.4.6 Überblick zum energetisch nutzbaren Potenzial an Industrierestholz

Die folgende Tabelle zeigt nochmals die Biomassepotenziale aus Industrierestholz als Übersicht.

Tabelle 75 Energetisch nutzbares Biomassepotenzial aus Industrierestholz in den Szenarien

Angaben in PJ	2000	2010	2020	2030
Referenz	55	55	55	55
Umwelt	55	55	55	55
Biomasse	55	55	55	55

5.5 Energetische Biomassepotenziale aus der Abfallwirtschaft

Neben der Land- und Forstwirtschaft bestehen auch nennenswerte Potenziale zur energetischen Biomassenutzung in den verschiedenen Bereichen der Abfallwirtschaft. Im Einzelnen werden dabei getrennt erfasste organische Bestandteile des Hausmülls, potenziell separierbare Anteile sowie Biomassepotenziale aus Altholz eingezogen.

Weitere Abfallfraktionen (feste industrielle Reststoffe sowie industrielle Substrate) werden ebenfalls betrachtet, aber nicht einer detaillierten Potenzialanalyse unterzogen.

5.5.1 Biomasse im Hausmüll

Unter dem Begriff *Hausmüll* werden im Projekt folgende Stoffströme thematisiert⁵⁴:

1. Hausmüll - Gesamtheit der Abfälle aus privaten Haushalten, die von den Entsorgungspflichtigen selbst oder von beauftragten Dritten in genormten, im Entsorgungsgebiet vorgeschriebenen Behältern regelmäßig gesammelt, transportiert und der weiteren Entsorgung zugeführt werden (inkl. erfasster Wertstoffe).
2. Geschäftsmüll - Gewerbeabfall, der mit dem Hausmüll in einem gemeinsamen Erfassungssystem gesammelt wird.
3. Sperrmüll - Feste Abfälle, die wegen ihrer Sperrigkeit nicht in die im Entsorgungsgebiet vorgeschriebenen Behälter passen und getrennt gesammelt und transportiert werden.
4. Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle - In Gewerbegebieten, auch Geschäften, Dienstleistungsbetrieben, öffentlichen Einrichtungen und Industrie anfallende Abfälle, soweit sie nach Art und Menge gemeinsam mit oder wie Hausmüll entsorgt werden können. Dazu zählen auch die Reste aus der Sortierung von Abfällen.

Hinsichtlich der organischen Anteile wird auf die Biomasseverordnung verwiesen. Wird der dortige Ansatz auf „den“ Hausmüll übertragen, lassen sich im Vergleich zu den Vorgaben der BiomasseVO folgende Fraktionen des Stoffstroms dem Begriff „Biomasse“ zuordnen:

⁵⁴ unter Berücksichtigung der Definitionen gemäß der Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 24.07.2002 sowie der Abfallablagerungsverordnung - Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung – AbfAbIV) vom 20.02.2001

Tabelle 76 Biomasse im Hausmüll und Anerkennung gemäß Biomasseverordnung

Fraktion	Regenerativer Masseanteil [Gew.-%]	Regenerativer Energieanteil [%]	Mittlerer Heizwert H_u [MJ/t]	Anerkennung als Biomasse
Bio- und Grünabfälle	100	100	4.000 – 6.000	Ja
Papier, Pappe, Karton	100	100	12.000 – 14.000	Nein
Verbunde*	20 - 25	21 - 22	13.500 - 14.000	Nein
Holz / Möbel	80 - 100	80 - 100	14.000 – 15.000	Ja**
Textilien, Leder, Gummi	50	38 – 50	12.000	Nein
Windeln	85	36	5.500	Nein
Sonstige Abfälle	10 - 30	10 – 29	4.000 – 7.000	Nein
Feinmüll < 8 mm	55	100	2.500	Nein***

* u.a. Papierverbunde

** unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien nach §3 Nr. 3/4 BiomasseV

*** bezogen auf die Mischfraktion; separierte Anteile wie z.B. Grasschnitt: ja

Quelle: Kern/Sprick (2001)

Die einzelnen Fraktionen lassen sich wie folgt kommentieren:

- *Bio- und Grünabfälle* sind insbesondere im Bereich des Hausmülls als relevante Abfallfraktion einzustufen. Sie gelten unter Anwendung des § 2 Abs. 2 Nr. 1 der Bioabfallverordnung⁵⁵, gemäß § 2 Nr. 4 der BiomasseV als anerkannte Biomasse. Darunter fallen z.B.: Bioabfälle aus der Nahrungsmittelverarbeitung, kompostierbare Küchen- und Kantinenabfälle, getrennt erfasste Bioabfälle privater Haushalte und des Kleingewerbes, Bioabfälle aus der Holzbe- und -verarbeitung, Landschaftspflegeabfälle. Ein gewisser Anteil an Verunreinigungen (z.B. kleinere Papierreste) wird als ‚nicht verhinderbar‘ toleriert.
- Die Fraktion *Papier, Pappe, Karton* wird gemäß § 3 Nr. 5 Biomasseverordnung nicht als Biomasse anerkannt. Hier hat die stoffliche Wiederverwertung abfallwirtschaftlich sowie mit Blick auf Energie- und CO₂-Bilanzen besondere Bedeutung. Außerdem bedarf die Verbrennung zur Stromerzeugung von stofflich nicht verwerteten Altpapiersortimenten keiner Vorrangstellung im Rahmen des EEG⁵⁶.
- Der in der obigen Tabelle ausgewiesene regenerative Anteil der *Verbunde* resultiert im Wesentlichen aus Papieranteilen (z.B. im Bereich der Verpackungen). Die obigen Anmerkungen zu Papier, Pappe, Karton gelten entsprechend.

55 Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV), vom 21. September 1998, zuletzt geändert am 25 April 2002; Definition gemäß § 2 Nr. 1: Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können; hierzu gehören insbesondere die in Anhang 1 Nr. 1 genannten Abfälle; Pflanzenreste, die auf forst- oder landwirtschaftlich genutzten Flächen anfallen und auf diesen Flächen verbleiben, sind keine Bioabfälle;

56 aus: Begründung zur Biomasseverordnung vom 21.06.2001

- Die Fraktion *Holz/Möbel* bezieht sich auf Altholz, bestehend aus Gebrauchtholz (gebrauchte Erzeugnisse aus Holz, Holzwerkstoffe oder Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil) oder Industrierestholz (in Betrieben der Holzbe- oder verarbeitung anfallende Holzreste sowie in Betrieben der Holzwerkstoffindustrie anfallende Holzwerkstoffreste), das als Abfall anfällt. Altholz ist gemäß § 2 Abs. 3 Nr. 1 der Biomasseverordnung unter Berücksichtigung der dort genannten Einschränkungen als Biomasse anerkannt. Die Vorgaben der Altholzverordnung⁵⁷ sind darüber hinaus zu berücksichtigen.
- Die Mischfraktion *Textilien, Leder, Gummi* ist mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung. Für deren Hauptanteil – den Textilien – wird vorrangig die Wiederverwendung bzw. stoffliche Verwertung angestrebt. Eine Anerkennung als Biomasse ist daher gemäß § 3 Nr. 8 der Biomasseverordnung nicht gegeben.
- *Windeln* bzw. Inkontinenzabfälle bestehen in ihrem Mengenaufkommen aus einer Mischung aus Cellulose / Papier, Kunststoff und Fäkalien. Hinsichtlich der Einstufung als Biomasse greifen somit die Ausschlusskriterien gemäß § 3 Nr. 1, 5 und 8 der Biomasseverordnung.
- Die Gruppe der *sonstigen Abfälle* beinhaltet hinsichtlich der regenerativen Anteile im wesentlichen Verbundstoffe und – produkte (z.B. Geräte, Polstermöbel) mit reduzierten biogen organischen Komponenten. Eine Anerkennung als Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung ist in diesem Zusammenhang nicht gegeben.
- Die Fraktion *Feinmüll < 8 mm* wird aus sortiertechnischen Gründen separat ausgewiesen. Die hier beinhalteten regenerativen Anteile sind im Wesentlichen der Fraktion Bioabfall zuzuschlagen (z.B. Grasschnitt, Laub, etc.).

Unter Berücksichtigung der obigen Zusammenhänge beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen im Wesentlichen auf die Fraktion der Bioabfälle. Die anderen Anteile werden im Rahmen der generellen abfallwirtschaftlichen Situation und Entwicklung mengenmäßig dargestellt. Hinsichtlich der Fraktion Holz/Möbel sei auf Kapitel 7.2 (Potenzialdaten Altholz) verwiesen.

Abfallwirtschaftliche Rahmenbedingungen

Hinsichtlich der ökologischen Modernisierung der Abfallwirtschaft sind in den letzten Jahren zweifelsfrei Fortschritte erzielt worden. Eine endgültige Lösung, die den Kriterien der Nachhaltigkeit weitestgehend entspricht, ist jedoch noch nicht erreicht:

„Vergleicht man die Lage der Abfallwirtschaft am Ende der neunziger Jahre mit dem Befund Ende der achtziger Jahre, ist festzustellen, dass im Hinblick auf die Mengenreduzierungen und die Verminderung der Umweltbelastungen gewisse Erfolge erzielt worden sind. das bedeutet aber noch nicht, dass durch die Abfallpolitik der neunziger Jahre eine völlig neue Ära in der Abfallwirtschaft eingeleitet worden sei.“ (zit. n. SRU 2001)

Konform zu dieser Einschätzung, ist auch die aktuelle Situation der Abfallwirtschaft nach wie vor von einer starken Dynamik geprägt.

⁵⁷ Verordnung über die Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV), vom 23. August 2002

Auf der Grundlage der durch das KrW-/AbfG⁵⁸ vorgegebenen Rahmenbedingungen werden dabei folgende Schwerpunkte gesetzt⁵⁹:

- Weitere Verankerung der Produktverantwortung
- Absicherung der umweltverträglichen Abfallverwertung unter Berücksichtigung der Schließung von Stoffkreisläufen, der Ressourcenschonung sowie des Klimaschutzes.
- Schutz des Bodens vor schädlichen Einträgen
- Umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen

Die nachfolgenden Ausführungen stellen für das Bezugsjahr 2000 einige relevante abfallrechtliche Anforderungen als Prämissen für die derzeitige Situation heraus. Für den Bereich des organischen Hausmülls – im Sinne der Definition nach Abschnitt 5.5.1 – lassen sich dabei bezüglich der aktuellen Situation folgende *stoffstromrelevante Rahmenbedingungen* darstellen:

- Priorität der Abfallvermeidung gemäß § 4 Abs. 1 Nr.1 KrW-/AbfG; mögliche Auswirkungen (Beispiele):
 - Eigenkompostierung → Bio- und Grünabfälle / Feinmüllanteile
 - Konsum von Mehrwegartikeln → papierhaltige Verbunde, Windeln
 - Wieder- / Weiterverwendung → Holz / Möbel
- Verwertungspriorität gemäß § 4 Abs. 1 Nr. 2 KrW-/AbfG in Verbindung mit den Anforderungen zur Getrennthaltung gemäß § 5 Abs. 2 Satz 4 KrW-/AbfG sowie den generellen Rahmenbedingungen der Verwertungspriorität gemäß § 5 Abs. 4 und 5 KrW-/AbfG⁶⁰; mögliche Auswirkungen:
 - Forcierung der Getrenntsammlung → Bio- und Grünabfälle, Holz / Möbel, Textilien, Windeln, Verbunde
 - Stoffstromtrennung über mechanische Aufbereitungsanlagen

Ergänzt werden die Rahmenbedingungen des KrW-/AbfG durch die Vorgaben der TA Siedlungsabfall⁶¹ und hier insbesondere durch die Zuordnungskriterien für die Verwertung sowie die allgemeinen Anforderungen an die Stoffliche Verwertung und Schadstoffentfrachtung.

Für die organischen Abfälle sind zudem die Übergangsvorschriften für Abfälle, die Deponien zugeordnet werden, relevant.

Hier müssen spätestens seit dem 1. Juni 1999 durch ‚zusätzliche Maßnahmen‘ die Gehalte an nativ – organischen Bestandteilen in den Abfällen reduziert werden.

58 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), vom 27. September 1994, zuletzt geändert am 21. August 2002

59 siehe hierzu auch: Jürgen Trittin im Vorwort zur Tagung: Biomasse und Abfallwirtschaft – Chancen, Risiken, Perspektiven, ANS e.V., Berlin, November 2002

60 hier: technische Machbarkeit, wirtschaftliche Zumutbarkeit und Umweltverträglichkeit (im Vergleich zur Beseitigung)

61 Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993

Hinsichtlich der *Zuordnung von organischen Abfällen zu Verwertungsanlagen* sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

Gemäß § 6 KrW-/AbfG hat im Rahmen der generellen Abgrenzung zwischen stofflicher und energetischer Verwertung die besser umweltverträgliche Verwertung Vorrang. In § 5 Abs. 5 werden Prüfkriterien bzw. Umweltbelastungsaspekte genannt, die bei einer Einschätzung der Umweltverträglichkeit eines Entsorgungsvorganges zu berücksichtigen sind.

Nach § 5 Abs. 2 KrW-/AbfG wird eine ‚hochwertige Verwertung‘ angestrebt. Der Begriff der Hochwertigkeit wird dabei jedoch in seiner rechtlichen Bestimmtheit nicht weiter eingegrenzt. Relevant erscheint zudem die Vorgabe, dass gemäß § 5 Abs. 4 KrW-/AbfG für den durch einen Verwertungsprozess gewonnenen Stoff bzw. die gewonnene Energie auch ein Markt bzw. eine Absatzmöglichkeit vorhanden sein soll.

Hinsichtlich einzelner Fraktionen des ‚organischen Hausmülls‘ sind die Vorgaben der Bioabfallverordnung zu berücksichtigen. Hierin sind gemäß § 3 definierte Bioabfälle vor einer Aufbringung auf Böden einer Behandlung zuzuführen, welche die seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit gewährleistet. Darüber hinaus darf der Bioabfallbehandler nur solche Materialien verwenden, von denen angenommen werden kann, dass sie nach einer Behandlung die Anforderungen gemäß § 4 Abs. 3 BioAbfV hinsichtlich der Schadstoffgehalte einhalten.

Stoffströme und Potenziale im Bereich organische Hausmüllanteile

Hinsichtlich der aktuellen Situation zum Bezugsjahr 2000 wird nachfolgend die Entwicklung der Abfallmengen und Stoffströme seit dem Jahr 1996 (Inkrafttreten des KrW-/AbfG) dargestellt. In Anlehnung an die Differenzierung des Statistischen Bundesamtes wird dabei in folgende Abfallarten differenziert:

Haushaltsabfälle:

- Resthausmüll: Nach weitest gehender Getrenntsammlung von Wertstoffen verbleibender Haus- und Geschäftsmüll
- Sperrmüll
- Über die Biotonne getrennt erfasste Bioabfälle
- Sonstige getrennt erfasste Wertstoffe (Glas, Papier, Kunststoffe, ...)

Andere Siedlungsabfälle

- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- Garten- und Parkabfälle aus dem Bereich der kommunalen Grünschnittkompostierungsanlagen
- Straßenkehricht
- Marktabfälle

Weitere getrennt erfasste organische Abfallmengen aus dem gewerblich/industriellen Bereich werden hier nicht thematisiert. Sie werden in den Bereichen „Altholz“ (Abschnitt 5.5.5), industrieller fester Bioabfall“ (Abschnitt 5.5.6) und „industrielle Substrate“ (Abschnitt 5.5.7) behandelt. Auch die Holzsortimente der Fraktionen Resthausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall werden im Bereich „Altholz“ dargestellt.

Mengenentwicklung bis zum Jahr 2000

Die Mengenentwicklung lässt sich für den Bereich der *Haushaltsabfälle* für den Zeitraum 1996 bis 2000 in absoluten und spezifischen Zahlen wie folgt darstellen:

Tabelle 77 Bisherige Mengenentwicklung im Bereich der Haushaltsabfälle

Abfallart	Einheit	1996	1997	1998 ¹	1999 ²	2000 ³
Resthausmüll	1.000 t	19.875	18.476	17.313	16.510*	15.022*
	kg/E	242	225	211	201	183
Sperrmüll	1.000 t	3.003	3.170	3.174	2.219	3.201
	kg/E	37	39	39	27	39
Bioabfall	1.000 t	2.413	2.935	3.308	3.185	4.022**
	kg/E	29	36	40	39	49
Sonst. Wertstoffe	1.000 t	9.838	11.629	12.076	12.090	13.298
	kg/E	120	142	147	147	162
Gesamt	1.000 t	35.129	36.210	35.871	34.004	35.543
	kg/E	428	441	437	414	432

* die Positionen „Hausmüll“ und „andere Haushaltsabfälle“ gem. Stat. Bundesamt werden hier zusammengefasst; nach PROGNOSE wurden im Jahr 2000 14,96 Mio. t erfasst; ** nach PROGNOSE: 3,78 Mio. t

¹ Hamburg teilweise geschätzt, ² vorläufige Zahlen, ³ Schätzung

Quelle: Mengen + Einwohnerzahlen nach Statistisches Bundesamt (www.destatis.de); eigene Recherchen

Bei einer annähernden Konstanz des Bruttoaufkommens ergab sich in den letzten Jahren eine deutliche Verlagerung von den Abfällen zur Beseitigung hin zu den Abfällen zur Verwertung. Während 1996 noch ca. 65 % des Gesamtaufkommens aus Haushalten beseitigt wurden, waren es im Jahr 2000 nur noch ca. 51 %.

Hinsichtlich der „anderen Siedlungsabfälle“ ergibt sich folgende Mengenentwicklung:

Tabelle 78 Bisherige Mengenentwicklung im Bereich der „anderen Siedlungsabfälle“

Abfallart	Einheit	1996	1997	1998 ¹	1999 ²	2000 ³
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	1.000 t	5.317	5.305	5.079	5.306	5.231
	kg/E	65	65	62	65	64
Garten- / Parkabfälle	1.000 t	3.069	3.216	3.137	4.208	4.149
	kg/E	37	39	38	51	50
Straßenkehricht	1.000 t	811	778	645	672	662
	kg/E	10	9	8	8	8
Marktabfälle	1.000 t	65	83	93	56	55
	kg/E	< 1	1	1	< 1	< 1
Gesamt	1.000 t	9.262	9.382	8.954	10.242	10.097
	kg/E	113	114	109	124	122

¹ Hamburg teilweise geschätzt, ² vorläufige Zahlen, ³ Schätzung

Quelle: Mengen + Einwohnerzahlen nach Statistisches Bundesamt (www.destatis.de); eigene Recherchen

Zusammensetzung der Mischabfälle

Die als Mischabfall ausgewiesenen Abfallarten beinhalten neben den bereits separat erfassten Fraktionen zusätzliche organische Anteile, die zukünftig energetisch nutzbar sein können. Mangels einer aktuellen, bundesweiten Abfallanalyse wird hinsichtlich der Einschätzung der entsprechenden Anteile auf eine Ausarbeitung von Kern/Sprick (2001) zurück gegriffen, in welcher auf der Basis von regionalen Abfallanalysen eine bundesweite Zusammensetzung heterogener Abfallarten modelliert wird. Danach lassen sich die organischen Abfallarten im Bezugsjahr 2000 durch folgende Verteilungen darstellen:

Tabelle 79 Organische Anteile im Resthausmüll (2000)

Fraktion	Anteil [%]	Aufkommen	
		[1.000 t]	[kg/E]
Bio- und Grünabfälle	29,6	4.446	54
Papier, Pappe, Karton	14,3	2.148	26
Verbunde	6,9	1.037	13
Holz / Möbel	1,6	240	3
Textilien, Leder, Gummi	2,6	391	5
Windeln	5,5	826	10
Glas, Metall, Kunststoff, Mineralien	16,5	2.479	30
Sonstige Abfälle	9,0	1.352	16
Feinmüll < 8 mm	14,0	2.103	26
Gesamt	100,0	15.022	183

Quelle: Kern/Sprick (2001), eigene Berechnungen

Tabelle 80 Organische Anteile im Sperrmüll (2000)

Fraktion	Anteil [%]	Aufkommen	
		[1.000 t]	[kg/E]
Bio- und Grünabfälle	2,4	77	1
Papier, Pappe, Karton	2,9	93	1
Verbunde	22,3	714	9
Holz / Möbel	41,0	1.312	16
Textilien, Leder, Gummi	0,8	26	< 1
Glas, Metall, Kunststoff, Mineralien	16,1	515	6
Sonstige Abfälle	14,5	464	6
Gesamt	100,90	3.201	39

Quelle: Kern/Sprick (2001), eigene Berechnungen

Tabelle 81 Organische Anteile in den haussmüllähnlichen Gewerbeabfällen (2000)

Fraktion	Anteil [%]	Aufkommen	
		[1.000 t]	[kg/E]
Bio- und Grünabfälle	8,3	439	5
Papier, Pappe, Karton	7,4	391	5
Verbunde	12,5	661	8
Holz / Möbel	12,2	645	8
Textilien, Leder, Gummi	1,8	95	1
Glas, Metall, Kunststoff, Mineralien	30,3	1.601	19
Sonstige Abfälle	27,5	1.454	18
Gesamt	100,0	5.286	64

Quelle: Kern/Sprick (2001), eigene Berechnungen

Auf Basis dieser Disaggregation der Stoffströme aus biomasserelevanten Anteilen können genauere Überlegungen zu den Potenzialen erfolgen.

Bio- und Grünabfälle aus Haushalten

Das Gesamtpotenzial an Bioabfällen aus Haushalten resultiert aus den zu entsorgenden Küchenabfällen (ca. 60 – 90 kg/EW*a) und den Gartenabfällen (ca. 1,5 – 3,5 kg/m²*a, bzw. 20 – 330 kg/EW*a nach Doedens 1996). Ein Großteil der Gartenabfälle wird von den Haushalten eigenkompostiert. Als theoretisches Potenzial hinsichtlich einer möglichen Biomasse – Nutzung kann somit das durch die Haushalte über getrennte Erfassungssysteme (Biotonne) oder das Resthausmüllgefäß zur Entsorgung bereitgestellte Mengenaufkommen definiert werden. In diesem Zusammenhang sind folgende Potenziale darstellbar:

Tabelle 82 Theoretische Potenziale an Bio- und Grünabfällen aus Haushalten (2000)

Herkunft	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]
<i>Getrennte Erfassung</i>		
Biotonne	4.022	49
<i>Zur Beseitigung</i>		
Bio- und Grünabfälle im Resthausmüll*	5.603	68
Bio- und Grünabfälle im Sperrmüll	77	1
Gesamt	9.702	118

* incl. 55 Gew.-% der Feinmüllfraktion

Hinsichtlich der technischen Potenziale ist zu berücksichtigen, dass selbst bei gut funktionierenden Erfassungskonzepten der Anteil an Organik im Resthausmüll nicht vollständig erfasst werden kann.

Wird von einem Toleranzwert an Organik im Resthausmüll von 25 kg/EW*a ausgegangen (nach Fricke 2000), ergibt sich – wenn keine weitere Abschöpfung der Mengen aus dem Bereich der Eigenkompostierung unterstellt wird – gemäß den obigen Herleitungen ein technisch verfügbares Potenzial aus dem Bereich der Haushalte von ca. 7,6 Mio. t.

Andere Ansätze gehen hinsichtlich der verfügbaren Potenziale an Bioabfällen aus Haushalten von 7,3 Mio. t/a (nach Hartmann/Kaltschmitt 2002) bzw. > 8 Mio. t/a (nach Vogt 2002 - hier zusätzliche Berücksichtigung eigenkompostierter Mengenanteile) aus.

Über die Mengen, die eigenkompostiert werden, sind derzeit keine genauen Angaben verfügbar. Grobe Einschätzungen aus Fachkreisen gehen von ca. 3 – 7 Mio. t/a aus (Fricke 2000).

Die Zusammensetzung der Bio- und Grünabfälle aus Haushalten ist vergleichsweise großen saisonalen und regionalen Schwankungen unterworfen. Neben den jahreszeitlichen Abhängigkeiten wirken sich insbesondere die durch die jeweiligen Gebietskörperschaften vorgegebenen Erfassungsmodalitäten⁶² auf Menge und Zusammensetzung der erfassten Bioabfälle aus. Während im Zeitraum Januar bis März – besonders bei extremen Witterungsverhältnissen - über die Biotonne zu einem großen Anteil Küchenabfälle erfasst werden, können in der warmen Jahreszeit bis zu 80 % der Materialien aus Gartenabfällen bestehen. Folgende jahreszeitliche Verteilungen sind dabei anzutreffen (nach Fricke/Tirk/Vogtmann 1989):

Zeitraum	Teilstrom
Januar bis März	Küchenabfälle, Tannengrün, Blumenabfälle, Laub
April bis Juni	Baum- und Strauchschnitt, Beetabdeckmaterialien, Rasenschnitt, Küchenabfälle, Restlaub
Juli bis September	Rasenschnitt, Blumen, Küchenabfälle, Wurzelstrünke
Oktober bis Dezember	Laub, Baum- und Strauchschnitt, Fallobst, Küchenabfälle

Eigene Untersuchungen für ein Bundesland (IZES 2001) gehen im Hinblick auf das Gesamtpotenzial davon aus, dass sich die im Rahmen der öffentlichen Abfallentsorgung bereitgestellten Bioabfallmengen im Jahresmittel zu ca. 50 % aus Garten- und zu ca. 50 % aus Küchenabfällen zusammensetzen. Über die Biotonne werden tendenziell in einem erhöhten Umfang Gartenabfälle entsorgt, während größere Anteile der Küchenabfälle – trotz eingeführter Biotonne – nach wie vor im Resthausmüll verbleiben.

Der Störstoffgehalt im Bioabfall gilt als ein erstes Indiz hinsichtlich der Qualität der getrennt erfassten Materialien. Im Rahmen einer Befragung durch Fricke (2000) weisen 24,6 % der befragten Verwaltungseinheiten mit Biotonnen einen Störstoffgehalt < 2 %, 58,6 % < 4 % und 73,1 % < 5 % aus (11,3 % lagen > 5 % und 15,3 % machten keine Angaben).

Der größte Störstoffeintrag erfolgt dabei durch Folienkunststoffe.

Bio- und Grünabfälle aus anderen Siedlungsabfällen

In anderen Siedlungsabfällen sind weitere Potenziale für Biomasse enthalten, die im wesentlichen anteilig aus den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen (Flächenpflege, Kantinenabfälle, Reste aus Einzelhandel, Marktabfälle, etc.) sowie aus kommunal verwerteten Garten- und Parkabfällen resultieren. Folgende Potenziale sind diesbezüglich darstellbar:

⁶² hier: zulässige Abfallstoffe in der Biotonne (z.B. Papier, Fleisch, ..), Gebührenbeaufschlagung der Biotonne, bereitgestelltes Gefäßvolumen, Abfuhrintervalle, etc.

Tabelle 83 Theoretische Potenziale anderer Bio- und Grünabfälle (2000)

Herkunft	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]
Getrennte Erfassung		
Kommunale Garten- / Parkabfälle	4.149*	50*
Zur Beseitigung		
Bio- und Grünabfälle in den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen	439	5
Gesamt	4.588	55

* ohne direkt gemulchtes Material; Vogt (2002) geht hier von einem Gesamtpotenzial von 8 – 10 Mio. t/a aus.

Hinsichtlich der Zusammensetzung bestehen die Garten- und Parkabfälle im Jahresmittel zu ca. 60 – 80 Vol.-% aus holzigen Bestandteilen (Äste, Zweige) und zu 20 – 40 Vol.-% aus Laub und krautigem Material (vgl. Fischer 1988). Die Bio- und Grünabfälle aus dem Bereich der hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle werden qualitativ den Bioabfällen aus Haushalten gleichgesetzt. Insgesamt lassen sich zum Bezugsjahr 2000 folgende theoretischen Potenziale an Bio- und Grünabfällen aus dem Bereich der Siedlungsabfälle darstellen:

Tabelle 84 Theoretische Potenziale an Bio- und Grünabfällen - gesamt (2000)

Herkunft	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]
Getrennte Erfassung		
Biotonne*	4.022	49
Kommunale Garten- / Parkabfälle**	4.149	50
Getrennte Erfassung gesamt	8.171	99
Zur Beseitigung		
Bio- und Grünabfälle im Resthausmüll***	5.603	68
Bio- und Grünabfälle im Sperrmüll	77	1
Bio- und Grünabfälle in den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen	439	5
Beseitigung gesamt	6.119	74
Theoretisches Potenzial gesamt	14.290	173

* ohne eigenkompostiertes Material: ca. 3 – 7 Mio. t/a; ** ohne direkt gemulchtes Material; Vogt (2002) geht hier von einem Gesamtpotenzial von 8 – 10 Mio. t/a aus.; *** inkl. 55 Gew.-% der Feinmüllfraktion

Holzabfälle im Bereich der Siedlungsabfälle

Im Rahmen der hier dargestellten Ausführungen wird nicht das Altholzpotenzial an sich, sondern lediglich die in den vorhandenen Mischabfällen beinhalteten, beseitigten Holzanteile thematisiert, beruhend auf der Disaggregation der Teilströme. Daraus lassen sich für das Bezugsjahr 2000 folgende Aussagen herleiten:

Tabelle 85 Holzanteile im Bereich der beseitigten, gemischten Siedlungsabfälle (2000)

Herkunft	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]
Resthausmüll	240	3
Sperrmüll	1.312	16
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	645	8
Gesamt	2.197	27

Ein Großteil des derzeit noch einer Beseitigung zugeführten Holzpotenzials ist danach in der Fraktion Sperrmüll, hauptsächlich in Form von Altmöbeln beinhaltet. Im Rahmen einer EU – weiten Untersuchung⁶³ wurde ermittelt, dass Holzprodukte ca. 68 Gew.-% des Altmöbelanfalls im Wohnmöbelsegment beanspruchen. Bei einem Aufkommenspotenzial in Deutschland von ca. 2,8 Mio. t Altmöbel pro Jahr (nach Bischofsberger 2001) käme dies einem Holzpotenzial von ca. 1,89 Mio. t/a gleich. Sundermann/Spoden/Dohr (1999) schätzen das Altholzpotenzial aus Möbeln auf ca. 1,6 Mio. t/a ab. Unter Zugrundelegung dieser Angaben wird ersichtlich, dass nach wie vor große Möbel- bzw. Holzanteile den Weg der Beseitigung gehen.

Entsorgungswege für getrennt erfasste Bio- und Grünabfälle

Im Jahr 2000 wurden ca. 8,2 Mio. t an Bio- und Grünabfällen (Bioabfälle über Biotonne, Garten- und Parkabfälle) getrennt erfasst und einer Verwertung zugeführt. Diesem Mengenaufkommen stehen die nachfolgend dargestellten Behandlungskapazitäten gegenüber.

Tabelle 86 Entwicklung der Behandlungskapazitäten für Bio- und Grünabfälle

Verfahren	1996		1998/99		Aktuell	
	Anzahl	Mio. t	Anzahl	Mio. t	Anzahl	Mio. t
Kompostierung	380*	5,0*	544*	7,1*	810***	9,6***
Vergärung	22**	0,33**	42**	1,24**	75***	2,4***
Gesamt	402	5,33	586	8,34	885***	12,00***

Quellen: * = Kern 2000a (nur Anlagen mit Durchsatz > 1.000 t berücksichtigt); ** = Kern 2000b; *** = BGGK 2002

Nach den obigen Grunddaten werden derzeit 20 % der Behandlungskapazitäten in Form von anaeroben Anlagen bereitgestellt. Wird dieser Ansatz auf das Aufkommen an getrennt erfassten Bio- und Grünabfällen übertragen, werden aktuell ca. 1,64 Mio. t in Vergärungsanlagen und ca. 6,56 Mio. t in Kompostierungsanlagen verwertet.

Restmüll

Der zu beseitigende Restmüll aus Siedlungsabfällen wird gemäß den statistischen Grunddaten zum Bezugsjahr 2000 zu ca. 58 % deponiert und zu ca. 42 % verbrannt⁶⁴.

Tabelle 87 *Zuordnung organischer Restmüllbestandteile zu Beseitigungsanlagen (2000)*

- Angaben in 1000 t -	Deponie	Verbrennungsanlage
Bio- und Grünabfälle	3.549	2.570
Holz	1.274	923
Gesamt	4.823	3.493

Abschätzung einer zukünftigen Entwicklung

Aktuelle Vorausschätzungen der zukünftigen Entwicklung im Bereich Hausmüll/Siedlungsabfall sind auf der Ebene der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger aufgrund der Anforderungen nach § 29 Abs. 2 KrW-/AbfG in der Regel auf einen 10-jährigen Betrachtungszeitraum ausgerichtet. Absolute Zahlenwerte können dabei auch bei einer wissenschaftlich fundierten Herangehensweise nicht geleistet werden. Es werden nur wahrscheinlich eintretende Entscheidungs- und Planungsspielräume dargestellt, die an die Flexibilität von abfallwirtschaftlichen Plänen erhöhte Anforderungen stellen.

Hinsichtlich der potenziellen Einflussfaktoren auf die jeweilige Mengenentwicklung kann dabei nach Sircar (2003) zwischen „potenzialbildenden“ und „stoffstromlenkenden“ Kriterien differenziert werden. Folgende Kriterien lassen sich diesbezüglich darstellen:

Potenzialbildende Einflüsse:

- Bevölkerungsentwicklung und Altersstruktur sowie wirtschaftliche Entwicklung
- Gesetzlich – administrative sowie organisatorische Maßnahmen (mit Auswirkungen auf Produktgestaltung/Vermeidungsstrategien)
- Technische Entwicklungen (im Sinne abfallarmer Produktionsverfahren)
- Sozioökonomische Faktoren (z.B. Umweltbewusstsein/-motivation, Konsumverhalten, Warenangebot, gesellschaftliche Trends, Kaufkraft)

Stoffstromlenkende Einflüsse

- Gesetzlich – administrative sowie organisatorische Maßnahmen (mit Auswirkungen auf die getrennte Erfassung, den technischen Standard bzw. die Entsorgungskosten, Verwertbarkeit der aus Abfällen erzeugten Produkten)

⁶⁴ StBA (2003); von 25,102 Mio. t an zu beseitigenden Siedlungsabfällen werden im Jahr 2000 (Schätzung) 10,497 Mio. t verbrannt und 14,605 Mio. t deponiert.

- Technische Entwicklungen (im Sinne neuer Aufbereitungstechniken, Veränderungen in der Wirtschaftlichkeit eingesetzter Verfahren)

Gesetzlich – administrative sowie organisatorische Maßnahmen

Hier wird im Wesentlichen auf die derzeit darstellbare und zukünftig absehbare abfallwirtschaftliche Rechtslage im Zusammenhang mit ihren potenziellen Auswirkungen auf den organischen Abfallanteil eingegangen. Dabei wird hinsichtlich folgender abfallwirtschaftlicher Ansätze differenziert:

- Anforderungen an die Produktgestaltung / Vermeidung
- Anforderungen an die Abfallbeseitigung
- Anforderungen an die getrennte Erfassung
- Anforderungen an die Verwertbarkeit der erzeugten Produkte

Anforderung an die Produktgestaltung / Vermeidung

Im Bereich der Bio- und Grünabfälle sind aus abfallwirtschaftlicher Sicht keine Restriktionen hinsichtlich der Produktgestaltung darstellbar. Änderungen können sich zukünftig aus einer veränderten Versorgungslage mit Lebensmitteln ergeben (Stichwort: „Ernährungswende“). Zusätzliche Potenziale an biologisch abbaubaren Abfällen können sich in einem geringfügigen Bereich aus der verstärkten Nutzung biologisch abbaubarer Werkstoffe (z.B. Floristik, Hygieneprodukte, etc.) ergeben⁶⁵.

Vermeidungsaktivitäten im Sinne eines erhöhten Anteils an eigenkompostierten Mengen können durch die zukünftige Umsetzung differenzierter Gebührensysteme mit einer separaten Beaufschlagung der Biotonne wieder zunehmen⁶⁶.

Hinsichtlich der Fraktion Holz sind zukünftig im Hinblick auf die zur Entsorgung bereitgestellten Möbel qualitative Verbesserungen hinsichtlich der Schadstoffbelastung zu erwarten⁶⁷. Darüber hinaus strebt die deutsche Möbelindustrie verstärkt die Produktion zertifizierter Möbel (Blauer Engel) an, die sowohl im Gebrauch als auch hinsichtlich ihrer späteren Entsorgung als emissionsarm gelten⁶⁸.

Verstärkte Vermeidungstendenzen lassen sich im Zusammenhang mit der regionalen Einrichtung von Möbelerücknahmekonzepten und Möbelbörsen (als Bestandteil von Recyclinghöfen) zur Wieder- bzw. Weiterverwendung gebrauchsfähiger Altmöbel erkennen.

⁶⁵ 2001 wurde der Verbrauch in der EU auf ca. 30.000 t beziffert; das mittelfristige Substitutionspotenzial in Deutschland wird auf ca. 50.000 t/a abgeschätzt (siehe Klauß/Bidlingmaier 2002)

⁶⁶ Bislang konnte im Zusammenhang mit einer Einführung der Biotonne eher eine gegenläufige Tendenz im Sinne einer Zunahme der insgesamt entsorgten Bioabfälle festgestellt werden.

⁶⁷ z.B. deutlicher Rückgang im Bereich der NC – Lacke (Nitrocelluloselacke) – siehe UBA 2001

⁶⁸ Anforderungen des Umweltzeichens für emissionsarme Produkte aus Holz und Holzwerkstoffen (RAL-ZU 38)

Anforderungen an die Abfallbeseitigung

Auf der Grundlage der Abfallablagerungsverordnung⁶⁹ dürfen Siedlungsabfälle nur noch bis zum 31.05.2005 – nach einer behördlichen Ausnahmegenehmigung gemäß § 6 Abs. 3 AbfAbIV – in unbehandelter Form auf Deponien abgelagert werden. Darüber hinaus – d.h. ab dem 01.06.2005 – sind sie thermisch oder mechanisch – biologisch im Sinne der Zuordnungskriterien gemäß Anhang 1 der AbfAbIV vorzubehandeln. Folgende Verfahrensalternativen sind diesbezüglich darstellbar:

- Müllverbrennung
- Mechanisch – biologische Verfahren mit Ausschleusung einer hochkalorischen Fraktion zur thermischen Behandlung / energetischen Verwertung (z.B. Herstellung eines qualitativ hochwertigen Sekundärbrennstoffes zur industriellen Co – Verbrennung); die verbleibende niederkalorische Fraktion wird bei Einhaltung der Zuordnungskriterien der AbfAbIV deponiert
- Mechanisch – biologische oder mechanisch – physikalische Stabilisierung (Trocknung); thermische Behandlung / energetische Verwertung der erzeugten Stabilate; Deponierung / stoffliche Verwertung der ausgeschleusten mineralischen Anteile

Hinsichtlich der Umsetzung der in der Abfallablagerungsverordnung verankerten Vorgaben stehen derzeit und zukünftig folgende Anlagenkapazitäten zur Verfügung:

Tabelle 88 Derzeit verfügbare und zukünftig abschätzbare Behandlungskapazitäten für Siedlungsabfälle

- in Mio. t/a -	2000*	2006**	nach 2006**
MBA/MBS	1,9	5,0	5,0
MVA	14,1	17,1	18,1
gesamt	16,0	22,1	23,1

Quellen: * = Reimann 2001; ** = Alwast 2003

Inwieweit diese Kapazitäten zur zukünftigen Umsetzung der Anforderungen der AbfAbIV ausreichen, wird derzeit kontrovers diskutiert. Die Einschätzungen reichen dabei von Überkapazitäten von bis zu 8 Mio. t/a (Reimann 2002) bis hin zu Unterkapazitäten von 7 Mio. t/a (Deutsche Bank Research 2002).

⁶⁹ Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung – AbfAbIV), vom 20. Februar 2001

Alwast (2003) gehen in ihren Herleitungen bei einer ausschließlichen Betrachtung der überlassungspflichtigen Abfälle für das Jahr 2006 von einer Überkapazität von 1,6 Mio. t und für das Jahr 2012 von 4,4 Mio. t aus. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Sekundärabfällen⁷⁰ ergibt sich jedoch eine Unterkapazität bis 6,5 Mio. t im Jahr 2006 und 1,1 Mio. t im Jahr 2012. Auch die Kapazitäten zur industriellen Verwertung der Tertiärabfälle⁷¹ sind nach Alwast (2003) für 2006 noch nicht sicher gestellt, was zu einer weiteren Erhöhung der Unterkapazität führen kann. Folgende Mengengerüste wurden dabei zugrunde gelegt:

Tabelle 89 Mengenentwicklung im Bereich der Siedlungsabfälle

- Angaben in Mio. t -	2000	2006	2012
Abfälle zur Beseitigung / Behandlung / energetischen Verwertung			
Resthaus-/Sperrmüll	17,9	17,1*	16,4
Gewerbe-/Baustellenabfälle	8,8	3,3	2,4
Sekundärabfälle	k.A.	6,1	5,5
Tertiärabfälle	k.A.	2,9	3,5
Getrennt erfasste Abfälle zur Verwertung			
Organischer Abfall**	7,9	8,8	9,5
Wertstoffe (Glas u.ä.)***	11,1	10,2	10,0

*14,3 Mio. t Haus- und 2,8 Mio. t Sperrmüll; **Bioabfall und Garten- und Parkabfälle; ***rückläufige Entwicklung aufgrund: Zwangspfund, Substituierung von Glas, Ausdünnung der Erfassungssysteme

Quelle: Alwast (2003); die Daten sind teilweise hergeleitet auf der Grundlage textlicher und grafischer Angaben

Die oben dargestellte Entwicklung im Bereich der organischen Abfälle ergibt sich dabei im Wesentlichen durch eine bessere Nutzung von bereits bestehenden Erfassungssystemen.

Insgesamt erscheint die flächendeckende Umsetzung der in der AbfAbIV verankerten Rahmenbedingungen in Deutschland derzeit noch nicht gewährleistet, so dass einige Bundesländer derzeit prüfen, inwieweit Ausnahme – Genehmigungen zur Deponierung unbehandelter Abfälle über den 1.6.2005 hinaus erteilt werden können.

Die obigen Diskussionen und Ansätze hinsichtlich der zukünftigen Verteilung von Behandlungskapazitäten können und werden sich auf die zukünftigen Stoffstromverteilungen im Bereich der Abfallentsorgung auswirken.

So werden sich erkennbare Überkapazitäten eher „lähmend“ auf die Intensivierung von Maßnahmen zur getrennten Erfassung auswirken, während Unterkapazitäten diese im Sinne einer Reduzierung zu beseitigender Restabfälle stützen können.

⁷⁰ Sekundärabfälle: Gewerbeabfälle zur Verwertung (direkt energetisch verwertet), Stoffe aus der Vorbehandlung in MBA/MBS, Reste aus der Sortierung von Baustellen und Gewerbeabfällen;

⁷¹ Tertiärabfälle: Ersatzbrennstoffe aus der Aufbereitung von Sekundärmengen zur Verwertung in industriellen Anlagen; den in 2006 zu erwartenden Mengen von ca. 2,9 Mio. t stehen dabei nach Alwast (2003) Verwertungskapazitäten von ca. 2,55 Mio. t gegenüber; 2012 wird eine Kapazität von ca. 3,6 Mio. t prognostiziert.

Anforderungen an die getrennte Erfassung und Verwertung

Hinsichtlich der aktuellen Einschätzung zum zukünftigen Umgang mit getrennten Erfassungssystemen wird derzeit - auch im Hinblick auf die organischen Abfälle aus Haushalten – eine durchaus kontroverse Diskussion geführt.

Während der Rat für Sachverständigen für Umweltfragen in seinem Umweltgutachten 2002 an seiner bisherigen Priorisierung der Getrennthaltung festhält und sogar im Hinblick auf eine möglichst hochwertige Verwertung „im Rahmen des wirtschaftlich zumutbaren“ eine gesetzliche Verpflichtung zur Getrennthaltung fordert (SRU 2003), empfehlen andere Akteure unter Verweis auf den erreichten Stand der Technik bei der Abfallsortierung und –behandlung auf eine umfangreiche Getrenntsammlung zu verzichten.

Kaimer/Schade (2002) empfehlen z.B., dass Bioabfälle, die eine aufwändige Behandlung erfordern und deren Verwertung als Kompost problematisch ist zusammen mit dem Hausmüll eingesammelt und nach einer entsprechenden Aufbereitung (Trocknung, Aussortierung der Wertstoffe) energetisch genutzt werden sollen. Grünabfälle (ebenso wie Glas und Papier/Karton) könnten dagegen weiterhin einer getrennten Erfassung zugeführt werden. Die Autoren beziehen sich in den Ausführungen insbesondere auf die Forderung nach einer „Entlastung“ der Haushalte auf der Grundlage des heute erreichten Standes der Technik bei der Abfallaufbereitung.

Gerade die darin unterstellte Eignung der heute verfügbaren technischen Möglichkeiten wird wiederum vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen angezweifelt. Der SRU empfiehlt dabei die überwiegend negativen Erfahrungen mit der Mischmüllaufbereitung zu berücksichtigen und Gemischtmüllkonzepte mit Vorsicht zu beurteilen. Er konstatiert darüber hinaus, dass der bisherige Entwicklungsstand der Sortiertechnik die Realisierbarkeit der nationalen Zielsetzung, bis zum Jahr 2020 eine vollständige Verwertung des gesamten Hausmülls zu erlangen, berührt. Nach Einschätzung des SRU kann bis 2020 noch nicht von einer entsprechend ausgereiften Technik ausgegangen werden.

Hinsichtlich der aktuell gültigen Rechtsnormen, welche im Hinblick auf eine Einschätzung einer zukünftigen Entwicklung für den Bereich der organischen Abfälle zu berücksichtigen sind, sind insbesondere die Gewerbeabfallverordnung, die Bioabfallverordnung sowie die Biomasseverordnung relevant.

Die *Gewerbeabfallverordnung*⁷² fordert zum 01.01.2003 für definierte organische Abfallanteile⁷³ aus gewerblichen Siedlungsabfällen unter Berücksichtigung möglicher Ausnahmeregelungen⁷⁴ eine getrennte Erfassung und Verwertung.

Für andere Wertstoffanteile ist keine unmittelbare Getrennthaltungspflicht vorgegeben, da auch definierte Materialgemische (die auch Holz enthalten können) einer Vorbehandlung zugeführt werden können. Die Vorbehandlungsanlage muss im Jahresmittel eine Verwertungsquote von 85 % erfüllen. Diese wirkt sich auch auf Holz als Bestandteil eines Materialgemisches aus.

⁷² Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV), vom 19.Juni 2002

⁷³ Biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle, biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle und Marktabfälle

⁷⁴ hier: technische Machbarkeit, wirtschaftliche Zumutbarkeit (z.B. geringe mengen, Verschmutzungsgrade)

Die *Bioabfallverordnung*⁷⁵ bezieht sich im Rahmen der Definition der organischen Hausmüllanteile nach Kapitel 5.5.1 im wesentlichen auf die getrennt erfassten Bioabfälle aus Haushalten, Garten- und Parkabfälle, gewerbliche Küchen- und Kantinenabfälle sowie Marktabfälle. Potenzialbeeinflussende Faktoren können sich aus diesem Regelwerk im Wesentlichen aus den Anforderungen an die Behandlungsanlagen (Wirtschaftlichkeit) sowie hinsichtlich der Anforderungen an die Produktqualität ergeben (Verwertungspotenziale; Diskussion siehe unten).

Anforderungen an die Verwertbarkeit der erzeugten Produkte

Im Bereich der organischen Abfälle aus Haushalten ist das Kriterium der Anforderungen an die Verwertbarkeit insbesondere relevant für die bei Verwertungsprozessen entstehenden Rückstände und Produkte (hier: Gärrückstand bzw. Kompost), da hieraus eine Einschätzung der Sinnhaftigkeit der getrennten Erfassung von organischen Abfällen vor dem Hintergrund der in § 5 Abs. 4 Satz 1 KrW-/AbfG verankerten Verpflichtungen abgeleitet werden kann.

Von Bedeutung ist hierbei insbesondere die zukünftige Entwicklung der Grenzwerte für Schadstoffbelastungen in Komposten bzw. Gärrückständen aus organischen Abfällen aus Haushalten. Diese Grenzwerte werden derzeit über die Bioabfallverordnung abgebildet, sollen jedoch zukünftig im Rahmen einer Harmonisierung der Anforderungen an die Verwertung von Bioabfällen, landwirtschaftlichen Wirtschaftsdüngern und Klärschlämmen nochmals neu definiert werden. Dazu wurde im Juni 2002 gemeinsam von BMU und BMVEL ein Grenzwertkonzept vorgelegt, welches von einer strikten Gleichbehandlung aller organischen Düngemittel ausgeht (BMU/BMVEL 2002).

Die in diesem Papier vorgeschlagenen Grenzwerte liegen teilweise erheblich unter den derzeit gültigen Grenzwerten für Bioabfälle und sollen dafür sorgen, dass es auch bei einer langfristigen Aufbringung von organischen Düngemitteln zu keiner Anreicherung von Schadstoffen in Böden über die Grenzwerte der BBodSchV⁷⁶ hinaus kommen soll (Bergs 2002).

Dieser Ansatz ist derzeit Anlass für eine kontrovers geführte Diskussion bei der die Aspekte des Bodenschutzes und die der Abfallwirtschaft aufeinanderprallen:

Der abfallwirtschaftliche Standpunkt geht derzeit davon aus, dass es bei einer Umsetzung der Grenzwertvorschläge zu massiven Einschränkungen der landwirtschaftlichen Verwertung biogener Abfallstoffe käme⁷⁷ und damit die getrennte Sammlung von Bioabfällen zur Disposition stünde, zumal eine weitergehende Verbesserung der Schadstoffgehalte in den getrennt erfassten Bioabfällen durch technisch-organisatorische Maßnahmen nicht möglich erscheint:

„Eine weitere Verschärfung der (derzeitigen) Grenzwerte (der Bioabfallverordnung) würde die Verwertung von Bioabfallkomposten unmöglich machen und ist wissenschaftlich und fachlich nicht begründbar.“ (zit.n. Kranert 2002).

75 Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV), vom 21. September 1998, zuletzt geändert am 25. April 2002

76 Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 16. Juli 1999

77 Resolution der Verbandsvertreter beim 63. Informationsgespräch des ANS e.V., www.ans-ev.de

Das BMU teilt diese Einschätzung der abfallwirtschaftlichen Fachkreise nicht - es geht vielmehr davon aus, dass durch verbesserte Kontrollen im Rahmen der Bioabfallerfassung (z.B. optische Kontrollen, Metalldetektoren) die Schadstoffgehalte nennenswert abgesenkt werden können und damit auch eine Verwertung von Komposten oder Gärrückständen auf (sensiblen) Sandböden künftig möglich sein wird⁷⁸.

Letztendlich steht die über das Grenzwertkonzept-Papier formulierte deutsche Position aus abfallwirtschaftlicher Sicht derzeit im Widerspruch zu aktuellen Regelungsansätzen der EU⁷⁹, die in höherem Maß die pflanzenbauliche Verwertung biogener Abfallstoffe unterstützen.

Technische Entwicklungen und Wirtschaftlichkeit

Auf der Grundlage diverser ökobilanzieller Betrachtungen (z.B. Vogt u.a. 2002) weist die getrennte Erfassung und Behandlung von Bioabfällen im Vergleich zu einer thermischen Behandlung deutliche Vorteile auf, obgleich die getrennte Erfassung dabei „nicht zwangsläufig das abfallwirtschaftliche Mittel der Wahl sein muss“.

Im Vergleich der Bioabfallbehandlungstechniken ist keine eindeutige Wertigkeit darstellbar. Während bei Edelmann (1999) die Vergärung im Vergleich zur Kompostierung ökologische Vorteile aufweist, sehen Vogt u.a. (2002) unter Berücksichtigung aller ökobilanzieller Kriterien nur bei der Eigenkompostierung und bei der vollständig gekapselten Kompostierung mit Fertigkompostherstellung „wenige relative Schwächen“.

Hinsichtlich der ökonomischen Rechtfertigung („wirtschaftliche Zumutbarkeit“) wird die getrennte Erfassung von Bioabfällen derzeit in verschiedenen Gebietskörperschaften⁸⁰ teilweise unter zusätzlicher Nennung von Argumenten wie ‚Hygiene‘ und ‚Aufwand in den Haushalten‘ in verstärktem Umfang in Frage gestellt.

Der Trend geht in den entsprechenden Einzugsbereichen wieder hin zu einer gemeinsamen Erfassung und Behandlung von Bioabfällen und Restmüll z.B. in einer MVA oder MBA⁸¹.

Tatsächlich ist es in den letzten Jahren zu einer Annäherung der Kosten bei der Bio- und der Restabfallbehandlung gekommen, welche aus erhöhten emissionsbegrenzenden Maßnahmen bei der Bioabfallbehandlung⁸² einerseits und aus reduzierten emissionsbegrenzenden Anforderungen bei der Restabfall-Behandlung⁸³ andererseits resultiert.

78 Antwortschreiben von Bundesumweltminister Jürgen Trittin auf eine Stellungnahme des ANS e.V. sowie der Bundesgütegemeinschaft Kompost, Müll und Abfall, 2 / 2003; entsprechende Forschungsvorhaben werden derzeit durchgeführt.

79 Z.B. die für 2003 angekündigte Novellierung der EU-Klärschlammrichtlinie sowie die für 2004 angekündigte Bioabfallrichtlinie

80 z.B. Abschaffung bzw. Diskussion über die Abschaffung der Biotonne in Meißen, Berlin, Essen, Aachen, Köln, Aschaffenburg, Hameln-Pyrmont, etc.

81 z.B. MBA mit Vergärungsstufe bei Beibehaltung der getrennten Grünguterfassung

82 z.B. Kapselung und Abluftbehandlung zur Reduktion der Geruchsemissionen

83 Annäherung an die Vorgaben der 17. BImSchV „von unten“; Absicht zur Nutzung stabilisierter Restabfälle im Bereich industrieller Feuerungen (z.B. Stadt und Landkreis Trier)

Die zusätzliche Berücksichtigung eines potenziell höheren Erfassungsaufwandes und die zukünftig zu erwartenden Probleme bei der Kompostvermarktung (siehe oben) dürften diesen Trend verstärken. Folgende Relationen hinsichtlich der Behandlungskosten sind dabei gemäß diverser Quellen darstellbar:

Tabelle 90 Kostenansätze für verschiedene Verfahren zur Abfallbehandlung

Quelle	[€ /t]*
Bioabfallbehandlung	
Vogt u.a. (2002)	< 102
Edelmann (1999); Kompostierung	ca. 85 – 157
Edelmann (1999); Vergärung	ca. 93 – 115
Bidlingmaier (2000); Kompostierung	92 – 180
Bidlingmaier (2000); Vergärung	77 – 128
Kaimer (2002); Kompostierung	93 – 101
Restabfallbehandlung	
Vogt u.a. (2002)	>> 102
Edelmann (1999); MVA	ca. 195
Meyer (2003); MVA	85 – 100
Meyer (2003); MBA	90 – 120
Meyer (2003); MBS	80 – 100
Kaimer/Schade (2002); MVA	102 – 128
Kaimer/Schade (2002); MBA	96 – 146
Kaimer/Schade (2002); MBS	92 – 142

* ohne Erfassungskosten; DM wurden mit 1,95583 DM/€ umgerechnet; Schweizer Franken mit 1,478 SFr/€

Hinsichtlich einer Abschätzung der zukünftigen Entwicklung im Bereich des organischen Hausmülls ist eine alleinige Weiterentwicklung der bisherigen Trends unter Berücksichtigung der genannten potenziellen Einflüsse nicht zulässig.

Trotz der Aussage, dass die Bundesregierung auf dem eingeschlagenen Weg weitergehen möchte und spätestens bis zum Jahr 2020 sämtliche Abfälle so vorbehandeln und stofflich oder energetisch nutzen will, dass praktisch keine Reste für das Deponieren mehr anfallen, kann der Fall eintreten, dass die im Sinne der aktuellen Biomasseverordnung nutzbaren Potenziale aus dem Hausmüll zukünftig rückläufig sein werden.

Als Ausgangssituation sind gemäß den hier erfolgten Herleitungen zum Jahr 2000 folgende tatsächliche und zusätzlich mögliche Erfassungsmengen an Bio- und Grünabfällen darstellbar:

Tabelle 91 Tatsächliche und zusätzlich mögliche Mengen an Bio- und Grünabfällen

(Angaben in t/a)	Tatsächliche Erfassung im Jahr 2000	Zusätzlich mögliche Er- fassungspotenziale
Aktuell getrennte Erfassung		
Biotonne	4.022 <i>davon:</i> <i>Vergärung: 1.634</i> <i>Kompostierung: 2.388</i>	(Σ ca. 7.600)
Kommunale Garten- /Parkabfälle	4.149 <i>davon:</i> <i>Kompostierung: 4.149</i>	(Σ ca. 4.400)
Gesamt	8.171 <i>davon:</i> <i>Vergärung: 1.634</i> <i>Kompostierung: 6.537</i>	
Aktuell zur Beseitigung		
Bio-/Grünabfälle im Rest- hausmüll	5.603	3.500
Bio-/Grünabfälle im Sperr- müll	77	77
Bio-/Grünabfälle in haus- müllähnlichen Gewerbeab- fällen	439	270*
Gesamt	6.119 <i>davon</i> <i>Deponie: 3.549, MVA: 2.570</i>	3.847

* es werden zusätzliche Erfassungsanteile analog zum Hausmüll unterstellt (ca. 63 %)

Materialien, die derzeit einer Eigenkompostierung zugeführt (ca. 3 – 7 Mio. t/a) bzw. direkt am Anfallort gemulcht werden (ca. 8 – 10 Mio. t/a), werden im weiteren Verlauf nicht im Sinne zusätzlicher Potenziale berücksichtigt, zumal diese Verwertungswege im Rahmen ökobilanzieller Betrachtungen deutliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren der Bio- und Grünabfallbehandlung aufweisen.

Somit können zum Bezugsjahr 2000 als Grundlage für die Szenarienentwicklung folgende Potenzialdaten unterstellt werden:

Tabelle 92 Potenzialdaten für Bio- und Grünabfälle als Grundlage für die Szenarienentwicklung (2000)

Herkunft	tatsächlich		Maximal	
	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]	[1.000 t/a]	[kg/EW*a]
Bioabfall aus der Biotonne	4.022	49	7.600	92
Komm. Garten-/Parkabfälle	4.149	50	4.400	53
Gesamt	8.171	99	12.000	145

Zusätzlich wird auf die derzeit noch beseitigten Holzpotenziale in einer Größenordnung von ca. 2,2 Mio. t verwiesen, welche zu einem großen Teil im Sperrmüll beinhaltet sind (vgl. Kapitel 5.5.5). Für die Entwicklung der Szenarien im Bereich der organischen Abfälle aus Haushalten lassen sich nunmehr unter Berücksichtigung der oben diskutierten Zusammenhänge folgende Ansätze festlegen:

Generelle Festlegungen für alle Szenarien

Die Herleitung der Mengenpotenziale erfolgt auf der Basis einwohnerspezifischer Werte. Hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung werden die entsprechenden Daten der Enquête-Kommission zugrunde gelegt (Enquete 2002). Veränderungen im Bereich der Lebensmittelversorgung können potenzialbildend sein; hier wird die für den Betrachtungszeitraum festgestellte Dynamik im Bereich der „relevanten“ Nahrungsmittel⁸⁴ (Kartoffeln, Gemüse, Obst) auf das Potenzial an Küchenabfällen (Ansatz: 50 % des Potenzials) prozentual übertragen; dabei ergeben sich gegenüber dem Bezugsjahr 2000 folgende einwohnerspezifischen Veränderungen: 2010 – 1,6 %; 2020 + 0,7 %; 2030 + 3,0 %.

Hausmüll im Referenz-Szenario

Das Referenz – Szenario reflektiert eine „ungestörte“ Fortschreibung ohne aktive Politik. Im Bereich der Restabfallbeseitigung werden durch folgende Maßnahmen drohende Unterkapazitäten vermieden:

Eine flächendeckende Umsetzung der Vorgaben der Abfallablagervverordnung zum 31.5.2005 erfolgt nicht, es werden „Ausnahme – Ausnahme – Genehmigungen“ auf Länderebene erteilt.

Der Weg in industrielle Feuerungsanlagen wird erleichtert; es erfolgt im Zusammenhang mit der Verwertung von Ersatzbrennstoffen keine Anpassung der dort zu beachtenden Emissionsgrenzwerte an die Vorgaben der 17. BImSchV.

- Die Biotonne wird in Abhängigkeit der regionalen Kapazitäten und Entsorgungskosten national unterschiedlich eingesetzt; teilweise Abschaffung der Biotonne / teilweise Ausweitung der getrennten Erfassung
- Teilweise setzen sich wieder Mischmüllbehandlungskonzepte durch

⁸⁴ da von diesen in einem erhöhten Umfang Reste in die Biotonne eingebracht werden

- Separate Gebührenveranlagung der Biotonne führt zu Verlagerungseffekten in die Eigenkompostierung
- Verschärfung der Grenzwerte hinsichtlich der landwirtschaftlichen Verwertung von Komposten / Gärrückstände
- Bioabfallbehandlung: Erhöhung der Anteile der Anaerob – Verfahren an den Behandlungskapazitäten
- Behandlung der Grünabfälle: Zuwächse im Bereich der energetischen Verwertung von Baum-/Strauchschnitt.

Die Abfallentsorgung wird damit stark ökonomisch orientiert ausgerichtet; das spezifische Gesamt - Aufkommen (Bioabfall, Garten-/Parkabfälle bzw. Grünschnitt) wird sich in einem Bereich von 100 kg/EW*a einpendeln; es kommt zu Verlagerungen von der Biotonne in die „günstigere“ Grünschnittschiene; bei getrennt erfassten Bioabfällen wird die Anaerob-Behandlung zulegen.

Aus diesen Annahmen ergibt sich die folgende Entwicklung der Potenziale:

Tabelle 93 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Referenz-Szenario

Herkunft	Einheit/Verwertungsweg	2000	2010	2020	2030
Bioabfall	[kg/EW*a]	49	45	46	47
	[1.000 t/a]	4.022	3.695	3.717	3.661
Kommunaler Garten- und Parkabfall	[kg/EW*a]	50	55	55	55
	[1.000 t/a]	4.149	4.516	4.444	4.285

Hausmüll im Umwelt-Szenario

Das Umwelt-Szenario bildet möglichst weitgehend eine Nachhaltigkeitsstrategie ab.

- Die Umsetzung der Vorgaben der Abfallablagereungsverordnung zum 31.05.2005 erfolgt flächendeckend durch eine gezielte Steuerung der Abfallströme
- Die Emissionsgrenzwerte im Bereich der industriellen Feuerungen werden im Zusammenhang mit der Verwertung von Ersatzbrennstoffen an die 17. BImSchV angepasst
- Verschärfung der Grenzwerte hinsichtlich der landwirtschaftlichen Verwertung von Komposten / Gärrückstände unter Berücksichtigung der Anforderungen einer nachhaltig ausgerichteten Abfallwirtschaft
- Zuwachs im Bereich biologisch abbaubarer Verpackungen
- Separate Gebührenveranlagung der Biotonne führt zu Verlagerungseffekten in die Eigenkompostierung
- Mischmüllbehandlungskonzepte führen nicht zu einer Abschaffung von Systemen zur getrennten Erfassung

- Zuwächse im Bereich der energetischen Verwertung von Baum-/Strauchschnitt

Die Entwicklung des Gesamtaufkommens (Bioabfall, Garten-/Parkabfälle bzw. Grünschnitt) orientiert sich an den Ansätzen von Alwast u.a. (2002), d.h. moderate Zuwächse im Bereich der getrennt erfassten Mengen; bei getrennt erfassten Bioabfällen wird die Anaerob-Behandlung zulegen. Aus diesen Annahmen ergibt sich die folgende Entwicklung der Potenziale:

Tabelle 94 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Umwelt-Szenario

Herkunft	Einheit/Verwertungsweg	2000	2010	2020	2030
Bioabfall	[kg/EW*a]	49	63	70	71
	[1.000 t/a]	4.022	5.172	5.656	5.531
Kommunaler Garten- und Parkabfall	[kg/EW*a]	50	53	53	53
	[1.000 t/a]	4.149	4.351	4.282	4.129

Hausmüll im Biomasse-Szenario

Das Szenario Biomasse unterstellt die Nutzung der Obergrenzen der Biomassepotenziale im Zusammenhang mit einer massiven Unterstützung der Biomasse, d.h.:

- Keine Verschärfung der Grenzwerte hinsichtlich der landwirtschaftlichen Verwertung von Komposten / Gärrückstände
- Flächendeckende Einführung der Biotonne mit Vorgabe einer Getrennthaltungspflicht
- Finanzielle Anreize zur Verlagerung von Abfallströmen in die Biotonne (keine separate Gebühr für die Biotonne und mengenabhängige Gebühr im Bereich der Restabfälle)
- Zuwachs im Bereich biologisch abbaubarer Verpackungen
- Bioabfallbehandlung: Deutliche Erhöhung der Anteile der Anaerobverfahren an den Behandlungskapazitäten durch Anreizprogramme
- Deutliche Zuwächse im Bereich der energetischen Verwertung von Baum-/Strauchschnitt sowie der Grasschnitt-Anteile

Im Biomasse-Szenario werden damit die identifizierten Potenziale weitgehend ausgeschöpft.

Aus diesen Annahmen ergibt sich die folgende Entwicklung der Potenziale:

Tabelle 95 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile im Biomasse-Szenario

Herkunft	Einheit/Verwertungsweg	2000	2010	2020	2030
Bioabfall	[kg/EW*a]	49	70	80	90
	[1.000 t/a]	4.022	5.747	6.464	7.011
Kommunaler Garten- und Parkabfall	[kg/EW*a]	50	53	53	53
	[1.000 t/a]	4.149	4.351	4.282	4.129

Überblick zum energetischen Biomassepotenzial aus organischen Hausmüllanteilen

Aus den vorstehenden Stoffstromdaten wurden unter Verwendung von Daten zum Gehalt an organischer Trockenmasse nach Vogt (2002) und Daten des Instituts für Energetik und Umwelt zu Biogaserträgen und -heizwerten die energetischen Potenziale der organischen Hausmüllanteile bestimmt. Getrennt erfasste Bioabfälle und ca. 40 Gew.-% der Garten- und Parkabfälle führen dabei zum Biogaspotenzial (Vergärung), ca. 60 Gew.-% der Garten- und Parkabfälle (holziges Material) zum energetischen Potenzial im Bereich der Holzfeuerung. Die folgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Potenziale in den Szenarien.

Tabelle 96 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für organische Hausmüllanteile in den Szenarien

- Angaben in PJ -	Verwertungsweg	2000	2010	2020	2030
Referenz	Vergärung	11,7	12,0	12,9	13,5
	Verbrennung	19,7	21,5	21,1	20,4
	Gesamt	31,4	33,5	34,0	33,9
Umwelt	Vergärung	11,7	15,5	17,8	18,6
	Verbrennung	19,7	20,7	20,3	19,6
	Gesamt	31,4	36,2	38,1	38,2
Biomasse	Vergärung	11,7	16,9	19,9	22,7
	Verbrennung	19,7	20,7	20,3	19,6
	Gesamt	31,4	37,6	40,2	42,3

Quelle: eigene Berechnungen

Die Nutzung der oben ausgewiesenen Biomassepotenziale in Vergärungsanlagen führt zu *keiner Konkurrenz* mit stofflichen Verwertungsmaßnahmen, da die entstehenden Gärrückstände - in der Regel nach einer nachgeschalteten aeroben Behandlung (Kompostierung) - ebenfalls als Bodenverbesserungsmittel im Sinne einer stofflichen Verwertung zur Verfügung stehen.

Teilweise sind die Qualitäten der dabei erzielten Produkte z.B. hinsichtlich der Salz- und Störstofffrachten im Vergleich zur ausschließlichen aeroben Behandlung verfahrensbedingt höher einzustufen, so dass mit der energetischen Nutzung auch eine Optimierung der stofflichen Verwertungsschiene einhergehen kann.

Die Potenzialherleitungen in Hartmann/Kaltschmitt (2002) ergibt für organische Siedlungsabfälle ein Biogaspotenzial von 12,5 PJ, was gut mit den hier ermittelten Werten für das Jahr 2000 (Referenz) übereinstimmt⁸⁵.

⁸⁵ Die Autoren gehen dabei von einem einwohnerspezifischen Bioabfallaufkommen von 100 kg/E*a aus, welches derzeit in Deutschland noch bei weitem nicht erreicht wird.

5.5.2 Technisches Brennstoffpotenzial aus Deponiegas

Deponiegas entsteht durch mikrobielle Abbauprozesse im Deponiekörper von z.B. Hausmülldeponien. Die Hauptbestandteile des Deponiegases sind Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2), daneben sind zahlreiche andere Stoffe in Spuren vorhanden, durch die bei der Verwertung in Gasmotoren Korrosionsschäden auftreten können.

Die Zusammensetzung des Deponiegases schwankt - Methangehalte von 35 bis 55 Vol.-% bei Heizwerten von 3,5 bis 5,5 kWh/m³. Das Deponiegaspotenzial ist abhängig von z.B. eingelagerten Materialien, Einbauverfahren, Milieubedingungen (u.a. Wassergehalt, Temperatur, pH-Wert) und liegt zwischen 150 und 250 m³/t_{Hausmüll} über einen Zeitraum von 10 bis 50 Jahren.

Die Zusammensetzung und die Menge des Deponiegases verändern sich mit der Zeit. Die Gesamtdauer der Ausgasung des Deponiekörpers liegt zwischen 25 und 35 Jahren, so dass sich das Deponiegas unterschiedlichen Phasen zuordnen lässt, die durch spezifische Konzentrationen der Hauptkomponenten gekennzeichnet sind. In den ersten zwei Jahren finden eine aerobe Phase (Dauer: wenige Tage; Zusammensetzung 80 % N₂, 20 % O₂) und zwei anaerobe Phasen (saure Gärung: Dauer ca. 2 Monate; instabile Methangärung: Dauer ca. 2 Jahre). Die anschließende stabile Methangärung dauert bis zu 30 Jahre und zeichnet sich durch ein konstantes Konzentrationsverhältnis zwischen CH₄ und CO₂ aus. In dieser Phase ist die Gasbildung am höchsten. In der Langzeitphase steigt die Methankonzentration deutlich an, wohingegen die CO₂-Konzentration im gleichen Maße zurückgeht. In der anschließenden Lufteindringphase hat die Gasbildung so stark abgenommen, dass Luft in den Deponiekörper eindringen kann. Während dieser Phase sinkt der Methangehalt auf 10 bis 15 Vol.-% ab (sog. Schwachgase). In der letzten Phase (Methanoxidationsphase, Kohlenstoffdioxidphase, Luftphase) finden keine Emissionen von Deponiegas mehr statt.

In Deutschland sind 75 % des verfüllten Deponievolumens an eine Deponiegasfassung angeschlossen. Durch die Gaserfassung werden 50% des entstehenden Deponiegases erfasst (IFEU 2002).

Die Methanemissionen der Abfallwirtschaft lagen im Jahr 2000 bei 0,79 Mio. t, dies sind 58% weniger als im Jahr 1990 (UBA 2002). Das Gesamtabfallaufkommen betrug im Jahr 2000 rund 405 Mio. t, davon waren 45,6 Mio. t Siedlungsabfälle, von denen 30 % (14,6 Mio. t) deponiert wurden (StBA 2003). Bei einem Umrechnungsfaktor von 150 bis 250 m³_{Deponiegas}/t_{Hausmüll} ergibt sich ein Deponiegasaufkommen von 2.190 - 3.651 Mio. m³.

1995 wurde das Deponiegasaufkommen aller Deponien und Altablagerungen auf 5.940 – 8.910 Mio. Nm³/a geschätzt (Butz 1997). Bei dieser Schätzung wurde von einem Gaspotenzial von 200 bis 300 Nm³_{Deponiegas}/t_{Müll} und einer Abfallmenge von 29,7 Mio. t Müll ausgegangen.

Erwartete Veränderungen des Aufkommens an Deponiegas

Technologische Veränderungen

Technologische Veränderungen bei der Deponiegasfassung sind auf Grund der Endlichkeit der Deponiegasemissionen nicht zu erwarten. Die Verfahren zur energetischen Nutzung des Gases sind ausgereift.

Änderungen sind auf Grund der neuen Deponieverordnung und der Ablagerungsverordnung bei dem Einbau des Materials auf Deponien und bei den Rekultivierungsmaßnahmen zu erwarten.

Allerdings kann auch mit hochwertigen mechanisch-biologischen Vorbehandlungsverfahren kein vollständig inaktiver Deponiekörper erreicht werden, es ist noch mit Deponiegasemissionen des neu abgelagerten Materials von 10 bis 30 m³/t zu rechnen (Knox 2002), wobei hier ein Mittelwert von 20 m³/t angenommen wurde⁸⁶.

Gesetzliche Veränderungen

Der Gesetzgeber hat einige Aktivitäten im Bereich der Deponien entwickelt. Die Neufassung der TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 24.7.2002 sieht zum einen Anforderungen zur Behandlung und Nutzung von Deponiegas vor, zum anderen werden auch Emissionsgrenzwerte für Anlagen zur Deponiegasfassung gefordert. Das EEG regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom der u.a. aus Deponiegas gewonnen wird (Butz 2003). Dieses Gesetz dient als Anregung zur verstärkten Nutzung von Deponiegas zur Stromerzeugung.

Die TA Abfall, die technische Anleitung Siedlungsabfälle (TASi), die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) und die Deponieverordnung (DepV) verbieten ab Ende Mai 2005 die Ablagerung von unbehandelten Abfällen. Damit werden die Gasausbeuten von Abfall, der nach dem 2005 abgelagert wird, stark zurückgehen. Vorbehandlungsanlagen, die zur Einhaltung der Kriterien sorgen sollen, sind MVA und MBA.

Weitere Einflussfaktoren

Die Kosten für die Deponierung liegen z.Zt. noch weit unter den Kosten für eine andere Behandlung der Abfälle (MVA, MBA). Daher werden bis 2005 die überwiegende Masse der Abfälle deponiert werden.

Die demographische Entwicklung hat auf das Deponiegasaufkommen nur untergeordneten Einfluss. Da auf Grund der Gesetzeslage ab 2005 kein deponiegasbildendes Material mehr abgelagert werden darf, ist der größte Verursacher in dem Material zu finden, welches bisher abgelagert worden ist oder bis 2005 noch abgelagert wird.

Aufkommensschätzung für Deponiegas bis 2030

Das Aufkommen des Deponiegases ist abhängig von der deponierten Menge biologisch reagierenden Hausmülls. Bei der hier angenommenen Entwicklung werden alle Vorschriften zeitgenau umgesetzt, so dass ab Mitte 2005 nur noch nicht reagierendes Material auf Deponien abgelagert wird.

In den Jahren 1997 bis 2000 fand ein durchschnittlicher Rückgang der deponierten Siedlungsabfälle von 6% statt (StBA 2003). Wird dieser Rückgang bis zum Jahr 2005 hochgerechnet, kann mit einem Rückgang der deponierten Abfallmenge von 30 % ausgegangen werden. Im Anschluss wird nur noch weitgehend inaktives Material abgelagert, so dass nur von dem dann bestehenden Deponiekörper Emissionen ausgehen können.

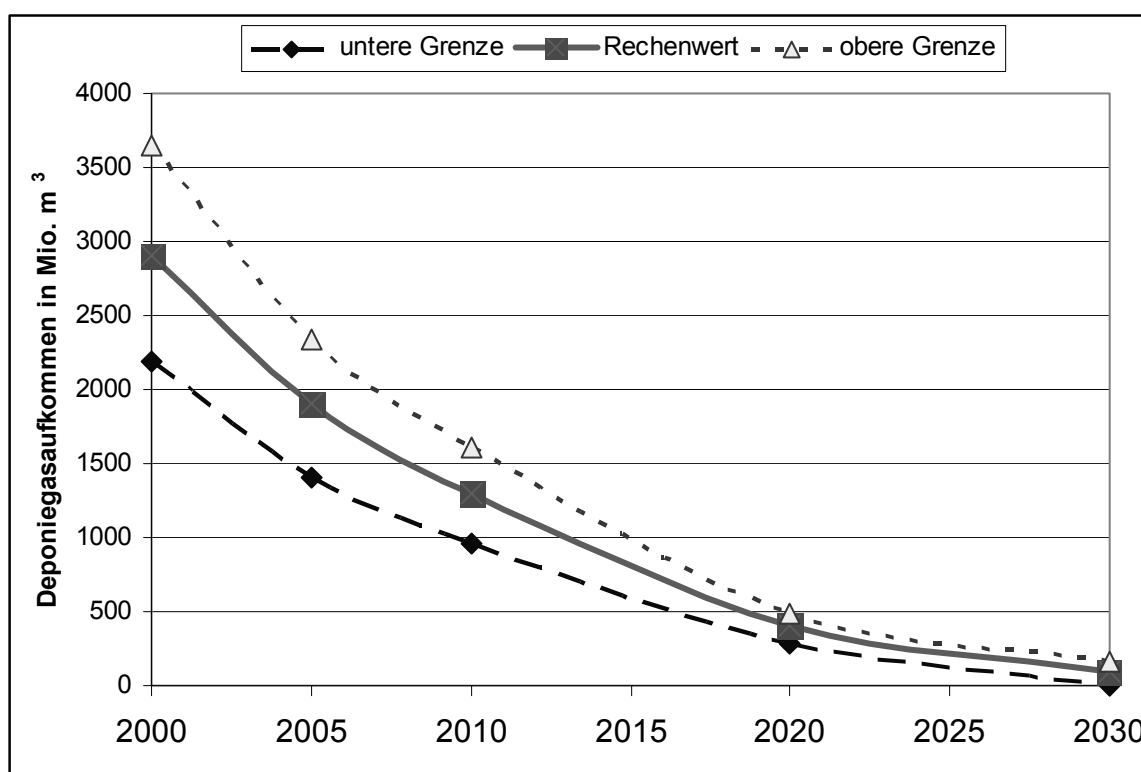
⁸⁶ Nach Anhang 2 Abfallablagerungs-VO ist für MBA-Material noch eine Gasbildungsrate von 20 m³/t Trockenmasse zulässig.

Durch die Umsetzung der gesetzlichen Regelungen rechnet das UBA mit einem Rückgang der Emissionen aus dem Abfallbereich um 82 % gegenüber 1990. Der Hauptgrund für diesen Rückgang ist nach Angaben des UBA bei der Reduktion der Deponiegase zu finden. Gegenüber 2000 wird ein Rückgang von 36 % bis 2005 und 56 % bis 2010 prognostiziert (UBA 2002). Ab 2010 wird die Gasproduktion stark absinken und die Gasnutzung wird nur bei einer Bewässerung der Deponie möglich sein. Die Phase der Gasnutzung ist 2016 bis 2019 beendet, da dann nur noch Schwachgase dem Deponiekörper entzogen werden können. Ab 2021 bis 2023 ist eine Belüftung des Deponiekörpers notwendig, d.h. der Deponiekörper produziert weniger Gas, als Luft in ihn eindringt. 2030 bis 2035 ist die Emission von Deponiegas aus dem Deponiekörper voraussichtlich abgeschlossen (Martens 2002).

Neu abgelagerte, biologisch weitgehend inaktive Abfälle werden im Dünnschichtverfahren eingebaut und mit Deponieabdeckungen inklusive Methanoxidierungszone überdeckt. In dieser Zone werden noch gebildete Deponiegase abgebaut.

In der folgenden Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Gasentwicklung dargestellt. Die untere Grenze zeigt den Verlauf des Deponiegasanfalls ausgehend von einem Deponiegaspotenzial von $150 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{Hausmüll}}$, während die obere Grenze auf einem Wert von $250 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{Hausmüll}}$ basiert. Die mittlere Linie stellt den Rechenwert dar, der im Projekt verwendet wurde.

Bild 30 Entwicklungslinien des Deponiegasanfalls in Deutschland



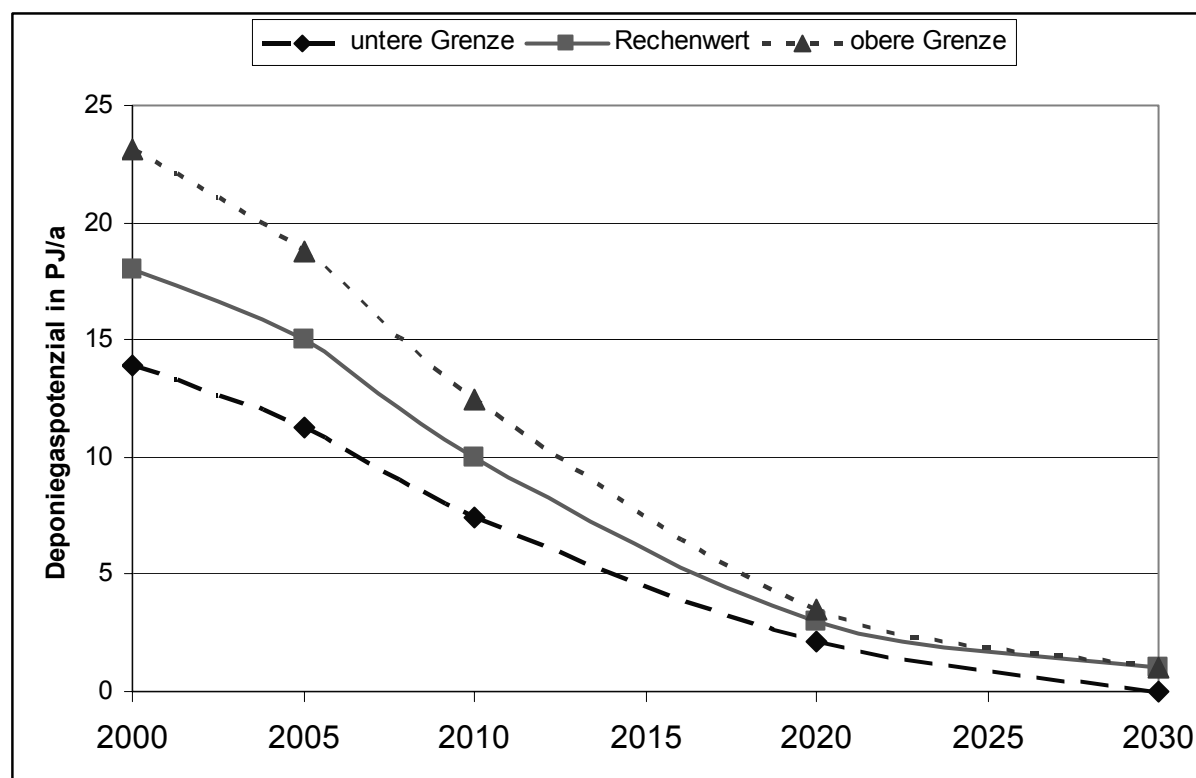
Energetisch nutzbares Potenzial

Das energetisch nutzbare Aufkommen ist abhängig von der erfassten Gasmenge. Der Erfassungsgrad des Deponiegases ist abhängig von der Gasmigration über offene Deponieflächen und den Untergrund und somit von der Basisabdichtung, der Oberflächenabdeckung und der Sickerwassererfassung. In Deutschland wird eine Erfassungsrate von ca. 37,5 % angenommen. Aufgrund von weitergehender Verfüllung, Abdichtung und Ausbau der Erfassungssysteme wird angenommen, dass die Rate bis 2030 pro Dekade um 5 % ansteigt.

Von den derzeit erfassten Deponiegasen werden 70% energetisch genutzt. Für die Potenzialermittlung wird generell von einer 100%-Nutzung ausgegangen.

Aufgrund der Datenlage kann die Deponiegasentwicklung nicht zwischen den Szenarien sinnvoll variiert werden – die o.g. Annahmen sind damit für alle Szenarien gleich und das energetisch nutzbare Aufkommen in den nächsten Jahrzehnten stellt sich für alle Szenarien wie folgt dar.

Bild 31 Entwicklung des energetisch nutzbaren Deponiegaspotenzials bis 2030



Zusammenfassung zum energetisch nutzbaren Deponiegaspotenzial

Das energetische Nutzungspotenzial wurde in allen Szenarien *gleich* angesetzt (vgl. folgende Tabelle).

Tabelle 97 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Deponiegas in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	22	11	3,7	0,9
Umwelt	22	11	3,7	0,9
Biomasse	22	11	3,7	0,9

Vergleich mit anderen Potenzialstudien

In anderen Untersuchungen wie z.B. Kaltschmitt/Thrän (2003) wird ebenfalls festgestellt, dass die Bestimmung von Deponiegasmengen mit großen Unsicherheiten versehen ist, deren Ursache in der umfangreichen Zahl beeinflussender Faktoren liegt. Hieraus resultieren die großen Spannbreiten, die bei der Angabe von Deponiegasmengen üblich sind.

Die Berechnungen der Deponiegasmengen im vorliegenden Projekt und von Kaltschmitt ähneln sich. Kaltschmitt berechnet für das Jahr 2000 eine Deponiegasmenge von 2,5 Mrd. Nm³ unter den Annahmen eines durchschnittlichen Anteils an Organik und einer üblichen Gasbildungsrate.

Die hier ermittelte Deponiegasmenge für das Jahr 2000 liegt zwischen 2,2 und 3,6 Mrd. m³ abhängig von der Gasbildungsrate (150 – 250 m³/t). Der Wert von Kaltschmitt liegt innerhalb dieses Intervalls. Da keine genauen Angaben zu der Gasbildungsrate bei Kaltschmitt gemacht worden sind, kann eine genauere Einordnung des Wertes nicht erfolgen.

Für das energetisch nutzbare Potenzial nennen Kaltschmitt/Thrän (2003) eine Bandbreite von 15-21 PJ, die mit den hier unterstellten Entwicklungen gut übereinstimmt.

5.5.3 Energetisch nutzbare Potenziale von Klärschlamm

Klärschlamm, ein Feststoff-Wasser-Gemisch, entsteht bei der Reinigung von Abwässern in Kläranlagen und besteht aus dem dort anfallenden Primärschlamm und dem Überschussschlamm. Im Klärschlamm werden nach Möglichkeit alle im Wasser enthaltenen Inhaltsstoffe, d.h. Nährstoffe, mineralische Anteile und anorganische und organische Schadstoffe angereichert. Der Organikanteil liegt zwischen 65 und 70%. Der anfallende Klärschlamm wird zur weiteren Behandlung mechanisch entwässert und zum Teil auch thermisch getrocknet. Je nach Entwässerungsverfahren werden dabei Trockensubstanzgehalte (TS-Gehalt) von 25-40% (mechanisch entwässert) und 90-95% (Volltrocknung) erreicht. Anschließend wird Klärschlamm einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt, thermisch beseitigt oder deponiert.

Behandlungsverfahren für Klärschlamm

Zu den stofflichen Verwertungsverfahren zählen die

- landwirtschaftliche Verwertung
- Kompostierung und
- landschaftsbauliche Verwertungsmaßnahmen.

Die Kompostierung kann dabei sowohl als eigenständige stoffliche Verwertung als auch als Vorbehandlung der anderen stofflichen Verwertungsverfahren erfolgen.

Bei der energetischen Verwertung bzw. der thermischen Beseitigung werden folgende Verfahren und Techniken eingesetzt:

- Mono-Klärschlamm-Verbrennung⁸⁷ (Etagenofen, Etagenwirbler, Wirbelschicht)
- Mitverbrennung (Braun- und Steinkohlekraftwerke, MVA, Zementindustrie)
- Pyrolyse sowie Mitvergasung (Festbettvergaser, SVZ Schwarze Pumpe)
- Ersatzbrennstoff bei Ziegelherstellung und Pyritröstung

Die Einstufung energetische Verwertung oder thermische Beseitigung unterliegt der jeweiligen Anlagengenehmigung. Der Einsatz in der Zementindustrie und der Ziegelherstellung wird auch als rohstoffliche Verwertung eingestuft.

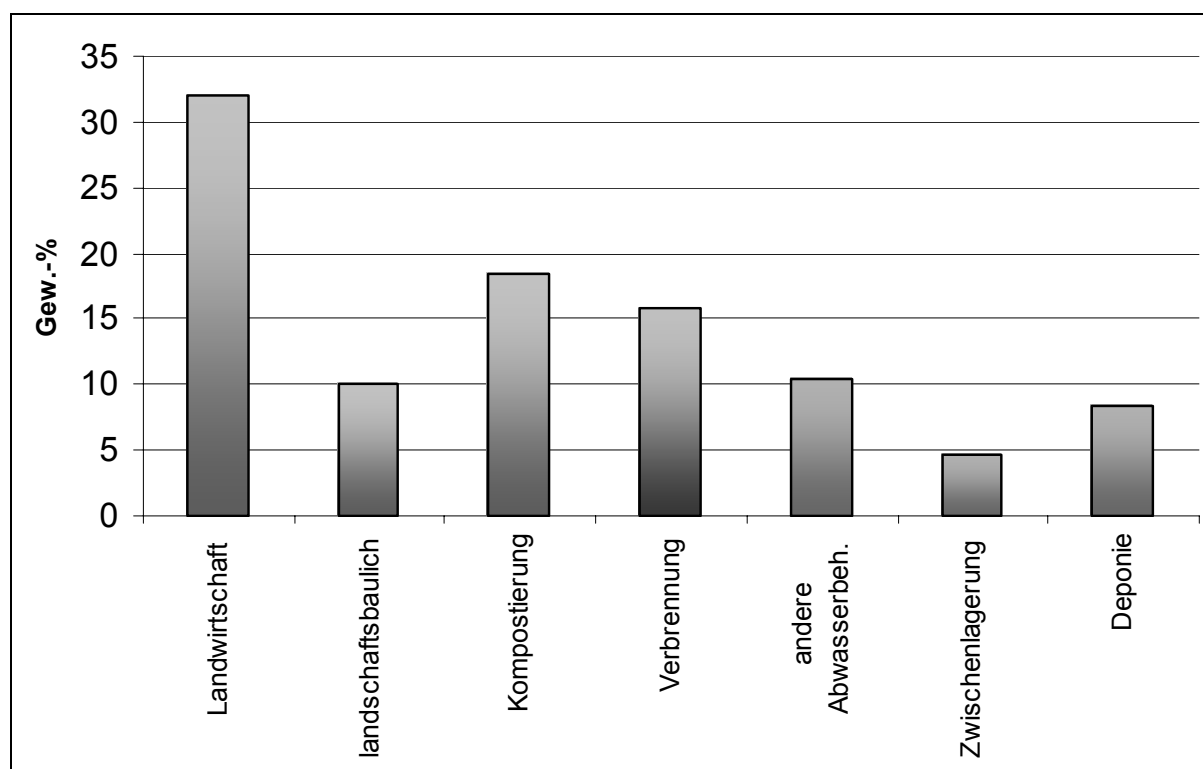
Mengenströme für kommunale Klärschlämme

1998 betrug der Gesamtanfall an kommunalen Klärschlämmen 2,48 Mio. t TS, die Verteilung auf die unterschiedlichen Entsorgungswege ist in folgender Abbildung dargestellt.

⁸⁷ Bei der Monoverbrennung besteht die Möglichkeit der Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche.

Bild 32

Entsorgungswege für kommunalen Klärschlamm 1998



Bis zum Jahr 2000 ist der Gesamtanfall an kommunalem Klärschlamm auf 2,3 Mio. t TS gefallen. Die landwirtschaftliche Verwertung, die 1998 insgesamt bei 42 % (landwirtschaftliche und landbauliche Verwertung) lag, ist auf 37 % gefallen (BMU 2002).

Kapazitäten zur energetischen Verwertung bzw. thermischen Beseitigung

In Deutschland gibt es derzeit 23 Mono-Klärschlamm-Verbrennungsanlagen (16 kommunale und 7 betriebliche Anlagen). Die Jahreskapazität der bestehenden Anlagen beträgt 610.000 t TS, diese wird nach Inbetriebnahme einer weiteren geplanten Anlage auf 630.000 t TS steigen.

In rund 10 Müllverbrennungsanlagen werden derzeit Klärschlämme mitverbrannt. Dabei wird ein Jahresdurchsatz von 120.000 bis 140.000 t TS erreicht. Dies entspricht ungefähr 5% des derzeitigen Klärschlammaufkommens in Deutschland.

Die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken kann sowohl in Steinkohle- wie auch in Braunkohlekraftwerken erfolgen. Bei den Braunkohlekraftwerken wird mechanisch entwässerter Klärschlamm angenommen und zusammen mit der Kohle in der Mahltrocknungsanlage vermahlen.

In Steinkohlekraftwerken kann nur thermisch getrockneter Klärschlamm (90-95% TS) eingesetzt werden. 10 Kohlekraftwerke setzen derzeit im Dauerbetrieb Klärschlamm zur Mitverbrennung ein, 2 weitere verfügen über eine Dauergenehmigung und in 5 Anlagen werden Versuche zur Mitverbrennung durchgeführt.

Die Jahreskapazität in diesen Anlagen beträgt ca. 600.000 t TS. Nach Betriebserfahrungen der E.ON liegt der tatsächliche Wert unter dem theoretisch ermittelten Wert der Jahreskapazität. Nach deren Angaben beträgt die derzeit vorhandene Mitverbrennungskapazität ca. 310.000 t TS; diese wird durch geplante und im Bau befindliche Kapazitäten bis Ende 2004 auf ca. 540.000 t TS gesteigert werden.

Einen signifikanten Entsorgungsbeitrag im Rahmen der Mitvergasung in Festbettvergäsern liefert das SVZ Schwarze Pumpe. Hier liegt eine Dauergenehmigung für eine Kapazität von 80.000 t TS bis 130.000 t TS vor. Die anderen Vergasungsvarianten setzen in Deutschland nur untergeordnet Klärschlamm zur Mitvergasung ein. Da die wirtschaftliche Zukunft des SVZ Schwarze Pumpe bisher noch nicht abschließend geklärt ist (EUWID 2003), können diese Mengen nur bedingt mit eingerechnet werden.

Derzeit steht in Deutschland somit eine Jahreskapazität von 1,4 bis 1,5 Mio. t TS zur energetischen Verwertung bzw. thermischen Beseitigung von Klärschlamm zur Verfügung.

Alternative Klärschlammbehandlungsverfahren

Alternative Verfahren zur Klärschlammbehandlung sind chemisch-physikalische Verfahren, wie die Nassoxidation, die Hydrolyse, das Mikrowellen-Hochdruckverfahren oder die Hydrothermaloxidation, und die Mitbehandlung in mechanisch-biologischen Anlagen. Heute leisten diese Verfahren keinen nennenswerten Beitrag zu der Entsorgung von Klärschlämmen. In wie weit diese Verfahren zukünftig geeignet sind, Kapazitäten zur Klärschlammentsorgung bereitzustellen, hängt hauptsächlich davon ab, ob eine Inertisierung der Klärschlämme nach den Anforderungen der Abfallablagerversordnung erreicht werden kann.

Erwartete Veränderungen des Aufkommens an kommunalem Klärschlamm

Technologische Veränderungen

Die verschiedenen Verfahren zur Behandlung von Klärschlämmen befinden sich in einer dauernden Weiterentwicklung. Darüber hinaus werden auch noch neue Verfahren zur Behandlung von Klärschlämmen entwickelt.

Ein von den Firmen Infraser und Messer Griesheim entwickeltes Verfahren ist die partielle Sauerstoffverbrennung, bei der reiner Sauerstoff transversal in die Wirbelschicht eingeblasen wird und das in bestehende Wirbelschichtverbrennungen nachgerüstet werden kann. Im Versuchsbetrieb konnte der Durchsatz im Mittel um 42 % gesteigert werden. In wie weit bestehende Anlagenbetreiber bereit sind, in diese neue Technik zu investieren und um welchen Anteil somit die Verbrennungskapazität in Deutschland steigen wird, kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschätzt werden.

Darüber hinaus lässt sich noch kein Trend zu einer vermehrten Phosphor-Zurückgewinnung aus Klärschlamm erkennen, obwohl die abbauwürdigen P-Reserven nur noch für etwa 90 Jahre reichen - Gründe hierfür sind große wirtschaftliche Probleme (EUWID 2003).

Eine andere Möglichkeit ist die Zurückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen. In Konkurrenz dazu stehen aber Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus der thermischen Verwertung von getrennt verbrannten Tiermehlen und Schlachtabfällen.

Die Entwicklung in der Aufbereitungstechnik von Klärschlämmen wird zu neuen Verfahren führen, die z.B. den Gehalt an Schwermetallen senken können.

Klärschlämme werden vor der Weiterbehandlung in der Regel durch anaerobe oder aerobe Verfahren stabilisiert. Dies ist nötig, aufgrund von

- Transportproblemen (unentwässerte Klärschlämme brauchen sehr viel mehr Raum als getrocknete Klärschlämme)
- Handling-Problemen von unstabilisierten Klärschlämmen
 - bei der Förderung in die Transportfahrzeuge
 - bei der Lagerung (Möglichkeit einer einsetzenden Vergärung)
 - bei der Förderung in Verbrennungsverfahren (Weiterbehandlung)
 - aufgrund von Geruchs- und Hygieneproblemen etc.

Heute werden in Deutschland rund 10.000 Abwasserbehandlungsanlagen betrieben, davon verfügen 7.231 über eine biologische Klärschlammbehandlung. Von diesen Anlagen werden 3.351 anaerob und 2.929 aerob betrieben. 3.700 Anlagen verfügen über eine Entwässerung, Eindickung und/oder Konditionierung von Klärschlamm.

Um das Volumen der Klärschlämme (weiter) zu reduzieren, findet meist eine mechanische Entwässerung statt. Durch die mechanische Entwässerung (wie Kammerfilterpressen oder Membranfilterpressen, Zentrifugen) werden Trockenrückstände zwischen 20 % und 45 % erreicht (z.T. unter Zusatz von Additiven) und der Heizwert erhöht. Thermische Trocknungsverfahren verdampfen verbliebenes Innen- und Adsorptionswasser und erreichen in der Teiltrocknung 80 % Gew.-% TS und in der Volltrocknung 95 Gew.-% TS.

Eine andere Entwicklung bezieht sich auf den offenbar verstärkten Einsatz der aeroben thermophilen Stabilisierung. Dieses Verfahren scheint sich dabei nach Aussage größerer Entsorgungsverbände aufgrund aktueller Ausschreibungsergebnisse aus Kostengründen – auch bei größeren Anlagen, die bislang eine Domäne der Faulung waren – weiter zu verbreiten.

Wird der Klärschlamm getrocknet und verbrannt, so wird im Gesamtverfahren kaum Energie frei, da insbesondere die thermische Trocknung sehr energieintensiv ist. Hier ist eine Trocknung durch Abwärme von Feuerungsprozessen z.B. im Braunkohlekraftwerk von Interesse.

Gesetzliche Veränderungen

Der Gesetzgeber hat einige Aktivitäten im Bereich der Verwertung und Beseitigung von Klärschlamm entwickelt.

Die eine Richtung setzt bei der Deponierung von Klärschlämmen an. Die TA Abfall, die technische Anleitung Siedlungsabfälle (TASi), die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) und die Deponieverordnung (DepV) verbieten ab Juni 2005 die Ablagerung von unbehandelten Klärschlämmen.

Das abzulagernde Material muss bestimmte Anforderungen in den Bereichen Total organic carbon (TOC), Gasbildungsrate (GB 21) und Glühverluste einhalten, um deponiert werden zu dürfen. Die Ablagerungsanforderungen für Klärschlämme aus dem Sonderabfallbereich sind ebenfalls in der DepV geregelt.

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) legt strenge Grenzwerte z.B. für Schwermetalle fest. Werden diese Grenzwerte überschritten, dürfen keine Klärschlämme mehr auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden aufgetragen werden. Die Diskussion um hormonell wirksame Stoffe in Klärschlamm wird eine weitere Reduktion dieses Verwertungsweges nach sich ziehen. Damit fehlt für Klärschlamm künftig der wichtigste Abnehmer.

Das Grenzwertpapier „Gute Qualität und sichere Erträge“ (BMU/BMVEL 2002) zeigt einen eindeutigen Trend: Die stoffliche Verwertung, d.h. das Aufbringen von Klärschlämmen auf Äcker und Felder wird durch strenge Grenzwerte stark reduziert. Insbesondere die strengen Grenzwerte für Kupfer und Zink lassen sich nur schwer unterschreiten, da diese Stoffe in der Tierernährung der Viehwirtschaft eine wichtige Rolle spielen (Christian-Bickelhaupt 2003).

Bei der Verbrennung von Klärschlämmen werden in Zukunft die strengeren Vorgaben der 17. bzw. der 13. BImSchV und der TA Luft gelten. Zudem ist fraglich, ob die (Mit-)Verbrennungskapazitäten für die Mengen an Klärschlamm ausreichen (ab 2005 stehen voraussichtlich bedingt durch die AbfAbIV große Mengen an brennbarem Material zur Verfügung).

Weitere Einflussfaktoren

Ein wichtiger Einflussfaktor ist die Größe der Bevölkerung. Da diese sich in Deutschland von heute 82 Millionen auf 71 Millionen im Jahr 2050 reduzieren wird, ist von einem reduzierten Klärschlammaufkommen auszugehen (Enquete 2002).

Der Reduktion der Bevölkerung kann der weitergehende Ausbau des Kanalnetzes entgegenstehen. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an das Kanalnetz liegt derzeit bei über 93 %. Dieser wird in Zukunft nur noch geringfügig auf ca. 95 bis 96 % steigen.

Entwicklung des Aufkommens an kommunalem Klärschlamm bis 2030

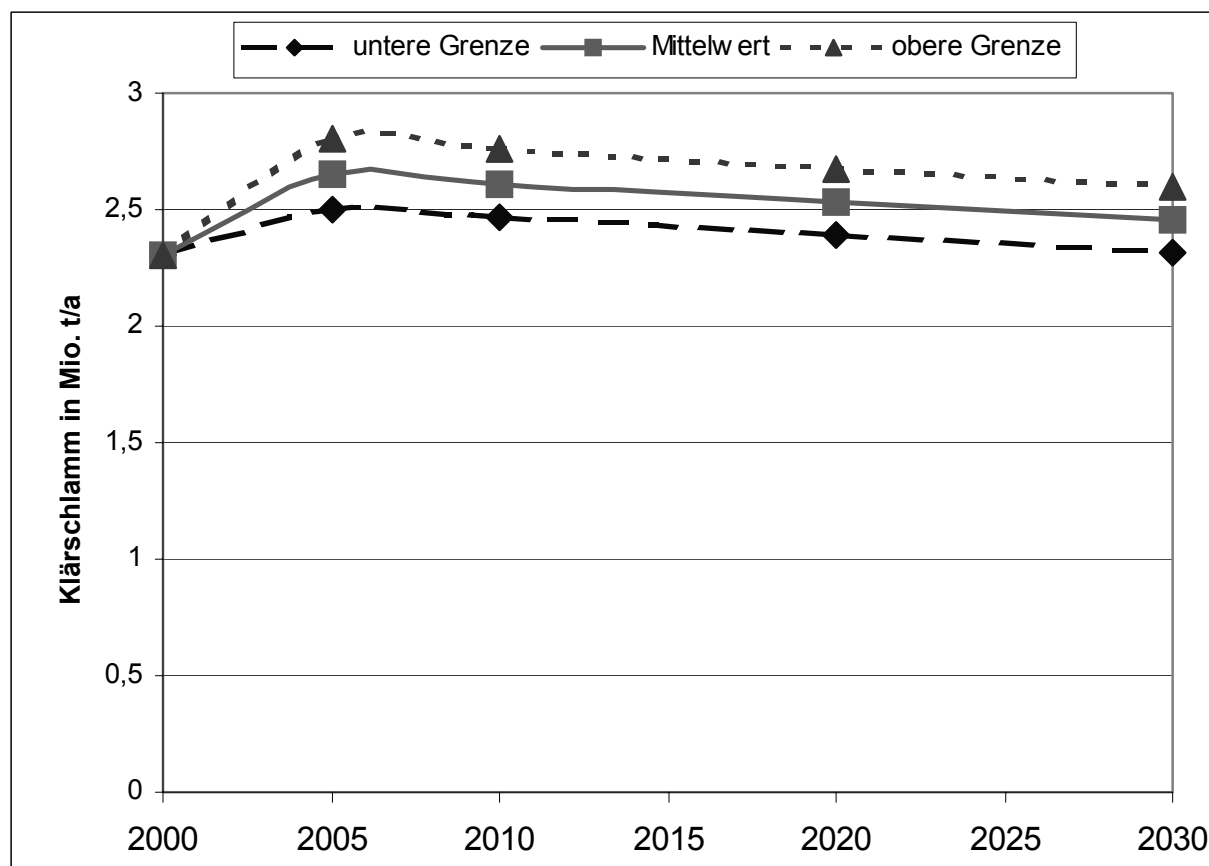
Esch/Loll (2001) benennen für 1998 ein spezifisches Aufkommen von 33,7 kg TS pro angeschlossenen Einwohner. Diese Untersuchung ermittelt einen Maximalwert der zu entsorgenden Klärschlammenge von 2,5 Mio. t TS, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Werden demographische Entwicklungen mit eingerechnet, kann unter Berücksichtigung neuer Technologien wie Phosphatrückgewinnung oder Klärschlammdeintegration eine untere und eine obere Grenze des zukünftigen Klärschlammanfalls für die betrachteten Jahrzehnte abgeschätzt werden. Der Haupteinflussfaktor auf die Klärschlammenge ist die Bevölkerungsentwicklung. Der Trend zeigt eine Bevölkerungsabnahme um 2 bis 3 % pro Dekade im Zeitraum von 2000 bis 2050. Die Phosphatrückgewinnung und andere alternative Klärschlammreduktionsverfahren werden berücksichtigt, indem bei der Berechnung der Abnahme der Klärschlammenge von 3% pro Dekade ausgegangen wird. Der Rückgang von 2005 auf 2010 beträgt damit bei Annahme eines linearen Verlaufs 1,5 %.

Andere Quellen gehen davon aus, dass der Anstieg des Klärschlammanfalls größer ausfällt und unterstellen Mengen von ca. 2,8 Mio. t TS in 2005 (EUWID 2003), von denen ca. 30% zur Verbrennung zur Verfügung stehen, und erwarten für die nachfolgenden Jahre keine nennenswerten Steigerungen. Die obere Grenze stellt die Entwicklung ausgehend von einem Klärschlammanfall von 2,8 Mio. t TS in 2005 dar.

Die folgende Grafik zeigt diesen Entwicklungskorridor sowie den hier zugrunde gelegten Mittelwert dar.

Bild 33

Entwicklung des kommunalen Klärschlammfalls bis 2030



Energetisch nutzbares Potenzial an kommunalem Klärschlamm

Für das energetisch nutzbare Klärschlammpotenzial ist die Entwicklung der – vorrangigen – stofflichen Nutzung wesentlich.

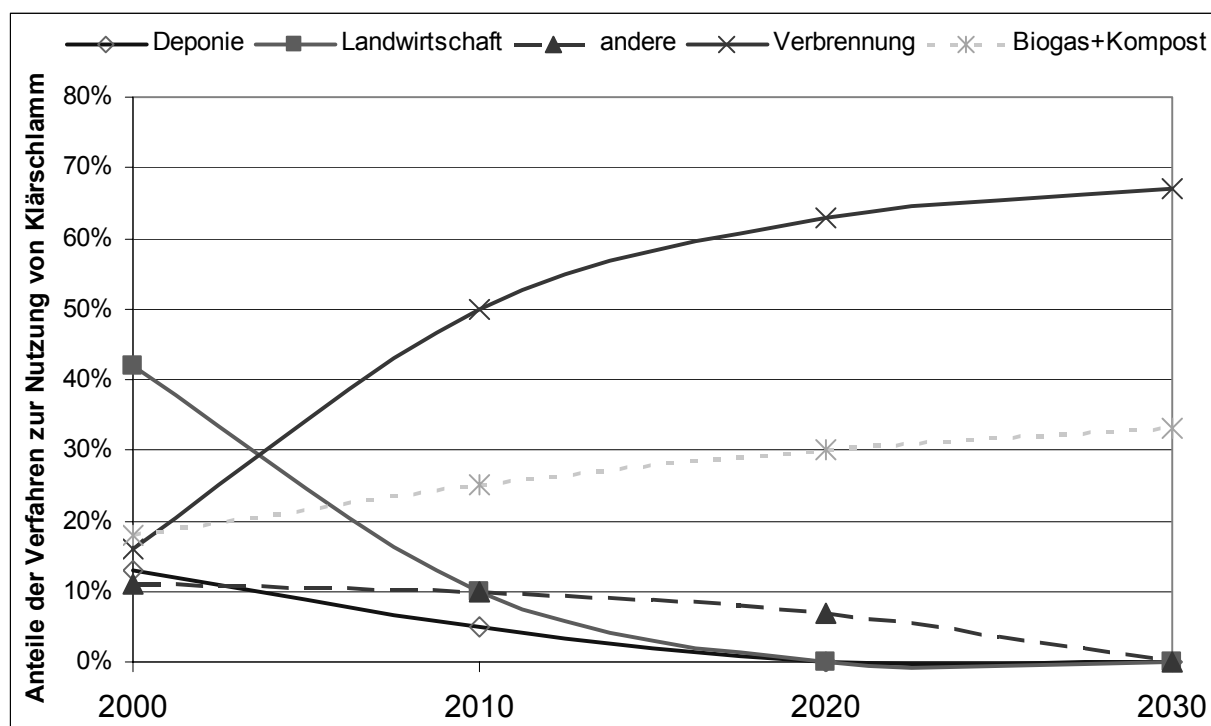
In Bayern wurde in der Folge der BSE-Krise und der anschließenden Diskussion um die Ausbringung der Klärschlämme in der Landwirtschaft beschlossen, die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung bis ca. 2005 zu beenden. Bis dahin soll auch der bisher landwirtschaftlich oder landschaftsbaulich verwertete Klärschlamm thermisch beseitigt oder energetisch verwertet werden. Dabei wird aus Kostengründen die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken als Entsorgungsmaßnahme vorgezogen, aber auch die Mitverbrennung in Hausmüllverbrennungsanlagen und die Kapazität an Monoklärschlammverbrennungsanlagen soll ausgebaut werden. Des Weiteren wird die Entwicklung innovativer Entsorgungsverfahren und kostengünstiger Phosphatrückgewinnungsverfahren gefördert (Spitznagel 2003).

Derzeit fallen in Bayern 291.000 t TS Klärschlamm an, von denen 35 % landwirtschaftlich und 37 % energetisch verwertet werden. Der Anteil der energetischen Verwertung bzw. thermischen Beseitigung wird nach dem Beschluss des bayerischen Ministerrates vom 15.5.2001 bis 2005 auf 72 % steigen.

In wie weit die Förderung der Phosphatrückgewinnung bis dahin einen Einfluss auf den Gesamtklärschlammfall hat, ist bisher noch unklar, da zur Zeit auch andere Phosphatquellen in der Diskussion stehen. Ein Rückgang von 2 % des Klärschlammes auf Grund der Phosphatrückgewinnung und anderer alternativer Reduktionsverfahren ist anzunehmen.

Übertragen auf das gesamte Bundesgebiet wurde für alle Szenarien die folgende Entwicklung angenommen: Die bisher landwirtschaftlich und landschaftsbaulich verwerteten Mengen reduzieren sich bis 2010 auf 10 %, der Anteil der deponierten Mengen bis 2010 geht auf 5 % zurück, beide Wege werden bis 2020 beendet. Der Anteil der thermischen Verfahren wird hingegen von bisher 16 % auf 67 % bis 2030 steigen, die anderen Verfahren werden bis 2030 auf Null zurückgehen. Der Anteil des schadstoffarmen Klärschlammes⁸⁸, der für Vergärung und nachfolgende Kompostierung zur Verfügung steht, wird 2010 bei 25 % liegen und danach bis auf 33% in 2030 ansteigen. Die folgende Grafik zeigt diese Entwicklung nochmals im Überblick. Dieser Anteil wird für alle betrachteten Szenarien als fix unterstellt.

Bild 34 *Behandlungs- und Entsorgungswege für Klärschlamm bis 2030*



⁸⁸ Die Grenzwerte für schadstoffarme Klärschlämme für die landwirtschaftliche Verwertung stehen zurzeit zur Diskussion (BMU/BMVEL 2002).

Mit diesen Entwicklungen lässt sich das energetisch nutzbare Klärschlammpotenzial aus Kommunen in den drei Szenarien abhängig von der Vorbehandlung des Klärschlammes vor der thermischen Verwertung darstellen⁸⁹. In allen Szenarien wird der zur Trocknung des Klärschlammes auf 5 % TR benötigte Energieaufwand allerdings nicht berücksichtigt. Das sich in Kuppelproduktion ergebende Brennstoffpotenzial aus Klärgas wird in Kapitel 5.5.4 beschrieben.

Im Szenario *Referenz* wird der Klärschlamm vor der Verbrennung zunächst aerob-thermophil stabilisiert. Die dabei entstehende Energie wird nicht genutzt. Durch den Umsatz von organischen Bestandteilen des Klärschlammes wird der Heizwert (kJ/kg_{TS}) absinken (hier wird ein Heizwert von 9.000 kJ/kg_{TS} nach Stabilisierung abgenommen), so dass mit Brennstoffpotenzialen von 3,3 PJ/a in 2000, von 11,7 PJ/a in 2010, von 14,4 PJ/a in 2020 und von 14,8 PJ/a in 2030 frei Verbrennungsanlage gerechnet werden kann.

Im Szenario *Umwelt* wird der Klärschlamm zur Erzielung höherer Energieerträge vor der Verbrennung komplett anaerob vorbehandelt. Die zusammen mit der anaeroben Stabilisierung des stofflich nutzbaren Klärschlammanteils erzielbaren Klärgaserträge finden in Kapitel 5.5.4 Berücksichtigung. Für die ausgegorenen Klärschlammsubstrate wird nach Trocknung ein Heizwert von 7 MJ/kg TS unterstellt. Damit ergeben sich Brennstoffpotenziale in Höhe von 2,6 PJ/a (2000), 9,1 PJ/a (2010), 11,2 PJ/a (2020) und 11,5 PJ/a (2030).

Im Szenario *Biomasse* wird der Klärschlamm – ggf. nach einer geeigneten Trocknung - vor Ort direkt der Verbrennung zugeführt (z. B. in kleinen Verbrennungsanlagen). Damit können die energetischen Verluste minimiert werden. Das Brennstoffpotenzial beläuft sich damit auf 4,0 PJ in 2000, 14,4 PJ/a in 2010, 17,5 PJ/a in 2020 und 18,1 PJ/a in 2030. Die erzielbaren Klärgasmengen sind die gleichen wie im *Referenz*-Szenario.

Klärschlamm aus industriellen Bereichen

Industrielle Abwässer fallen im verarbeitenden Gewerbe, Bergbau und bei der Gewinnung von Steinen und Erden und in Wärmekraftwerken für die öffentliche Versorgung an.

Bei der Reinigung von Abwässern in Kläranlagen fällt Klärschlamm, ein Feststoff – Wasser - Gemisch, an. In dem Klärschlamm werden nach Möglichkeit alle im Wasser enthalten Inhaltsstoffe, d.h. Nährstoffe, mineralische Anteile und anorganische und organische Schadstoffe angereichert.

Der Organikanteil liegt zwischen 65 und 70 %. Der anfallende Klärschlamm wird zur weiteren Behandlung mechanisch entwässert und zum Teil auch thermisch getrocknet. Je nach Entwässerungsverfahren werden dabei Trockensubstanzgehalte (TS-Gehalt) von 25-40 % (mechanisch entwässert) und 90-95 % (Volltrocknung) erreicht. Anschließend wird der Klärschlamm einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt, thermisch beseitigt oder deponiert.

Von 34.373 Mio. m³ eingeleiteten industriellen Abwässern im Jahre 1998 wurden 1.188 Mio. m³ in insgesamt 3596 Betrieben mit betrieblichen Abwasserbehandlungsanlagen behandelt⁹⁰.

⁸⁹ Der Heizwert von Klärschlamm liegt bei 8,7 - 12,7 MJ/kg Trockensubstanz (Escherle/Witthauer/Mottitschka), hier wird mit einem mittleren Wert von 11.000 kJ/kg_{TS} gerechnet. Für die Klärgasproduktion wurde mit einem ab 2000 je Dekade um 2%-Punkte steigendem Potenzial gerechnet.

⁹⁰ Die letzte verfügbare Erhebung stammt aus dem Jahr 1998, es liegen noch keine Zahlen für das Jahr 2000 vor.

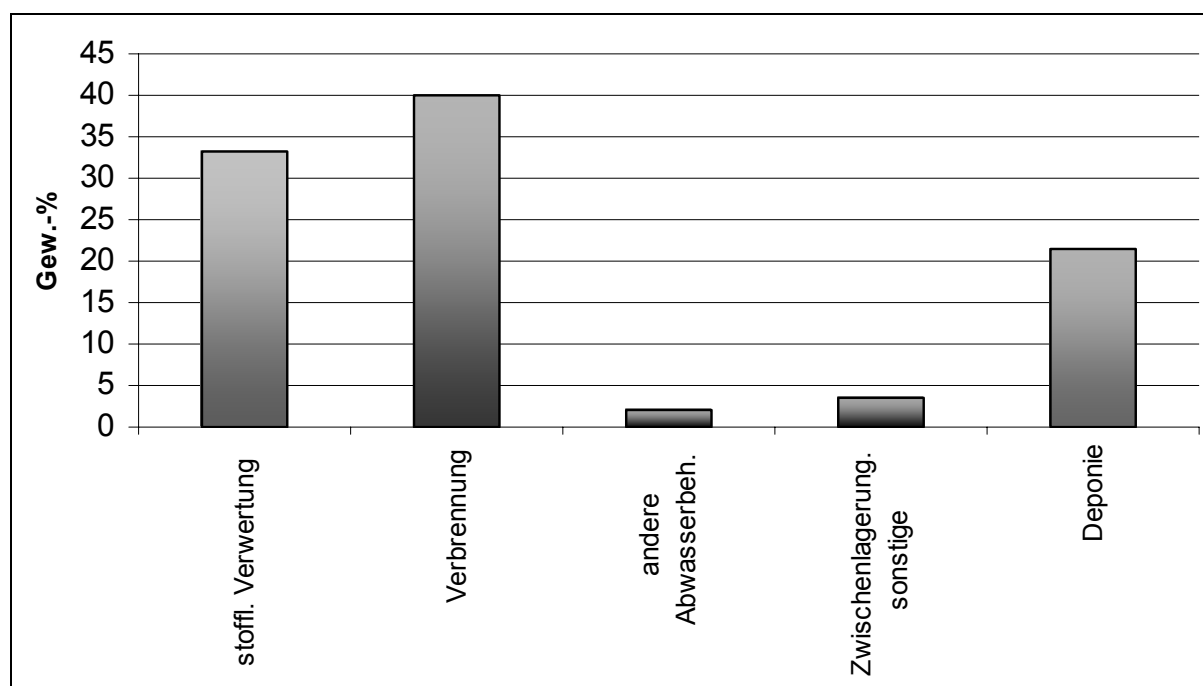
Da ein Teil des Abwassers mehrfach in unterschiedlichen Behandlungsanlagen behandelt wird, war die insgesamt behandelte Abwassermenge mit 1.354 Mio. m³ etwas höher als die eingeleitete Menge. Ca. 91 % des in betrieblichen Abwasserbehandlungsanlagen behandelten Abwassers stammte aus dem Verarbeitenden Gewerbe, lediglich 4 % fielen in dem Wirtschaftsbereich Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden und knapp 5 % in Wärmekraftwerken an.

Im Jahre 1998 betrug der Gesamtanfall von Klärschlamm aus industriellen Abwasserkläranlagen ca. 1,45 Mio. t TS. Rund 40 % des angefallenen industriellen Klärschlammes wurden energetisch verwertet bzw. thermisch entsorgt, das entspricht einer Menge von 580.000 t TS.

Weiterhin wurden ca. 33 % (479.000 t TS) des angefallenen industriellen Klärschlammes einer stofflichen Verwertung zugeführt (Verwertung in der Landwirtschaft, landschaftsbauliche Maßnahmen, Kompostierung und sonstige stoffliche Verwertung).

Die folgende Abbildung stellt die unterschiedlichen Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes dar.

Bild 35 Entsorgungswege des industriellen Klärschlammes



Quelle: StBA (1998)

Mengenströme und Potenziale an industriellen Klärschlämmen

Für die Potenzialanalyse zur Vergärung von Klärschlämmen wurden im Folgenden allerdings nur Abwasserbehandlungsanlagen mit biologischer Aufbereitung betrachtet, da die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) strenge Grenzwerte für Schadstoffe festlegt und bei Überschreiten dieser Grenzwerte nur noch eine Verbrennung bzw. Deponierung (ab 2005 verboten) von Klärschlämmen möglich ist. Von den 1.188 Mio. m³ eingeleiteten industriellen Abwässern in 1998 wurden rund 726 Mio. m³ in biologischen Abwasserbehandlungsanlagen behandelt.

Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der behandelten industriellen Abwassermengen und die in biologischen Abwasserbehandlungsanlagen aufbereiteten industriellen Abwassermengen auf die beiden Wirtschaftsbereiche. Des Weiteren wurden die in den biologischen Abwasserbehandlungsanlagen befindlichen Klärschlammengen aufgeführt.

Tabelle 98 Abwasser- und Klärschlammengen aus der Industrie im Jahr 1998

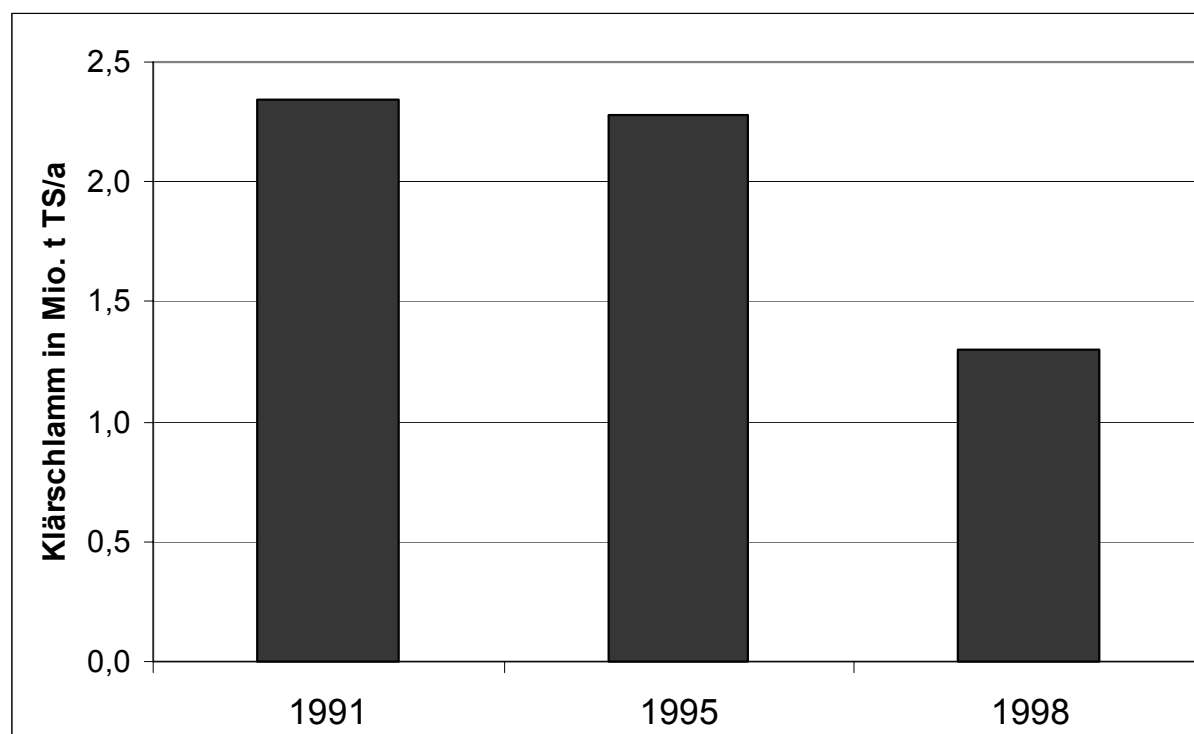
Wirtschaftssektor	Behandeltes Abwasser, 1000 m³	Biologisch behandeltes Abwasser, 1000 m³	Klärschlammverbleib der Industrie (Menge insgesamt) in t TS	Klärschlamm aus biol. behandelten Abwasser in t TS
Insgesamt	1.188.088	725.656	1.445.769	883.041
Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden		4.930	2.948	304
Verarbeitendes Gewerbe	1.086.323	717.596	1.300.998	859.405
Wärme- und Kälteanlagen	54.021	3.130	141.823	8.217

Der Ermittlung des energetischen Potenzials liegen die Abfallmengen des Jahres 1998 zugrunde. Die industriellen Klärschlammengen haben sich in den vergangenen Jahren rückläufig entwickelt (vgl. Bild 36).

Auf Grund der verschärften rechtlichen Rahmenbedingungen (EU-Klärschlammrichtlinie, AbfKlärVO etc.) im Bezug auf Schwermetallgehalte im Klärschlamm wird die landwirtschaftliche Verwertung zukünftig abnehmen. Die Klärschlammqualität wird auch weiterhin verschärft werden. Auf Grund der strengen Richtlinien in der EU haben die Schweiz und Frankreich bereits eine landwirtschaftliche Nutzung des Klärschlammes in ihrem Land verboten (UVEK 2002; anonym 2003).

Es ist aber davon auszugehen, dass in Deutschland Klärschlämme, die über den Schadstoffgrenzwerten der AbfKlärVO liegen, zukünftig verbrannt werden, da eine Deponierung ab 2005 verboten ist. Klärschlämme mit unbedenklichem Schadstoffgehalt, beispielsweise aus dem Ernährungsgewerbe und der Tabakverarbeitung sowie dem Papier-, Verlags- und Druckgewerbe, stehen weiterhin der Vergärung zur Verfügung.

Bild 36 Entwicklung der industriellen Klärschlammengen seit 1991



Quelle: StBA (1998)

Im Kapitel 5.5.4 wird dargestellt, dass 2/3 der Klärschlammengen aus Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung und 1/3 der Klärschlammengen aus dem Papier-, Verlags- und Druckgewerbe zur Vergärung (und nachfolgende stoffliche Nutzung) zur Verfügung stehen. Damit verbleiben aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen die restlichen Klärschlammengen zur Verbrennung. Dies sind 186.000 t TS/a aus Ernährungsgewerbe, Tabakverarbeitung und Papier-, Verlags- und Druckgewerbe sowie rund 462.000 t TS/a sonstiger Klärschlamm aus biologischen Abwasserbehandlungsanlagen der Industrie. Mit einem mittleren Heizwert von 11 MJ/kg_{TS} ergibt sich ein Klärschlammpotenzial von 7,1 PJ/a, das für den Szenario-Zeitraum als konstant angesetzt wird.

Überblick zum energetisch nutzbaren Potenzial von Klärschlamm

Das energetisch nutzbare Klärschlammpotenzial aus Kommunen und Industrie ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 99 Energetisch nutzbares Klärschlammpotenzial in den Szenarien

in PJ/a	2000	2010	2020	2030
Szenario Referenz				
kommunaler Klärschlamm	3,3	11,7	14,4	14,8
industrieller Klärschlamm	7,1	7,1	7,1	7,1
Summe	10,4	18,8	21,5	21,9
Szenario Umwelt				
kommunaler Klärschlamm	2,6	9,1	11,2	11,5
industrieller Klärschlamm	7,1	7,1	7,1	7,1
Summe	9,7	16,2	18,3	18,6
Szenario Biomasse				
kommunaler Klärschlamm	4,0	14,4	17,5	18,1
industrieller Klärschlamm	7,1	7,1	7,1	7,1
Summe	11,1	21,5	24,6	25,2

5.5.4 Technisches Brennstoffpotenzial aus Klärgas

Klärgas ist ein biogenes Gas, das aus Klärschlamm in anaeroben Abbauprozessen durch Mikroorganismen gewonnen wird. Die Abbauleistung der Mikroorganismen hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab⁹¹. In der Praxis werden mit einstufigen Verfahren Biogasausbeuten von 0,4-0,5 m³/kg oTS erzielt bei Methangehalten von 68 % (Neis 2001).

Die Vergärung von Klärschlamm hat neben der anaeroben Schlammstabilisierung (Abbau von ca. 40 bis 60 % der organischen Rohschlammbestandteile, vgl. Neis/Nickel 2001) einen weiteren Vorteil: Der fermentierte Klärschlamm hat eine bessere Düngerqualität (C:N-Verhältnis) als unvergorener Klärschlamm.

Technologische Veränderungen

An technischen Veränderungen wird eine verbesserte Umsatzleistung in der Fermentation erwartet. Möglichkeiten sind der Einsatz von Ultraschall zur besseren Auflösung und Zugänglichkeit des Schlammes oder eine zweistufige Vergärung (vgl. ATV-DVWK 2001). Beides kann die Effizienz erhöhen, wird aber höhere Kosten nach sich ziehen. Es lässt sich noch kein Trend zu einer vermehrten Phosphor-Zurückgewinnung aus Klärschlamm erkennen, obwohl die abbauwürdigen Reserven nur noch für etwa 90 Jahre reichen - ein Grund sind große wirtschaftliche Probleme (EUWID 2003).

Eine weitere technische Veränderung ist der Trend zur aerob-thermophilen Stabilisierung.

Gesetzliche Veränderungen

Der Gesetzgeber hat einige Aktivitäten im Bereich der Verwertung und Beseitigung von Klärschlamm entwickelt, die im Kapitel 5.5.3 näher dargestellt sind.

Weitere Einflussfaktoren

Ein wichtiger Punkt ist die Bevölkerungszahl, die sich in Deutschland bis 2030 deutlich reduzieren wird und parallel auch von einem reduzierten Klärschlammaufkommen auszugehen ist (Enquete 2002).

Aufkommenschätzung für kommunales Klärgas bis 2030

Die Entwicklung des Klärgasaufkommens hängt stark von der alternativen Nutzung des Klärschlammes (Verbrennung) ab, daher wurden die Szenario-Annahmen näher im vorigen Kapitel dargestellt.

⁹¹ Diese Faktoren sind vor allem: Zusammensetzung des Klärschlammes (Anteile an Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen), Temperaturen und Reaktionsbedingungen (Milieu, Hemmstoffe), Verfahren (1- oder 2-stufig)

In den Szenarien *Referenz* und *Biomasse* wird derjenige Anteil des kommunalen Klärschlammes vergoren, der für die stoffliche Nutzung vorgesehen ist. Dabei wird unterstellt, dass 0,7 % der Klärschlamm-trockensubstanz organische Trockensubstanz ist. Der Biogasertrag liegt bei 0,5 m³/kg oTS, der Biogasheizwert beträgt 21,6 MJ/m³ und ab 2010 wird eine technische Verbesserung der Energieerträge von 2 % pro Dekade angenommen. Als Resultat ergeben sich Klärgaspotenziale in Höhe von 5 PJ/a im Jahr 2010, 6,0 PJ/a in 2020 und 6,5 PJ/a im Jahr 2030.

Im Szenario *Umwelt* wird die gesamte kommunale Klärschlammmenge vergoren (Kapitel 5.5.3). Hieraus ergeben sich Klärgaspotenziale von 5,9 PJ/a in 2000, von 15,1 PJ/a in 2010, von 18,5 PJ/a in 2020 und von 19,7 PJ/a im Jahr 2030.

Tabelle 100 fasst die für Klärgas kalkulierten Potenziale zusammen.

Tabelle 100 Energetisch nutzbares Klärgaspotenzial aus Kommunen in allen Szenarien

in PJ/a	2000	2010	2020	2030
Szenario Referenz	3,1	5,0	6,0	6,5
Szenario Umwelt	5,9	15,1	18,5	19,1
Szenario Biomasse	3,1	5,0	6,0	6,5

Klärgaspotenzial aus industriellen Bereichen

Neben Klärgas aus kommunalen Anlagen gibt es auch zur Vergärung geeignete Klärschlämme in der Industrie. Auf Grund der strengen Grenzwerte der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) stehen diese nur in einzelnen Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes zur Verfügung.

Für die Potenzialanalyse wurden nur mengenrelevante Sektoren des Verarbeitenden Gewerbes betrachtet, d.h. das Ernährungsgewerbe und die Tabakverarbeitung sowie das Papier-, Verlags- und Druckgewerbe.

Ernährungsgewerbe und Tabakverarbeitung

In diesen Wirtschaftssektoren fallen Klärschlämme in einer Größenordnung von ca. 47.000 t/a Trockenmasse (Stand 1998) aus biologischen Abwasserbehandlungsanlagen an. Der Anteil an organischer Trockensubstanz (oTS) in der Trockenmasse des Klärschlammes liegt bei rund 70 %, das entspricht einer Menge von 32.900 t oTS/a.

Unter der Annahme, dass ca. 2/3 davon für eine Vergärung zur Verfügung stehen, ergibt sich ein Klärschlamm-potenzial von 22.000 t/a oTS. Mit einem Biogasertrag von 0,4 bis 0,5 m³/kg oTS errechnet sich ein Klärgaspotenzial von 8,8 Mio. bis 11,8 Mio. m³/a, wobei als Mittelwert von 10,5 Mio. m³/a ausgegangen wird. Das entspricht bei einem Heizwert von 21,6 MJ/m³ einem Klärgaspotenzial um 0,24 PJ/a.

Papier-, Verlags- und Druckgewerbe

Hier fallen Klärschlämme in einer Größenordnung von ca. 375.000 t/a Trockenmasse aus biologischen Abwasserbehandlungsanlagen an (Stand 1998). Der Anteil an organischer Trockensubstanz in der Trockenmasse des Klärschlammes liegt bei 70 %, das entspricht einer Menge von 262.500 t oTS/a. Unter der Annahme, dass □ davon für eine Vergärung zur Verfügung stehen, ergibt sich ein Klärschlammpotenzial von 87.500 t oTS/a.

Mit einem Biogasertrag von 0,4 bis 0,5 m³/kg oTS errechnet sich ein Klärgaspotenzial von 35 bis 44 Mio. m³/a, wobei als Mittelwert von rund 39 Mio. m³/a ausgegangen wird. Das entspricht bei einem Heizwert von 21,6 MJ/m³ einem Klärgaspotenzial von 0,85 PJ/a.

Überblick zum energetischen Biomassepotenzial aus Klärgas

Das energetisch nutzbare Klärgaspotenzial aus Industrie und Kommune ist in der nachfolgenden Tabelle zusammenfassend für alle Szenarien dargestellt. Der Wert für die industrielle Klärgasproduktion liegt annahmegemäß konstant bei 1,1 PJ/a. Die wesentlichen Veränderungen ergeben sich beim kommunalen Klärschlamm.

Tabelle 101 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Klärgas in den Szenarien

in PJ/a	2000	2010	2020	2030
Szenario Referenz				
kommunales Klärgas	3,1	5,0	6,0	6,5
industrielles Klärgas	1,1	1,1	1,1	1,1
Summe	4,1	6,1	7,1	7,6
Szenario Umwelt				
kommunales Klärgas	5,9	15,1	18,5	19,1
industrielles Klärgas	1,1	1,1	1,1	1,1
Summe	7,0	16,2	19,6	20,1
Szenario Biomasse				
kommunales Klärgas	3,1	5,0	6,0	6,5
industrielles Klärgas	1,1	1,1	1,1	1,1
Summe	4,1	6,1	7,1	7,6

Andere Potenzialstudien kommen ohne besondere Berücksichtigung der aktuellen Entwicklungstendenzen in der Klärschlammdebatte zu z.T. deutlich abweichenden Potenzialen. So geben Kaltschmitt/Thran (2003) das Klärgaspotenzial mit insgesamt 19,5 PJ/a an – ein Wert, der hier nur im Umwelt-Szenario bei unterstellter Vergärung erheblicher Klärschlammanteile erreicht wird. In IE (2003) wird dargestellt, wie sich dieser Wert ergibt – 17 PJ für kommunales Klärgas und 2,5 PJ für Klärgas aus dem Ernährungsgewerbe. In diesen Daten sind die Restriktionen zum hier angenommenen künftig geänderten Klärschlammaufkommen nicht einbezogen. Weiterhin bleibt unklar, wie bei einem dort genannten energetisch nutzbaren organischen Trockensubstanzaufkommen von 1,75 Mio. t oTS sich ein nutzbares Klärgaspotenzial von 1.700 Mio. m³/a ergibt. Die spezifische Gasmenge läge gut doppelt so hoch wie hier angenommen, was sich allenfalls mit Heizwertunterschieden und damit anderer Gaszusammensetzung erklären lässt.

Abschließend kann damit festgestellt werden, dass die hier durchgeführte Klärgaspotenzialabschätzung gut begründet und - in Anbetracht der bestehenden, erheblichen Unsicherheiten – eher konservativ einzuschätzen ist.

5.5.5 Technisches Brennstoffpotenzial aus Altholz

Altholz besteht aus Gebrauchtholz und Industrierestholz, das als Abfall anfällt: Gebrauchtholz (gebrauchte Erzeugnisse aus Holz, Holzwerkstoffe oder Verbundstoffe mit überwiegendem Holzanteil) fällt dort an, wo Holz aus dem Nutzungsprozess ausscheidet, z. B. bei Baumaßnahmen (Gebäudeabbrüche, Neubauten, Renovierungen) und am Ende einer bestimmten stofflichen Nutzung (Altmöbel, Verpackungsmaterial).

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzungsgeschichte können im Altholz zum Teil nicht unerhebliche Schadstoffanteile enthalten sein. Altholz wird nicht als Biomasse im Sinne des EEG angesehen

- mit einem Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) oder polychlorierten Terphenylen (PCT) in Höhe von mehr als 0,005 Gewichtsprozent entsprechend der PCB/PCT-Abfallverordnung vom 26. Juni 2000,
- mit einem Quecksilbergehalt von mehr als 0,0001 Gewichtsprozent und
- wenn dessen energetische Nutzung als Abfall zur Verwertung aufgrund des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts ausgeschlossen worden ist.

Zur Ermittlung des technischen Altholzpotezials können die Abfallstatistiken der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger sowie die bei den Statistischen Landesämtern erfassten Abfallmengen in Bezug auf Altholz ausgewertet werden. Dabei hat sich gezeigt, dass in den Statistiken unterschiedlich je nach Bundesland die Anlagen zur Verbrennung von Holz sowohl der Abfallbeseitigung als auch der Abfallbehandlung zugeordnet werden, was die Auswertung der Stoffströme erschwert. Die jeweiligen Holzmen gen lassen sich direkt oder indirekt aus den einzelnen Abfallfraktionen (Gewerbeabfall, Sperrmüll etc.) ermitteln.

Dabei wird ein aus der Literatur gemittelter prozentualer Holzanteil angenommen, um die absoluten Holzmen gen zu berechnen (Scheuermann/Thrän 2003). Den vorhandenen Ergebnissen liegen u. a. aufgrund der nur zweijährigen Erhebungsweise bei den Statistischen Landesämtern Daten von 1998/99 zugrunde. An der grundsätzlichen Aussage dürfte sich jedoch kaum etwas geändert haben.

Das technische Altholzpotezial für Deutschland beträgt insgesamt knapp 8 Mio. t_{FM}/a (Scheuermann/Thrän 2003). Beim spezifischen Aufkommen ist hier noch ein deutlicher Unterschied zwischen den alten (70 bis 90 kg pro Einwohner und Jahr) und den neuen Bundesländern (120 bis 160 kg/(EW*a)) zu verzeichnen, dessen Ursache v. a. im Bauaufkommen begründet liegt. Bezogen auf das gesamte Bundesgebiet beträgt das spezifische Altholzaufkommen 97 kg/(EW*a) (Scheuermann/Thrän 2003).

Die Auswertung der Statistiken ergibt die in der nachfolgenden Tabelle dargestellte Verteilung des mobilisierbaren Altholzes nach Stoffgruppen.

Tabelle 102 Altholzanteil in den verschiedenen Fraktionen und daraus abgeleitetes technisches Altholzpotezial

		Holzanteil	Technisches Altholzpotezial
		%	t/a
Gebrauchtholz			
Hausmüll		1	154.782
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle		15	2.678.586
Sperrmüll		49	1.369.545
Baustellenabfälle in Entsorgungsanlagen		30	804.427
Aufbereitetes Holz aus Bauabfällen		100	646.083
Industrierestholz aus der Abfallwirtschaft			
Holzabfälle aus der Be- und Verarbeitung*		100	253.916
Holzabfälle aus der Anwendung**		100	1.505.209
Gesamt			
Technisches Potenzial	t/a		7.900.426
abzüglich Spanplattenindustrie	t/a		1.900.000
Energetisch nutzbares Potenzial	t/a		6.000.426
	PJ/a		78

* aus Aufbereitungsanlagen

** Bau- und Abbruchholz (1.030.000 Mio. t/a), Verpackungsmaterial, Masten etc.

Quelle: Scheuermann/Thran (2003)

Die größten Anteile am Aufkommen hat demnach Altholz aus Gewerbeabfall (ca. 2,8 Mio. t_{FM}/a) und Bauabfall (ca. 2,5 Mio. t_{FM}/a), gefolgt von Sperrmüll, Industrierestholz und Wertstoffen. Altholz aus Hausmüll ist mengenmäßig zu vernachlässigen.

Dabei ist zu beachten, dass das Holz in den jeweiligen Stoffgruppen mit sehr unterschiedlichem Aufwand erschließbar ist, z.B. lässt sich der Holzanteil im Hausmüll nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand getrennt erfassen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass 1998/99 in Deutschland etwa **2,8 Mio. t/a** Altholz deponiert wurden. Am 01.03.2003 ist die Altholzverordnung (AltholzV) in Kraft getreten, die die Verwertung fast aller Altholzsortimente verbindlich vorschreibt

Das bedeutet auch, dass die Deponierung von Altholz nicht mehr zulässig sein wird. Die AltholzV greift hier der TA Siedlungsabfall (TASi) hinsichtlich deren Übergangsfristen für die Deponierung von unbehandeltem Abfall vor. Es ist davon auszugehen, dass durch die AltholzV (und TASi) zumindest eine Teilmenge des zuvor abgelagerten Altholzes auf dem Markt verfügbar sein wird.

Unter Berücksichtigung der heutigen stofflichen Altholznutzung in der Spanplattenindustrie (1,3 Mio. t_{atro}/a) dürften für eine energetische Verwertung etwa **6,0 Mio. t_{FM}/a** zur Verfügung stehen. Eine Differenzierung dieser Menge nach Altholzklassen ist nicht eindeutig möglich. Dies entspricht einem Energieinhalt von 78 PJ (Heizwert: 13,0 MJ/kg).

Überblick zum energetischen Biomassepotenzial aus Altholz

Für die Potenzialermittlung werden folgende Annahmen getroffen:

- die anfallenden Mengen sind für den betrachteten Zeitraum konstant
- die sortenreinen Fraktionen sind in allen Szenarien vollständig verfügbar

- Altholz aus Mischmüllfraktionen ist wegen der künftigen Entsorgungsbedingungen ebenfalls in allen Szenarien überwiegend mobilisierbar (Ausnahme: Hausmüll), und zwar im Umwelt- und Referenzszenario zu 90 %, im Biomasse-Szenario vollständig.
- Altholz aus dem Hausmüll wird nur im Biomasse-Szenario verfügbar gemacht.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zur Entwicklung der Potenziale in den Szenarien.

Tabelle 103 Energetisch nutzbare Biomassepotenziale für Altholz in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	69	69	69	69
Umwelt	69	69	69	69
Biomasse	78	78	78	78

5.5.6 Technisches Brennstoffpotenzial aus festen industriellen Bio-Abfällen

Unter industriellem festem Bioabfall werden im Rahmen dieser Ausarbeitung industrielle Reststoffe im Sinne der Biomasseverordnung verstanden, welche aufgrund ihres TS - Gehaltes nicht primär in Vergärungsanlagen eingesetzt werden können. Ausgeschlossen sind dabei Althölzer (siehe oben Altholz). Folgende Materialien und Herkunftsbereiche können diesbezüglich dargestellt werden:

Tabelle 104 Materialien und Herkunftsbereiche von industriellen festen Bioabfällen

Material	Herkunft
Spelzen, Stäube	Mühlenbetriebe, Tabakindustrie
Kerne, Stiele	Obst- und Gemüseverarbeitung (z.B. Hersteller von Konfitüren)
Nussschalen und sonstige Schalen	Hersteller von Brotaufstrichen, Sonnenblumen, etc.
Leder	Textil- / Möbelindustrie
Knochen, Borsten-/Hornabfälle	Tierhaltung/Schlachthöfe

Potenzialüberlegungen

Auf der Grundlage einer Literaturrecherche sowie einer Befragung von Experten⁹² konnten für das hier zu diskutierende Biomassesegment keine belastbaren Potenzialdaten für Deutschland festgestellt werden. Nach Informationen aus Dänemark können jedoch innerhalb des Brennstoffaufkommens aus Nussschalen, Obstkernen und Getreidesiebbresten den Getreidesiebbresten die größten Potenziale zugeordnet werden⁹³.

Punktuelle Erhebungen durch Befragungen brachten in diesem Zusammenhang folgende Erkenntnisse:

Der Verband Deutscher Mühlen⁹⁴ gibt an, dass ca. 20 % der Getreidevermahlung als Reststoff anfällt. Diese Reststoffe setzen sich zusammen aus der Kleie, den Spelzen, den Annahmestäuben und den Reinigungsabfällen. Die Kleie beansprucht davon ca. 19,5 % während 0,5 % (hauptsächlich Spelzen) auf die anderen Stoffe fallen (hauptsächlich Spelzen).

⁹² Fachgruppe Obstbau im Bundesausschuss Obst und Gemüse (Herr Knappe), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Institut für Energetik (Herr Schneider), Biomasse Info Zentrum (Herr Fischer); es konnten keine Angaben für das Aufkommen an den genannten Reststoffen getroffen werden, auch waren keine entsprechenden Studien bekannt.

⁹³ http://www.energiekalender.de/news/news_ausgabe.php?ID=1099

⁹⁴ persönliche Auskunft Herr Weizbaur

Die Getreideverarbeitung in Deutschland liegt derzeit in einer Größenordnung von 7,4 Mio. t/a. Daraus ergibt sich ein *Kleieaufkommen* von ca. 1,44 Mio. t/a, welches derzeit im Bereich der Futtermittelindustrie vermarktet wird.

Die *Spelzen* werden momentan mit einem Aufkommen von ca. 37.000 t/a über Verbrennungsanlagen, Biogasanlagen und die Kompostierung entsorgt. In Ballungsräumen gehen die Abfälle vornehmlich in Müllverbrennungsanlagen, während im ländlichen Raum eine Entsorgung über Biogasanlagen überwiegt. Aufgrund der Emissionsproblematik existieren noch keine Kleinf Feuerungsanlagen. Der Verband sieht hier allerdings eine weitere Verwertungsmöglichkeit für die Zukunft. Des Weiteren bestünde die Möglichkeit zur Pelletierung, was aber aus wirtschaftlichen Gründen bislang nicht umgesetzt wird. Tendenziell wird die Entwicklung der deutschen Getreidevermahlung für die nächsten Jahre stabil eingeschätzt, so dass das Aufkommen an Reststoffen aus der Getreideverarbeitung ungefähr gleich bleiben wird. Die Getreideverarbeitung sieht derzeit keine Probleme in der Entsorgung ihrer Reststoffe. In Deutschland gibt es zur Zeit ca. 750 Mühlen, wovon 345 meldepflichtig sind (Vermahlung von über 500 t/a).

Tabelle 105 *Größenklassen der Mühlen in Deutschland*

Vermahlung in t/a	Anteil an der Vermahlung in %	Betriebe
500 – 5.000	5,0	209
5.000 – 10.000	3,5	37
10.000 – 25.000	8,4	38
25.000 – 50.000	11,3	23
50.000 – 100.000	14,2	15
100.000 – 200.000	33,2	17
> 200.000	24,4	6

Quelle: www.muehlen.org

Nach einer Anfrage bei einem großen deutschen Konfitürenhersteller fallen dort folgende Mengen an Obstkernen an:

- Kirschsteine: ca. 40 – 50 t/a
- Pflaumensteine: ca. 30 – 40 t/a

Die derzeitigen Verwertungswege beziehen sich auf den Verkauf dieser Mengen als Füllmaterial für Wärmekissen o.ä. (über Zwischenhändler) sowie auf den Verkauf als Brennstoff für Heizungszwecke (über dänische Zwischenhändler).

Insgesamt erscheinen die vorliegenden Daten zu den Stoffmengen wenig belastbar, ebenso fehlen weitgehend Aussagen zu den bisherigen Entsorgungswegen. Hier sollten künftig weitere Untersuchungen stattfinden, die den Rahmen des laufenden Projekts sprengen würden.

Die festen industriellen Bio-Abfälle werden daher aus den Potenzialüberlegungen für die Szenarien *ausgeklammert*.

5.5.7 Potenziale zur energetischen Nutzung von industriellen Substraten

Unter industriellen Substraten werden nachfolgend vergärbare organische Abfälle verstanden, die nicht den Bereichen „organischer Hausmüll“ oder den industriellen festen Bioabfällen zugeordnet sind. Dabei ist substratseitig eine Abgrenzung zwischen Substraten und Abwässern nicht möglich. Hinsichtlich der Behandlungsziele und –konzepte besteht hier allerdings ein deutlicher Unterschied:

- Abwässer werden in der Regel unmittelbar am Entstehungsort behandelt. Dabei steht die Reduzierung der organischen Inhaltsstoffe im Vordergrund.
- Handelt es sich um transportfähige industrielle Substrate, sind grundsätzlich unterschiedliche Behandlungsoptionen gegeben. Dabei steht vielfach eine möglichst hochwertige Nutzung der Reststoffe (stofflich oder energetisch) im Vordergrund.

Bei der weiteren Betrachtung liegt daher ein deutlicher Fokus auf Stoffströmen, die *nicht* dem Abwassersystem zugeordnet werden⁹⁵. Für industrielle organisch belastete Abwässer wurde geprüft, ob eine gemeinsame Betrachtung mit kommunalen Abwässern (Klärgas) zu geeigneten Aussagen hinsichtlich der Potenziale führen kann, da hier eher vergleichbare Behandlungsziele und –konzepte erwartet werden können.

Industrielle Substrate fallen vor allem in verschiedenen Bereichen der Lebensmittelindustrie an. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die berücksichtigten Substrate, ihre Quellen und Faktoren, die das technische Potenzial einschränken. Weiterhin fallen regional industrielle Abfälle in der Fischverarbeitung und im Weinanbau an.

Tabelle 106 Übersicht zu industriellen Substraten

Substrate	Quellen	Einschränkende Faktoren
Schlacht- und Verarbeitungsabfälle	Fleischverarbeitung	Rückstandsart und –mengen, Tierkörperbeseitigung, Gelatineherstellung
Molke	Milchverarbeitung	Viehfütterung, Lactose- und Molkepulverherstellung, Transport
Schäl- und Putzreste	Obst- und Gemüseverarbeitung	Viehfütterung, Bindemittelherstellung, Pharmaindustrie (Stärke)
Melasse, Zuckerschnitzel	Zuckerindustrie	Viehfütterung (Pellets), Sirupherstellung, Alkoholbrennereien
Putzreste, Trester	Herstellung von Frucht- und Gemüsesäften	Viehfütterung, Pektinherstellung, Alkoholbrennereien
Treber, Hefe	Herstellung von Bier	Viehfütterung, Futtermittelindustrie

⁹⁵ Zu den industriellen Klärschlamm- und Klärgaspotenzialen vg. Kapitel 5.5.3 und 5.5.4.

Potenzialschätzungen für industrielle Substrate

Die nachfolgenden Abschätzungen beschränken sich auf die Industriebereiche, bei denen ein nennenswerter Beitrag am Gesamtpotenzial erwartet werden kann. Das sind die Wirtschaftszweige Bierherstellung, Produktion und Verarbeitung von Früchten, Weinkeltereien, Brennereien, Milchproduktherstellung, Schlachthöfe und Fleischverarbeitung sowie die Zuckerindustrie. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die entsprechenden Potenziale.

Tabelle 107 *Potenziale von Abfällen aus Gewerbe und Industrie*

Abfälle aus	Rückstände	Energetisch nutzbar	Energetisch nutzbare TS*	Biogas-potenzial	Energie-potenzial
	10 ³ t/a	10 ³ t/a	10 ³ t TS/a	10 ⁶ m ³ /a	PJ/a
Bierherstellung	2800	600 – 1300	100 – 210	75 – 150	1,6 – 3,2
Fruchtsaftkeltereien	780	200 – 400	85 – 170	55 – 110	1,2 – 2,4
Weinkeltereien	265	27 – 54	12 – 24	8 – 16	0,2 – 0,4
Brennereien	9,9·10 ⁶ hl/a	330 – 660	40 – 80	25 – 50	0,5 – 1,0
Milchverarbeitende Industrie	27·10 ⁶ hl/a (Abwässer)	1500	90	30	0,6
Schlachthöfe, Fleischverarbeitung	400	130 – 260	20 – 40	10 – 20	0,2 – 0,4
Zuckerherstellung	Schnitzel: 1800 Melasse: 900	180 – 370 100 – 200	120 – 250 75 – 150	50 – 105 45 – 90	} 2,1 – 4,2
Summe		3100 – 4700	540 – 1000	300 – 575	

* = wasserfreie organische Substanz (Trockensubstanz TS)

Quellen: Daten aus Hartmann (2002) sowie eigene Erhebungen

Der Ermittlung der Potenziale liegen die Produktions- und Abfallmengen der Jahre 1998 bzw. 1999, mittlere Trockensubstanzgehalte und Gaserträge sowie folgende Einschätzungen zur Nutzbarkeit der Rückstände zugrunde (nach Hartmann 2002; Wilfert/Schattauer 2002):

Abfälle aus der Bierherstellung bestehen zu 75 % aus Treber und 25 % aus Hefe, Geläger, sowie Heiß- und Kühltrubs. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass rund 25 % der Hefe und ca. 25-50 % des Trebers sowie des Heiß- und Kühltrubs für eine Biogasproduktion zur Verfügung stehen, da Treber hauptsächlich in der Milchviehfütterung, die anderen Rückstände in der Viehfuttermittelherstellung und die anfallende Hefe in konzentrierter Form als Bierhefe für die menschliche Ernährung eingesetzt wird.

Bei der Obstverarbeitung fallen Reststoffe in Form von Putzresten und Obstrestern als Rückstand aus dem Entsaftungsprozess an. Ein Teil der Rückstände wird derzeit als Viehfutter, zur Pektinherstellung sowie als Grundstoff für die Alkoholproduktion benutzt. Da aber nicht genau bekannt ist, wie die momentane Nutzung der Reststoffe ist, wird für die Berechnung eine nutzbare Reststoffmenge von 25-50 % der anfallenden Menge angenommen.

Der als Rückstand bei der Kelterung anfallende Trester besteht zum großen Teil aus Beerenhülsen, Kernen und Kämmen (Stiele, Rappen) und wird wegen seiner noch relativ hohen

Gehalte an Zucker, Weinsäure und anderen Substanzen bevorzugt für die Herstellung von Trester-Bränden bzw. Tresterweinen verwendet. Der Trester kann aber auch als Düng- oder Futtermittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Auf Grund der derzeit vorrangigen Nutzung als Alkoholgrundstoff bzw. als Futtermittel wird hier davon ausgegangen, dass lediglich 10-20 % der anfallenden Menge tatsächlich für eine Biogasgewinnung zur Verfügung stehen.

In Brennereien fällt je Liter produziertem Alkohol circa das zehn- bis zwölfwache an Rückständen, der sog. Schlempe, an. Derzeit wird die anfallende Schlempe hauptsächlich über den Futtermittelsektor als Tierfutter verwertet bzw. als Stickstoffdünger auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht. Auf Grund des hohen Mengenvolumens sowie der rückgängigen Nachfrage als Viehfutter wird aber versucht, über die energetische Verwertung der anfallenden Schlempe das Aufkommen zu verringern. Es wird deshalb für die Berechnung des Biogaspotenzials davon ausgegangen, dass in Zukunft ca. ein bis zwei Drittel der anfallenden Schlempen für die energetische Verwertung zur Verfügung stehen.

Rückstände der Milchverarbeitenden Industrie sind Abwässer, die zu 100 % energetisch verwertet werden können, da es keine Konkurrenznutzung gibt.

Die beim Schlachten und der anschließenden Weiterverarbeitung anfallenden Schlachtabfälle können, sofern sie nicht dem Tierkörperbeseitigungsgesetz unterliegen, weiter verwertet werden. Dies geschah bisher zum Teil über die Herstellung von Tierfutter, aber dieser Verwertungsweg ist auf Grund der hohen gesundheitlichen Risiken derzeit stark umstritten. Auch eine Verwertung als Substrat bzw. Kosubstrat in Biogasanlagen ist nur zulässig, wenn die Abfälle entsprechend hygienisiert werden. Da nicht alle tierischen Schlachtabfälle vergärbar sind und neben der energetischen Nutzung auch die stoffliche Verwertung bzw. die Verbrennung in Frage kommt, wird hier unterstellt, dass rund ein bis zwei Drittel der Gesamtmenge für eine Biogasproduktion zur Verfügung stehen. (davon ca. 10 % Flotatfette und rund 90 % Magen- und Panseninhalten, Geschlinge, Schleim etc.).

Bei der Zuckerherstellung fallen als Nebenerzeugnisse Melasse sowie Rübenschnitzel an. Ein Teil der Rübenschnitzel wird mit Melasse vermischt getrocknet und zu Pellets gepresst. Diese „Melasseschnitzel“ werden als energiereiches Futtermittel eingesetzt. Die anfallende Melasse wird zudem als Sirup in der Viehfütterung sowie in Hefefabriken und Brennereien verwendet. Durch diese anderweitige Verwertung der anfallenden Nebenerzeugnisse wird die für die Biogasproduktion verfügbare Menge stark eingeschränkt. So wird auf Grund der derzeitigen Marktstrukturen angenommen, dass lediglich 1 % der Rübenschnitzel sowie ca. 10 % der Melasse zur Verfügung stehen könnten. Dies ergibt sich bei den Rübenschnitzeln aus dem Verhältnis von erzeugten zu abgesetzten Schnitzeln; da die Melasse vollständig vermarktet wird, wird angenommen, dass der Teil der Melasse, der nicht in die Fütterung bzw. die industrielle Weiterverarbeitung geht, für die Biogasproduktion zur Verfügung steht.

Insgesamt kann von einem energetisch nutzbaren Biogaspotenzial aus Gewerbe- und Industriesubstraten in Höhe von rund 6 bis 12 PJ/a ausgegangen werden, wobei – auch unter Berücksichtigung der erheblichen Konkurrenznutzung – die größten Potenziale industrieller Rückstände in der Bier- und Zuckerherstellung, sowie in Fruchtsaftkellereien liegen.

Zukünftige Potenzialentwicklung und -erschließung

Die künftige Potenzialentwicklung o.g. industrieller Substrate hängt in starkem Maße von der Entwicklung der Lebensmittelverarbeitenden Industrie in Deutschland ab. Eine umfassende Diskussion kann hier nur unter Berücksichtigung der Agrarsituation in Deutschland sowie (in Hinblick auf die Technologieentwicklung im Bereich der Lebensmittelverarbeitung) zusammen mit anderen industriellen Rückständen erfolgen. Aktuell sind uns keine entscheidenden Veränderungen im Bereich der industriellen Substrate bekannt, so dass die aktuellen Zahlen mindestens auf 2010 übertragbar sein dürften.

Die zukünftige Potenzialerschließung hängt stark von den vorher dargestellten einschränkenden Faktoren ab. Für Substrate mit konkurrierender Nutzung gestaltet sich eine Prognose aus unserer Sicht sehr schwierig. Hier sollten entsprechende Rahmenbedingungen substratübergreifend festgelegt werden (vgl. z.B. Konkurrenznutzung „Schwachholz“). Für die unter Berücksichtigung der Konkurrenznutzung verbleibenden Substrate dürften vermehrt anaerobe Behandlungssysteme installiert werden, so dass hier von einer umfassenden Substraterschließung bis 2010 ausgegangen werden kann.

Insgesamt erscheinen die vorliegenden Daten zu den Stoffmengen zu gering und zu wenig belastbar, um szenario- und zeitpunktbezogene Potenziale auszuweisen. Ebenso fehlen weitgehend Aussagen zu den bisherigen Entsorgungswegen. Hier sollten künftig weitere Untersuchungen stattfinden, die den Rahmen des laufenden Projekts sprengen würden.

Die industriellen Substrate werden daher in den Potenzialüberlegungen für die Szenarien sehr vereinfacht betrachtet:

Als gemeinsamer „Sockel“ wird für das Referenz- und Umwelt-Szenario das Mindest-Potenzial angesetzt, während für das Szenario Biomasse die Potenzialobergrenze als nutzbar angenommen wird.

Überblick zum energetisch nutzbaren Biomassepotenzial aus industriellen Substraten

Die folgende Tabelle fasst die Potenzialanalyse nochmals im Überblick zusammen.

Tabelle 108 Energetisches Biomassepotenzial aus industriellen Substraten in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Referenz	6	6	6	6
Umwelt	6	6	6	6
Biomasse	12	12	12	12

5.6 Energetische Biomassepotenziale aus Zoomasse

Unter *Zoomasse* wird diejenige Biomasse verstanden, die in Tierkadavern sowie in Tierkörperteilen und Abfällen aus Schlachtbetrieben enthalten ist. Aus diesem Rohmaterial werden in Tierkörperbeseitigungsanlagen (TBA) die Produkte Tiermehl, Tierfett sowie Fleischbrei erzeugt. Als energetisches Potenzial werden im Folgenden nur diese Produkte betrachtet.

Das Rohmaterial ist gemäß der Entscheidung 1999/534/EG dem Drucksterilisationsverfahren zu unterziehen, um eine ausreichende Abtötung von Krankheitserregern zu gewährleisten. Hierzu wird das Material für eine Dauer von 20 Minuten einer Temperatur von 133 °C und einem Druck von 3 bar ausgesetzt⁹⁶. Das Zwischenprodukt ist sterilisierter Fleischbrei. Über Trockner wird das im Fleischbrei vorhandene Wasser auf einen Gehalt von ca. 6 % reduziert. Dieser getrocknete Fleischbrei wird in Schneckenpressen mechanisch in die Zwischenprodukte Schilfer und Rohfett getrennt. In weiteren Verfahrensschritten wird das Schilfer zerkleinert und das Rohfett gereinigt. Als Endprodukte resultieren Tiermehl mit einem Gewichtsanteil von rund 68 % und Tierfett mit 32 %.

Spezifiziertes Risikomaterial (SRM) wird nur in speziellen TBA verarbeitet. Die entstehenden Produkte sind nach der Entscheidung (EG) Nr. 999/2001 zu verbrennen. Aus ökonomischen Gründen werden in diesen TBA keine zwei Produktionslinien für LRM (low risk material) und SRM gefahren, sondern beide Kategorien zusammen verarbeitet und die Produkte als SRM weiter behandelt. Aus diesem Grunde beinhalten die statistischen Angaben zum SRM-Aufkommen auch LRM.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Verfahren zur Produktion von Tierfett und Tiermehl sowie von Fleischbrei in den kommenden Jahren nicht ändern werden.

5.6.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Seit 1.1.2001 gilt in der EU ein Verfütterungsverbot von tierischem Eiweiß für alle Nutztiere, die zum Zwecke der Lebensmittelherstellung gehalten, gemästet und gezüchtet werden⁹⁷. In einer Ausnahmeregelung wird die Verwendung von Fischmehl, sofern es unter strengen Auflagen produziert worden ist, zur Verfütterung an Nichtwiederkäuer zugelassen. In Deutschland wird im Verfütterungsverbotsgesetz, das seit dem 2.12.2000 gilt, das Verbot auf Fette warmblütiger Tiere ausgedehnt.

Tiergewebe, bei dem ein großes Risiko besteht, dass es Transmissible Spongiform Encephalopathies (TSE)-Erreger enthält, wird als spezifiziertes Risikomaterial (SRM) bezeichnet und ist bestimmten Maßnahmen zu unterziehen - diese Materialien sind getrennt zu sammeln und direkt oder nach einer Vorbehandlung zu verbrennen.⁹⁸

⁹⁶ Entscheidung 1999/534/EG über Maßnahmen zum Schutz gegen die transmissiblen spongiformen Enzephalopathien bei der Verarbeitung bestimmter tierischer Abfälle und zur Änderung der Entscheidung 97/735/EG der Kommission

⁹⁷ Entscheidung des Rates 2000/766/EG

⁹⁸ Verordnung (EG) Nr. 999/2001. vgl. zu den Regelungen: Europäische Kommission, Generaldirektion Gesundheit und Verbraucherschutz 2003: EUROPA - Lebensmittelsicherheit - Recht; http://europa.eu.int/comm/food/fs/bse/legislation_de.html#Chronologische%20Liste.

Ab 1. Mai 2003 ist die Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte in Kraft getreten. Nach der Verordnung werden die tierischen Nebenprodukte in Abhängigkeit vom potenziellen Risiko in drei Kategorien eingeteilt:

- Kategorie 1 beinhaltet Material mit dem höchsten Risiko, d.h. TSE, Scrapie oder Rückstände verbotener Stoffe, und muss vollständig als Abfall durch Verbrennung entsorgt werden.
- Kategorie 2 betrifft Material, das ein Risiko durch andere Krankheiten oder Rückstände von Tierarzneimitteln birgt und darf anderen Zwecken als der Futtermittelherstellung zugeführt werden.
- Kategorie 3 betrifft Material, das von für den menschlichen Verzehr geeigneten Tieren stammt und darf in die Futtermittelkette gelangen, wobei dieses Material gemäß den höchsten Verarbeitungsstandards (Drucksterilisation) in bestimmten Tierkörperbeseitigungseinrichtungen herzustellen ist. Die Verordnung untersagt eine Verwertung innerhalb derselben Tierart (EU 2003).

Die Verordnung erlaubt, das gegenwärtige umfassende Verbot in ein selektives Verbot abzuwandeln, wenn die ordnungsgemäße Umsetzung und die Anwendung der Vorschriften erfolgt sind (EU 2002).

Um eine Übereinstimmung auf internationaler Ebene zur Bestimmung des BSE Status zu erreichen und die wissenschaftlichen Abschätzungen zum BSE-Risiko abschließen zu können, hat die europäische Kommission dem Rat und dem Parlament vorgeschlagen, die Übergangsmaßnahmen zum Verfütterungsverbot bis zum 1. Juli 2005 um weitere zwei Jahre fortzuführen (Byrne 2003).

Durch die Hygienevorschriften wird festgelegt, dass in Biogasanlagen nur tierische Nebenprodukte der Kategorie 2 mit vorheriger Hygienisierung und der Kategorie 3 verarbeitet werden dürfen.

5.6.2 Künftige Stoffströme und Mengenentwicklung

Das Aufkommen der TBA-Produkte Tiermehl, Tierfett sowie Fleischbrei ist direkt abhängig von der Menge an Rohmaterial in Form von Tierkörpern und Tierkörperteilen, die der TBA zugeführt werden. Speisereste, die zu Flüssigfutter verarbeitet werden, sind nicht dem Rohmaterialaufkommen zugerechnet worden, wenn die Statistik diese getrennt ausgewiesen hat.

Der Anteil der Tierkörper stieg in den vergangenen Jahren aufgrund von Keulungsaktionen zur Seuchendezimierung an. Unter normalen Umständen kann davon ausgegangen werden, dass 14-15 % des Rohmaterialaufkommens Tierkörpern zuzurechnen sind.

Das Aufkommen an Rohmaterial kann anhand des Gesamtverbrauchs von Rind-, Kalb-, Schwein- und Geflügelfleisch abgeschätzt werden. Der Verbrauch beinhaltet den Nahrungsmittel- und Futterbedarf, die industrielle Verwertung und Verluste.

Tabelle 109 Entwicklung von Fleischverbrauch und Rohmaterialaufkommen der TB4

Daten in 1000 t	1990	1991	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Fleischverbrauch	7.345	7.032	6.996	6.931	6.879	6.811	7.060	7.155	6.923	6.794
Rohmaterialaufkommen	2.345	2.332	2.210	2.139	2.233	2.490	2.528	2.695	2.450	2.580
Anteil Rohmaterialaufkommen am Fleischverbrauch	32 %	33 %	32 %	31 %	32 %	37 %	36 %	38 %	35 %	38 %

Quellen: Kleinhanß 2000; BMVEL 2003, BMELF 1998 und 2000; Niemann 2001 und 2002

Probst (2001) stellt ab 1997 eine sprunghafte Zunahme der Relation zwischen Tierkörperteilen und der Nettoerzeugung von Fleisch fest, die sich auch in dem Vergleich zwischen Fleischverbrauch und dem gesamten Rohstoffaufkommen in der Tabelle oben wiederfindet.

Der Anstieg hängt nach Probst (2001) mit sinkenden Fleischausbeutesätzen zusammen, die u.a. durch schlechtere Ausschachtung und verschärfte hygienische Bedingungen erklärt werden. Seit 1997 bewegt sich das Verhältnis des Rohmaterialaufkommens zum Fleischverbrauch um 37 %. Da nicht angenommen wird, dass in den kommenden Jahren die Fleischausbeutesätze wieder zunehmen werden, wird für die Potenzialermittlung von einem Anteil des gesamten Rohmaterialaufkommens am Fleischverbrauch von 37 % ausgegangen.

Die folgende Tabelle zeigt die Abschätzungen bis zum Jahr 2030. Die Daten für den Fleischverbrauch entstammen Trendberechnungen aus dem Ernährungswendeprojekt.

Tabelle 110 Künftige Entwicklung des Rohmaterialaufkommens bis 2030

- Daten in 1.000 t -	2000	2010	2020	2030
Fleischverbrauch	6.961	7.069	7.114	7.010
Rohmaterialaufkommen (Tierkörper und Tierkörperteile)	2.576	2.616	2.632	2.594
SRM-Menge	773	758	790	778

Quelle: eigene Berechnungen

Für die Ermittlung des SRM-Rohstoffaufkommens wird auf die Statistik der Fleischmehlindustrie (Niemann 2001; 2003) zurückgegriffen, die im Durchschnitt 30 % des Rohmaterials als SRM ausweist. Kleinhanß (2000) geht theoretisch von insgesamt 20 % (14-15 % für gefallene Tiere und zusätzliche 5 % für sonstiges Risikomaterial) aus. Aufgrund der Mitverarbeitung von LRM ergibt sich jedoch real ein höherer SRM-Anteil.

Nach den Statistiken der Fleischmehlindustrie (Niemann 2001; 2002) liegt der Anteil von Tiermehl⁹⁹ am Rohmaterialaufkommen bei 26 %, für Tierfett beträgt der Anteil 12 %.

⁹⁹ Der Anteil Tiermehl beinhaltet auch Produkte, die in Spezialbetrieben erzeugt werden, z.B. Blut-, Feder-, Knochen- und Geflügelmehl.

Die folgende Tabelle zeigt die angenommene Entwicklung für die Produktion von Tiermehl, Tierfett sowie LRM-Fleischbrei auf. Bei dem Aufkommen an LRM-Fleischbrei handelt es sich um Material, das nach den Hygienevorschriften für die Vergärung eingesetzt werden könnte.

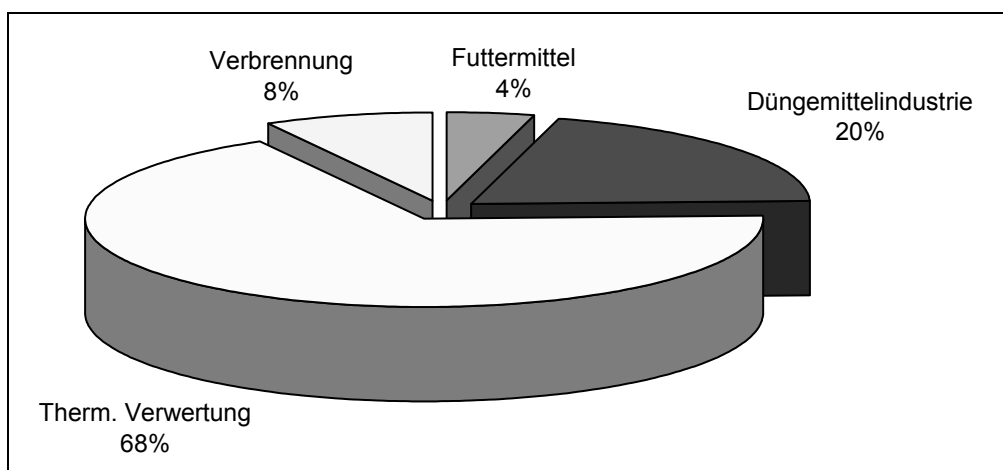
Tabelle 111 Künftige Entwicklung der Tiermehl/Tierfett- Produktion sowie alternativ Fleischbrei bis 2030

- Angaben in 1.000 t -	2000	2010	2020	2030
Tiermehl	670	680	684	674
Tierfett	309	314	316	311
LRM-Fleischbrei	1.803	1.831	1.842	1.816

5.6.3 Derzeitige Verwendung von Zoomasse

Aufgrund der BSE-Krise mit dem daraus entwickelten Verfütterungsverbot haben sich die Stoffströme ab 2000 neu strukturiert, da die Futtermittelindustrie als ein großer Absatzmarkt ausschied. 2001 wurden 70 % des Tiermehlaufkommens in der Zementindustrie thermisch verwertet und 24 % wurden verbrannt. 4 % des produzierten Tiermehls wurden zu Futtermitteln für die Heimtiernahrung verarbeitet und 2 % gingen in die Düngemittelindustrie. Im Jahr 2002 wandelte sich dies dahingehend, dass die Tiermehl-Stoffströme in die Düngemittelindustrie mit einem Anteil von 20 % stark zunahmen. Der Anteil der Stoffströme in die Futtermittelindustrie blieb unverändert bei 4 %, so dass 76 % energetisch verwertet wurden (vgl. folgendes Bild).

Bild 37 Verwertung von Tiermehl im Jahr 2002

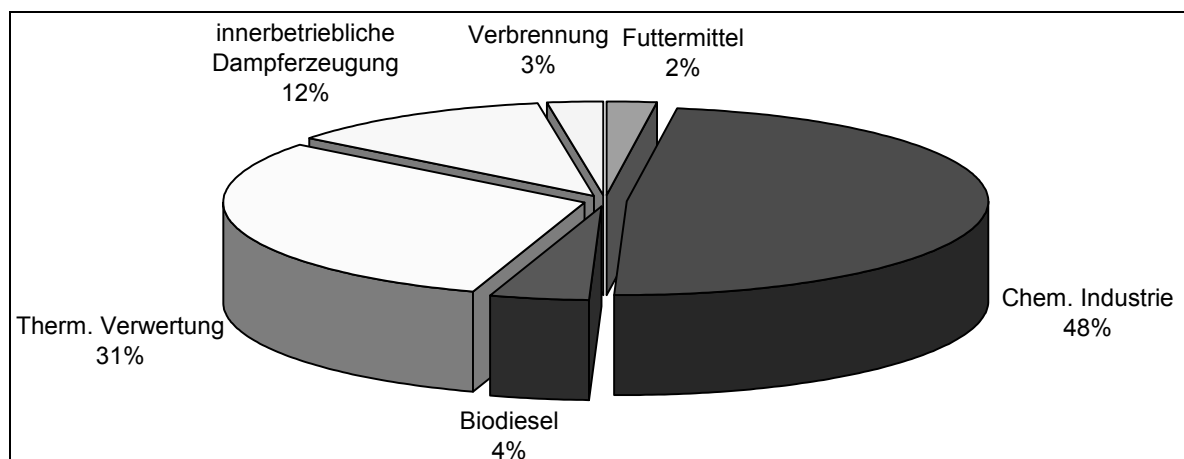


Quelle: Niemann (2003)

Vom erzeugten Tierfett wurden 2001 rund 59 % in der Chemischen Industrie im Bereich Fettchemie und 34 % wurden thermisch verwertet, z.B. zur innerbetrieblichen Dampferzeugung in den TBA. Ein weiteres Einsatzfeld war mit 4 % die Biodiesel-Produktion. Geringe Anteile gingen in die Futtermittelproduktion (2 %) und in die Verbrennung (1 %).

2002 wurde statistisch erstmals die innerbetriebliche Nutzung des Tierfettes zur Dampferzeugung in den TBA mit aufgeführt, die bei 12 % des produzierten Tierfettes lag. Weitere 30 % des Tierfettaufkommens wurden u.a. in der Zementindustrie thermisch verwertet. Verbrannt wurden 3 % und rund 50 % wurden in der Chemischen Industrie eingesetzt. Die Anteile, die in die Biodiesel- und Futtermittelproduktion gingen, lagen unverändert bei 4 % bzw. 2 % (vgl. folgende Abbildung).

Bild 38 Verwertung von Tierfett im Jahr 2002



Quelle: Niemann (2003)

5.6.4 Das Zoomassepotenzial in den Szenarien

Für die Potenzialbetrachtung in den Szenarien wird das Energieangebot zur energetischen Nutzung von Zoomasse auf Basis der Aufkommensdaten¹⁰⁰ und der Heizwerte berechnet. Die Vergärung von Fleischbrei wurde dabei *alternativ* zu den Produkten Tiermehl und Tierfett berücksichtigt¹⁰¹.

Für alle Szenarien werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Das Verfütterungsverbot bleibt bestehen. Dies bedeutet für *Tiermehl* unter Berücksichtigung der stofflichen Nutzung in der Düngemittel- und Heimtiefuttermittelindustrie eine Verfügbarkeit von ca. 75 % des Aufkommens für die energetische Verwertung.
- Der Absatzmarkt im Bereich der Chemischen Industrie für *Tierfett* wird mit 50 % der Tierfett-Produktionsmenge angenommen. Da Tierfett bereits als ein preisgünstiger Rohstoff in der Oleochemie gilt und die Verwertungsmöglichkeiten aufgrund der Qualitätsanforderungen eingeschränkt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Absatzpotenziale in der Chemischen Industrie wahrscheinlich größtenteils ausgeschöpft sind.
- Für die innerbetriebliche Dampferzeugung in den TBA wird ab 2010 ein Wert von 12 % des Tierfettaufkommens angesetzt.

¹⁰⁰ Die Aufkommensdaten in den Szenarien wurden aus HEKTOR entnommen.

¹⁰¹ Der alternative Einsatz von Fleischbrei als Kosubstrat für die Biogasgewinnung senkt das energetische Potenzial, da nur Teile des Heizwerts genutzt werden können. Über die entsprechende Nutzung wird in den Szenarien aufgrund der Technologieauswahl entschieden.

Die folgende Tabelle fasst die Potenziale zur energetischen Nutzung von Zoomasse in den Szenarien zusammen.

Tabelle 112 Potenziale zur energetischen Nutzung von Zoomasse in den Szenarien

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Tiermehl	9,6	9,8	9,8	9,7
Tierfett	5,7	4,4	4,4	4,3
<i>alternativ: Fleischbrei*</i>	0	3,2	3,2	3,2

* = Annahme, das Fleischbrei aus LRM als Kosubstrat in Biogasanlagen eingesetzt wird; unter Berücksichtigung der Nutzungskonkurrenz von LRM durch die Produktion von Tierfett für die chemische Industrie und für die Biodieselherzeugung.

5.7 Flächenpotenziale zum Anbau von Energiepflanzen

Neben Biomasse aus Reststoffen und Nebenprodukten der Land-, Forst- und Abfallwirtschaft liegt im Energiepflanzenanbau auf nicht mehr landwirtschaftlich genutzten Flächen ein weiteres Potenzial zur Energiegewinnung aus Biomasse. Um dieses Potenzial abzuschätzen, muss zunächst ermittelt werden, in welchem Umfang und in welcher Art landwirtschaftliche Nutzflächen in Zukunft zur Verfügung stehen können.

Hierfür dient das Teilmodell HEKTOR, das die grundlegenden Szenario-Daten enthält (u.a. Bevölkerungsentwicklung, Nahrungsmittelkonsum pro Kopf, Selbstversorgungsgrade, Futtermittelbedarfe, Flächenverwendung, Flächenerträge) und daraus den Flächenbedarf der Landwirtschaft in den Szenarien ermittelt¹⁰².

Es wird davon ausgegangen dass bei der landwirtschaftlichen Flächennutzung in Deutschland auch in Zukunft die *Nahrungsmittelproduktion im Vordergrund* stehen wird. Somit kann der Anbau von Energiepflanzen auf den Flächen stattfinden, die aufgrund fehlender Konkurrenzfähigkeit nicht mehr für die Produktion von Nahrungsmitteln genutzt werden¹⁰³.

Aus der Differenz zwischen vorhandener landwirtschaftlicher Nutzfläche (wobei hier nur Ackerkulturen und Grünland betrachtet werden) und dem Flächenbedarf für „klassische“ landwirtschaftliche Produkte ergibt sich die für Biomasseanbau verfügbare Fläche. Zusätzlich wird der Verbrauch von Fläche durch andere Nutzungen berücksichtigt (Verkehrs-, Siedlungs- und Gewerbefläche).

Die wichtigsten Faktoren innerhalb der Landwirtschaft

Dem Modell HEKTOR liegt eine Vielzahl von Annahmen zur Zukunft der Landwirtschaft zugrunde, die an dieser Stelle nicht im einzelnen erläutert werden sollen, da sie für die Ermittlung der Flächenpotenziale nur als Zwischenergebnisse verwendet werden. Mit Hilfe der umfangreichen Modell- und Datendokumentation zu HEKTOR (ÖKO/TUM 2003) lassen sich die Zahlen nachvollziehen.

Hier werden lediglich die wichtigsten, flächenrelevanten Annahmen zur Landwirtschaft vorgestellt:

- Unter der Annahme steigender *Erträge* und szenariospezifischer Entwicklung der Selbstversorgungsgrade für Nahrungsmittel ist für das Gros der Produkte der Flächenbedarf für die Nahrungsmittelproduktion rückläufig.
- Ein weiterer Faktor ist der *Anteil ökologischer Landwirtschaft*, die mit geringeren Erträgen einen größeren Flächenbedarf pro Produktionseinheit aufweist. Zwischen dem Referenz- und allen weiteren Szenarien unterscheidet sich der Anteil ökologischer Landwirtschaft deutlich (siehe Kapitel 5.7.1).

¹⁰² Vgl. Modell- und Datendokumentation zu HEKTOR (ÖKO/TUM 2003), die sich im Anhangband (vgl. beigelegte CDROM) findet.

¹⁰³ Dies ist eine Vereinfachung für HEKTOR, da Landwirte je nach ökonomischen Rahmenbedingungen (Agrarmärkte, Subventionsart und -höhe, Pacht, Bodengüte) die Bewirtschaftungsform entscheiden. Eine detailliertere (ökonomische) Modellierung würde den Rahmen des Projekts sprengen.

Da HEKTOR die „freiwerdenden“ Flächen in Grünland und Acker differenziert, ist der Anteil grünlandbasierter *Milchwirtschaft und Rinderhaltung* eine weitere wichtige Kenngröße. In den Szenarien führt ein Zuwachs ökologischer Landwirtschaft zu einer Verschiebung hin zur verstärkten Grünlandnutzung.

Externe Faktoren

Als externe Faktoren werden alle Einflussgrößen bezeichnet, die nicht direkt mit der landwirtschaftlichen Produktion zusammenhängen.

Nachfrage nach landwirtschaftlichen Gütern

Durch die sinkende *Bevölkerung* und steigende Erträge in der Landwirtschaft sinkt die Inlandsnachfrage nach Flächen für die Erzeugung von Lebensmitteln; auf europäischer Ebene läuft die Entwicklung parallel. Insofern könnte über ein Teil der Flächen neu verfügt werden, je nach dem wie sich die Agrarmärkte entwickeln.

Tabelle 113 Bevölkerungsentwicklung in Deutschland bis 2030

Jahr	2000	2010	2020	2030
Bevölkerungsgröße [Mio.]	82,2	82,1	80,8	77,9

Quelle: Enquete (2002)

Für die Abbildung der Veränderungen auf den Agrarmärkten, wie sie z.B. durch die Reformen der EU-Agrarpolitik oder durch Preisveränderungen zu erwarten sind, wurden die *Selbstversorgungsgrade*¹⁰⁴ als Stellvertretergröße eingeführt. Die Marktentwicklungen wirken sich direkt auf die Flächennutzung aus und sind damit szenariorelevant.

Hierzu sind ebenfalls detailliertere Erläuterungen in der Modell- und Datendokumentation zu HEKTOR zu finden (ÖKO/TUM 2003).

Flächenverbrauch

Eine weitere zentrale Größe ist der gesamte *Flächenverbrauch* außerhalb der Landwirtschaft. Dieser stieg in der Vergangenheit kontinuierlich und erreichte bis Ende der 90er Jahre einen Wert von etwa 130 ha pro Tag. Seit 2000 liegt er bei ca. 125 ha/d. Die Bundesregierung hat in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie das Ziel gesetzt, den Flächenverbrauch bis 2020 auf 30 ha/d zu reduzieren (Bundesregierung 2002).

Offen ist, in welchem Verhältnis Acker, Grünland und Wald künftig umgewandelt werden. Für die Rechnungen wurde angenommen, dass Ackerland zu 70 % und Grünland zu 30 % betroffen sind – gemäß ihrer jetzigen Verteilung.

¹⁰⁴ Die Annahme verschiedener Selbstversorgungsgrade spiegelt nicht das etwaige Ziel einer Selbstversorgung wieder (normativer Ansatz), sondern wurde als eine einfache Stellschraube gewählt, die die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Landwirtschaft je nach Produkt darstellt (quasi im Sinne eines „prognostischen“ Ansatzes).

Die Größe der Waldflächen wird insgesamt konstant gehalten (Statistisches Bundesamt Deutschland 2003). Da nach Bundeswaldgesetz Waldflächenverluste zu 100 % der *Kompensationspflicht* unterliegen, bleibt die Gesamtfläche konstant.

Auch der Verlust von Acker- und Grünlandflächen muss aufgrund von Verpflichtungen aus dem Bundesnaturschutzgesetz kompensiert werden. Im Schnitt sind die durch Siedlungs- und Verkehrsflächen in Anspruch genommenen Flächen zu etwa zwei Drittel ausgleichspflichtig. Von dieser Fläche kann etwa ein Drittel bereits über den Bebauungsplan inner halb der Siedlungs- und Verkehrsflächen ausgeglichen werden (z.B. durch Gärten und Grünanlagen). Entsprechend ihres unterschiedlichen ökologischen Werts muss Ackerland im Flächenverhältnis von 1:0,5 und Grünland im Flächenverhältnis von 1:1 kompensiert werden.

Tabelle 114 Kompensationsregelung für Acker und Grünland

	Ausgleichs- pflchtig	Ausgleich im B-Plan	Ausgleichs- schlüssel	Tatsächlicher Ausgleich
Grünland	2/3	2/3	1:1	44 %
Ackerland	2/3	2/3	1:0,5	22 %

Quelle: TUB (2004)

Flächenansprüche des Naturschutzes

Die Differenzierung der Standorte nach ihrer Bodenfruchtbarkeit führt dazu, dass in einigen Gebieten die Bewirtschaftungsintensität ungebrochen ist während andere Standorte aus der Nutzung fallen (IfLS 2002). Doch darf aus Umwelt- und Naturschutzsicht dieses nicht zu einer Unterteilung der Landschaft in „Schutz- und Schmutzgebieten“ führen. Daher beziehen sich viele Naturschutzziele auf die flächendeckende Biotopvernetzung, wie sie u.a. auch im Bundesnaturschutzgesetz und im Natura 2000-Programm der EU festgeschrieben sind. Die dafür zusätzlich erforderlichen Naturschutzflächen müssen bei der Ermittlung des Flächenpotenzials als Abschläge berücksichtigt werden.

Die naturschutzrechtlich für den Flächenverbrauch geforderten Kompensationsflächen dürfen hierfür nicht angerechnet werden, da sie vorherige Verluste naturnaher Flächen ausgleichen müssen.

Das begleitende Vorhaben der TU Berlin „Integration naturschutzfachlicher Ziele in Szenarien und Modellen zur energetischen Nutzung von Biomasse“ untersucht, inwiefern unerfüllte Naturschutzziele als Forderungen auf die heutige Agrarfläche übersetzt werden müssen. Die Ergebnisse gingen in die Ermittlung des Flächenpotenzials ein, sind jedoch hier nicht mehr im Einzelnen dargestellt¹⁰⁵. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den Flächenanforderungen.

¹⁰⁵ Zu den Details siehe TUB (2004).

Tabelle 115 Flächenanforderungen des Naturschutzes

Naturschutzbezogene Flächenforderung: Acker	
Ökologische Dauerbrache	2%
Strukturelemente (Hecken, Saum- und Randstrukturen)	3%
Umwandlung in Grünland	2%
Summe	7%
<i>Erosionsschutz (nur mehrjährige Energiepflanzen)</i>	5%
Naturschutzbezogene Flächenforderung: Grünland	
Strukturelemente (Hecken, Saum- und Randstrukturen)	2%
Extensives Grünland	20%
Summe	7% (2% Strukturelemente + 5% aus extensivem Grünland mit Vorrangziel Naturschutz)

Quelle: TUB (2004)

Das Ziel „Sicherung extensiver Grünländer in Höhe von 20 % der gesamten Grünlandfläche“ entspricht etwa 1 Mio. Hektar. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Rahmen des Projekts *nicht* die entsprechenden Flächen als Naturschutzfläche aus der landwirtschaftlichen Nutzung gezogen, sondern die extensive Nutzung wird *zur Hälfte* über die Pferde- und Schafhaltung gesichert und ist in HEKTOR über den gesamten Untersuchungszeitraum bis 2030 gesichert.

Die 2. Hälfte wird durch die *heute bestehende* Fläche für die Mutterkuhhaltung geliefert. Diese Fläche geht nicht in HEKTOR ein, da deren Zukunft ungewiss¹⁰⁶ ist. Somit ist die Fläche außerhalb der Modelle nur allgemein für die Sicherung extensiver Grünlands vorgesehen, entweder über die Mutterkuhhaltung oder direkt als Naturschutzfläche. Sie fällt daher aus der Betrachtung des Potenzials vollständig heraus (also auch aus dem Potenzial für Grünschnitt).

Die Naturschutzziele werden auf die Acker- und Grünlandflächen bezogen, mit denen HEKTOR im Basisjahr 2000 rechnet. Dabei kommt es zwar zu einer Abweichung gegenüber der Statistik, doch liegt diese im Rahmen der für HEKTOR festgelegten Fehlertoleranz von 10 %.

¹⁰⁶ Die Mutterkuhhaltung hat sich bisher nur in dem Maße entwickelt, in dem sie auch durch Prämien gefördert wurde. Diese spezielle Förderung wird jedoch bei einer vollständigen Entkopplung innerhalb der anstehenden EU-Agrarreform abgeschafft (vgl. ÖKO/TUM 2003).

Tabelle 116 Acker- Grünlandflächen in HEKTOR und in der Statistik im Vergleich, jeweils im Basisjahr 2000 (Bezugsgröße für die Naturschutzziele)

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Acker
HEKTOR-2000	15,78	4,75	11,03
Statistik-2000	16,83	5,01	11,82
HEKTOR in % von Statistik	93,8 %	94,8 %	93,3 %

Quelle: eigene Daten und BMVEL 2001

Für einige Acker-Standorte sind Erosionsschutzmaßnahmen nötig, die eine Bewirtschaftung mit annuellen Kulturen ausschließen. Auf den entsprechenden Flächen kann daher zwar Energiepflanzenanbau stattfinden, doch nur der mehrjähriger Pflanzen.

5.7.1 Anbauflächenpotenziale in den Szenarien

In den Szenarien werden verschiedene wichtige Einflussfaktoren auf die Anbauflächenpotenziale variiert. Daher werden diese in den jeweiligen Unterkapiteln zu den Szenarien einzeln dargestellt.

Allgemein wird das Potenzial für Anbauflächen wie folgt ermittelt: Im ersten Schritt werden die Flächensalden zwischen dem jeweiligen Stützzeitpunkt und dem Basisjahr 2000 angegeben und danach die Flächenverluste abgezogen.

Für das gesamte Flächenpotenzial werden zu den Flächensalden noch die Stilllegungsflächen (abzüglich ökologischer Brache) aus dem Jahr 2000 für alle Stützzeitpunkte addiert, das sind 1,13 Mio. ha. Dieser Schritt erfolgt in allen Szenarien. Die Stilllegungsfläche umfasst Ackerland¹⁰⁷ und wird daher den „freien“ Ackerflächen zugeschlagen.

Schließlich muss noch der Flächenbedarf für Siedlung und Verkehr samt Kompensation abgezogen werden, sowie die Forderungen des Naturschutzes.

5.7.2 Ermittlung des Anbauflächenpotenzials im Referenzszenario

Das Referenzszenario basiert auf der *Trendfortschreibung* für sämtliche landwirtschaftsinternen Faktoren.

Flächensalden aus der Landwirtschaft im Referenzszenario

Die Selbstversorgung für Rindfleisch wird bis 2030 auf 102 % reduziert, da hier die EU bereits in der Vergangenheit das Ziel verfolgte, die Produktionsmengen zu senken. Für Milch wurde ein Wegfall der Quote ab 2015 abgenommen, mit der Folge eines moderaten Anstiegs der Produktionsmenge.

¹⁰⁷ Die für obligatorische Stilllegung, für die von der EU Ausgleichszahlungen gewährt werden entspricht 10% der gesamten prämienberechtigten Fläche (derzeit nur Ackerkulturen).

Der Anteil ökologischer Landwirtschaft beträgt im Jahr 2030 im Pflanzenbau und in der Milchwirtschaft 10 %, 20 % für Rindfleisch, 3 % für Schweinefleisch und 15 % für Eier. Für Geflügelfleisch werden die Haltungssysteme nicht variiert, da sich die Mastsysteme in der Flächeninanspruchnahme kaum unterscheiden.

Damit ergeben sich die folgenden Flächensalden gegenüber dem Jahr 2000 für die HEKTOR-Rechnungen (siehe Tabelle 117).

Tabelle 117 Flächensalden im Referenz-Szenario

in Mio. ha	Insgesamt	Grünland	Ackerland	Acker in %
Referenz-2010	1,83	0,46	1,37	75%
Referenz-2020	3,08	0,69	2,39	78%
Referenz-2030	4,25	1,08	3,17	75%

Flächenverbrauch im Referenzszenario

Der sonstige Flächenverbrauch wird bis 2010 als konstant angenommen (d.h. mit 130 ha/d) und danach aufgrund der Bevölkerungsentwicklung bis 2020 auf 100 ha/d und bis 2030 auf 65 ha/d herabgesetzt.

Tabelle 118 Kumulierter Flächenverbrauch und Flächenbedarf für Ausgleich im Referenz-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland
Referenz-2010	0,61	0,21	0,41
Referenz-2020	1,08	0,36	0,72
Referenz-2030	1,39	0,47	0,92

Naturschutz im Referenzszenario

Die Naturschutzziele beziehen sich z.B. auf die Schaffung von Strukturelementen, Brachen sowie auf die Umwandlung eines Teils Acker in Grünland. Durch diese Umwandlung entsteht ein negativer Flächenbedarf bei Grünland, d.h. es wird nicht vom heutigen Grünland Fläche für den Naturschutz benötigt, sondern es kommen weitere Grünlandflächen zum heute bestehenden Grünland hinzu. Beim gesamten Flächenbedarf muss daher der Flächenbedarf aus Acker angegeben werden, denn der Zuwachs beim Grünland resultiert schließlich aus dem Ackerland.

Die Naturschutzziele werden im Jahr 2010 zu 50 % und ab 2020 vollständig erfüllt.

Tabelle 119 Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Referenz-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland
Referenz-2010	0,39	-0,06	0,39
Referenz-2020	0,77	-0,13	0,77
Referenz-2030	0,77	-0,13	0,77

Potenzial für Anbauflächen im Referenz-Szenario

Aus den HEKTOR-Salden abzüglich des Flächenverbrauchs und der Naturschutzforderungen ergibt sich schließlich das Potenzial für den Energiepflanzenanbau.

Tabelle 120 Anbauflächenpotenzial im Referenz-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Acker	Acker in %	davon für mehrjährige Energiepflanzen
Referenz-2010	2,03	0,32	1,72	84%	0,28
Referenz-2020	2,48	0,45	2,03	82%	0,55
Referenz-2030	3,48	0,86	2,61	75%	0,55

5.7.3 Anbauflächenpotenzial im Umwelt-Szenario

Im Umwelt-Szenario wird eine aktive Nachhaltigkeitspolitik verfolgt, die deutlich über die Referenz hinaus geht – dies ändert auch die landwirtschaftsinternen Faktoren.

Flächensalden aus der Landwirtschaft im Umwelt-Szenario

Die Selbstversorgungsquoten für alle Lebensmittel werden wie in Referenz angesetzt. Für das Umweltszenario wird angenommen, dass die Agrarwende umgesetzt wird und damit der Anteil ökologischer Landwirtschaft bis 2010 auf 20 % steigt. Bis 2020 wirtschaften dann 25 % und in 2030 schließlich 30 % der Betriebe nach den Kriterien des ökologischen Landbaus. Die Prozentanteile sind für alle Produkte gleich, auch wenn das in einigen Bereichen nicht den realen Erwartungen entspricht (z.B. in der Schweinehaltung).

Tabelle 121 Flächensalden im Umwelt-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland	Acker in %
Umwelt-2010	0,61	0,09	0,52	85%
Umwelt-2020	1,82	0,25	1,57	86%
Umwelt-2030	2,94	0,56	2,39	81%

Flächenverbrauch im Umwelt-Szenario

Auch der Flächenverbrauch wird im Umwelt-Szenario geringer gewählt als im Referenzszenario: Bis 2010 wird der tägliche Flächenverbrauch von heute auf etwa 60 ha halbiert und bis 2020 soll das Nachhaltigkeitsziel von 30 ha pro Tag erreicht sein. Anschließend wird bis 2030 der zusätzliche Flächenverbrauch bis auf Null gesenkt¹⁰⁸, das heißt dass der Neubau nur noch auf recycelten Flächen stattfindet.

Tabelle 122 Kumulierter Flächenverbrauch im Umwelt-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland
Umwelt-2010	0,28	0,09	0,19
Umwelt-2020	0,42	0,14	0,28
Umwelt-2030	0,42	0,14	0,28

Naturschutz im Umwelt-Szenario

Die Naturschutzziele werden im Gegensatz zum Referenzszenario bereits im Jahr 2010 zu 100 % - also vollständig - erfüllt.

Tabelle 123 Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Umwelt-Szenario (wie Referenz)

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland
Umwelt-2010	0,77	-0,13	0,77
Umwelt -2020	0,77	-0,13	0,77
Umwelt -2030	0,77	-0,13	0,77

Potenzial für Anbauflächen im Umwelt-Szenario

Aus den HEKTOR-Salden abzüglich des Flächenverbrauchs und der Naturschutzforderungen ergibt sich schließlich das Potenzial für den Energiepflanzenanbau.

¹⁰⁸ Begründung: Flächenverbrauch im Umwelt-Szenario - Siedlungsentwicklung nimmt ab, zusätzlicher Anbau NaWaRo = Null (im „Nachhaltigen Bauen“-Szenario wird nicht mehr Biomasse *stofflich* eingesetzt als im Referenz-Szenario zum „Bauen und Wohnen“, da anders (Material, Gebäudetyp). aber v.a. *weniger* gebaut wird (siehe ÖKO/IÖR 2004). Zur Mobilität siehe U-BA/ÖKO 2001/2002.

Tabelle 124 *Anbauflächenpotenzial im Umwelt-Szenario*

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Acker	Acker in %	davon für mehrjährige Energiepflanzen
Umwelt-2010	0,82	0,12	0,70	85%	0,55
Umwelt -2020	1,88	0,24	1,65	88%	0,55
Umwelt -2030	3,01	0,54	2,47	82%	0,55

5.7.4 Anbauflächenpotenzial im Biomasse-Szenario

Das Biomasse-Szenario baut auf dem Umwelt-Szenario auf, doch werden einige Faktoren dahingehend geändert, dass der Biomasseertrag gesteigert wird.

Flächensalden aus der Landwirtschaft im Biomasse-Szenario

Um Anbauflächen für die Biomasseproduktion „freizusetzen“ werden die Selbstversorgungsgrade für landwirtschaftliche Produkte ab 2020 auf maximal 100 % festgelegt. Davon sind insbesondere der Getreideanbau und der Anbau von Zuckerrüben betroffen, ebenso die Milch- und Rindfleischproduktion. Doch wird für letztere bereits in den anderen Szenarien davon ausgegangen, dass die Produktionsmengen respektive die Selbstversorgungsgrade in Folge der EU-Agrarreform sinken.

Außerdem unterscheiden sich einige Aspekte der Biomasse-Reststoffnutzung (z.B. Gülle, siehe jeweiligen Kapitel) und der möglichen „Belegung“ der Anbauflächen, um den Energieertrag zu optimieren.

Tabelle 125 *Flächensalden 2000 bis 2030 im Biomasse-Szenario*

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland	Acker in %
Biomasse-2010	1,28	0,09	1,19	93 %
Biomasse-2020	3,06	0,27	2,79	91 %
Biomasse-2030	4,05	0,58	3,47	86 %

Flächenverbrauch im Biomasse-Szenario

Der Flächenverbrauch ist im Biomasse-Szenario genauso wie im Umwelt-Szenario angesetzt (s.o.).

Naturschutz im Biomasse-Szenario

Im Biomasse-Szenario werden die Naturschutzziele gegenüber den anderen Szenarien auf 50 % reduziert. Auf diese Weise sind zwar noch die europäischen Natura 2000-Anforderungen erfüllt, aber bei dem Ziel der 10 %-Verbundfläche werden Abstriche zugunsten der Biomasseproduktion gemacht. Im Jahr 2010 werden sie also zu 25 % und ab 2020 zu 50 % erfüllt.

Tabelle 126 Kumulierter Flächenbedarf für den Naturschutz im Biomasse-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Ackerland
Biomasse-2010	0,20	-0,03	0,20
Biomasse-2020	0,39	-0,07	0,39
Biomasse-2030	0,39	-0,07	0,39

Potenzial für Anbauflächen im Biomasse-Szenario

Aus den HEKTOR-Salden abzüglich des Flächenverbrauchs und der Naturschutzforderungen ergibt sich schließlich das Potenzial für den Energiepflanzenanbau.

Tabelle 127 Anbauflächenpotenzial im Biomasse-Szenario

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Acker	Acker in %	davon für mehrjährige Energiepflanzen
Biomasse-2010	1,97	0,03	1,94	99 %	0,14
Biomasse-2020	3,45	0,19	3,26	95 %	0,22
Biomasse-2030	4,44	0,50	3,94	89 %	0,22

5.7.5 Übersicht über die Ergebnisse im Vergleich

Je nach Szenario liegen die Anbauflächen, die bis ins Jahr 2030 zur Verfügung stehen könnten zwischen 2,47 und 3,94 Mio. Hektar¹⁰⁹. Die Umsetzung der Agrarwende im Umwelt- und Biomasse-Szenario zeigt sich am deutlichsten an der Verteilung zwischen Grünland und Acker, denn die ökologische Landwirtschaft nutzt für die Milchkuh- und Rinderhaltung verstärkt das Grünland als Futterbasis. Der Mehrbedarf an Fläche wird im Biomasse-Szenario durch die sinkenden Selbstversorgungsgrade und damit sinkende Produktion kompensiert.

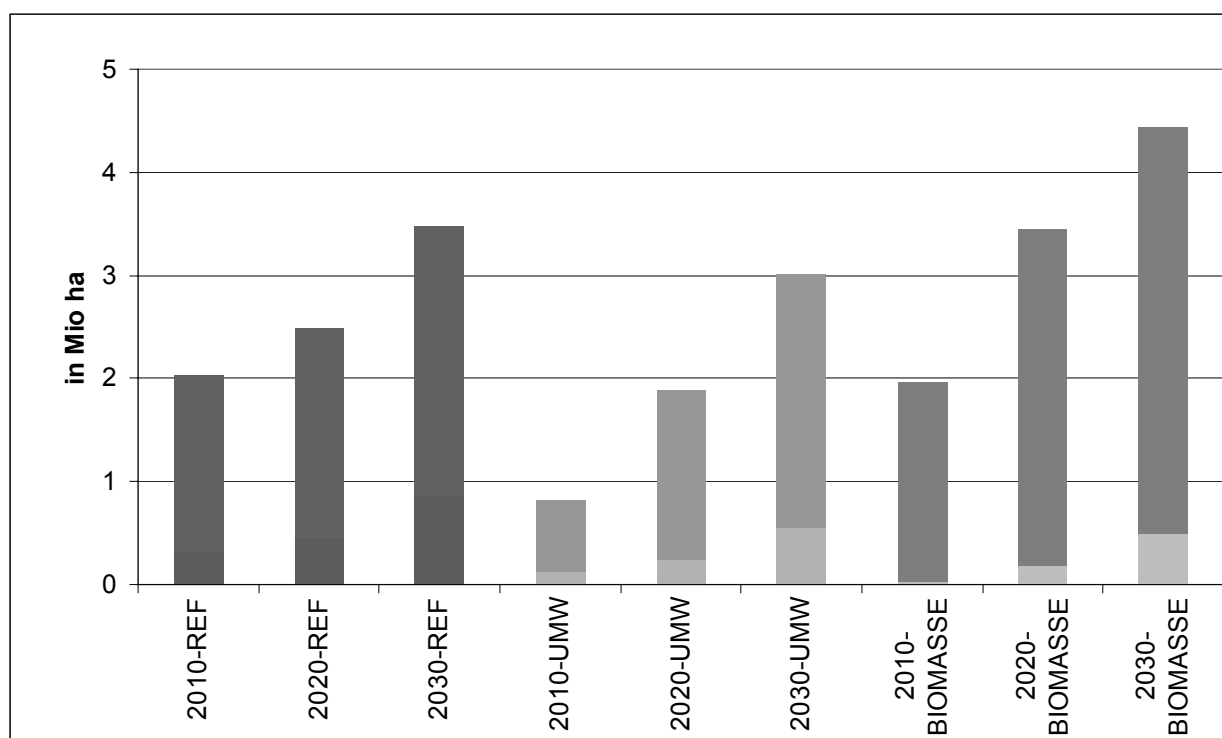
¹⁰⁹ Die Annahmen zur Milchleistung, zum Selbstversorgungsgrad für Geflügel und zum Schweinefleischverbrauch wurden im Rahmen einer „kleinen“ Sensitivitätsanalyse variiert. Dabei schwanken die HEKTOR-Salden nur um etwa 100.000 ha. Weitere Variationen wurden zur möglichen Extensivierung infolge der Entkopplung vorgenommen. Diese Daten betreffen jedoch nur das Referenz-Szenario, indem keine nennenswerte Nachfrage nach Biomasse unterstellt ist. Näheres siehe in der Dokumentation zu HEKTOR (ÖKO/TUM 2003).

Tabelle 128 Anbauflächenpotenziale nach Jahren in allen Szenarien im Vergleich

in Mio. ha	insgesamt	Grünland	Acker	davon Acker	davon Mehrjährige
Referenz-2010	2,03	0,32	1,72	84%	0,28
Umwelt-2010	0,82	0,12	0,70	85%	0,55
Biomasse-2010	1,97	0,03	1,94	99%	0,14
Referenz-2020	2,48	0,45	2,03	82%	0,55
Umwelt-2020	1,88	0,24	1,65	88%	0,55
Biomasse-2020	3,45	0,19	3,26	95%	0,22
Referenz-2030	3,48	0,86	2,61	75%	0,55
Umwelt-2030	3,01	0,54	2,47	82%	0,55
Biomasse-2030	4,44	0,50	3,94	89%	0,22

Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse nochmals im Überblick.

Bild 39 Anbauflächenpotenziale in den Szenarien



Bisher wird das Flächenpotenzial für Energiepflanzenanbau in Deutschland auf 2 Mio. Hektar geschätzt (Hartmann/Kaltschmitt 2003). Dieser Wert entspricht dem Wert für das Referenzszenario im Jahr 2010 mit 2,03 Mio. Hektar. Für das Literaturdatum gilt genauso wie für das Referenzszenario zum entsprechenden Zeitpunkt, dass die Bevölkerung etwa so groß wie die heutige ist und die Landbausysteme etwa gleich bleiben.

5.8 Energetische Biomassepotenziale aus der Landschaftspflege

Das Biomassepotenzial aus der Landschaftspflege unterteilt sich in Landschaftspflegereste, die von Naturschutzflächen stammen, und in Grünschnitt aus der Landwirtschaft, wobei hier nur die Flächen betrachtet werden, die gemäß des HEKTOR vom Basisjahr 2000 bis ins Zieljahr 2030 „freigesetzt“ werden.

5.8.1 Biomassepotenziale aus Grünschnitt in der Landwirtschaft

Ein Ergebnis aus den Szenario-Annahmen zur Landwirtschaft ist die aufgrund der geänderten Nachfrage- und Angebotsverhältnisse „freiwerdende“ Fläche an Grünland. Hier kann z.B. Biogas durch die energetische Nutzung von Grünschnitt gewonnen werden. Von 17 Mio. Hektar (ha) landwirtschaftlich genutzter Fläche in Deutschland entfallen derzeit 29 % auf Wiesen und Viehweiden. Etwa 4,1 Mio. ha davon sind in der Statistik als Dauergrünland ausgewiesen. Dies dient vorwiegend als Futtergrundlage für Rinder, die mit 10,5 Mio. Großvieheinheiten (GV) den Hauptanteil an der Grünlandnutzung tragen, während der Grünlandbedarf von Pferden und Schafen mit insgesamt ca. 600.000 GV eine untergeordnete Rolle spielt (BMVEL 2003).

Der Dauergrünlandbedarf in der Rinderhaltung ist in den letzten Jahren stetig gesunken, was auf einen sinkenden Rinderbestand sowie Entwicklungen in der Fütterung zurückgeht. Die wachsende Milchleistung bei gleichzeitig feststehender Milchquote führt zu einem schrumpfenden Milchkuhbestand, während die sinkende Nachfrage nach Rindfleisch einen geringeren Mastrinderbestand bedingt. Die stetige Milchleistungssteigerung erfordert zudem eine veränderte Futtergrundlage mit verstärktem Einsatz von energie- und eiweißreichen Futtermitteln (Flachowsky/Lebzien u.a. 2002), daher verlagert sich die Futterproduktion immer mehr von Grünland hin zum Ackerland (Knickel 2001).

Diese Trends scheinen ungebrochen, darüber hinaus gehen Berechnungen zu den Auswirkungen zukünftiger Politikgestaltung auf Europäischer Ebene ebenfalls von einer zukünftig sinkenden Grünlandnutzung aus (Kreins/Gömann u.a. 2002). Diese Entwicklungen setzen daher Grünlandflächen frei, deren Schnittgut zukünftig zur Energieerzeugung bereitgestellt werden kann.

Ertragspotenzial

In Anbetracht der ständig steigenden Anforderungen an Energie und Eiweißgehalt für die Rinderfütterung werden vorwiegend Flächen aus der Nutzung fallen, die ein geringes Ertragspotenzial aufweisen und mindere Futterqualitäten liefern. Laut Hoffmann (2002) und LBA (1997) liefert extensives Grünland einen Ertrag von weniger als 6 Tonnen (t) Trockensubstanz (TS) pro ha bei ein bis zwei Schnittnutzungen pro Jahr. Langzeitversuche zum Ertragspotenzial von nicht mehr gedüngtem Grünland zeigten außerdem über zehn Jahre Ertragsrückgänge von 0-33 % (Schiefer 1984). Bei reinen Landschaftspflegeflächen kann aus Umwelt- und Naturschutzgründen nur ein geringerer Ertrag erzielt werden. Auf nährstoffarmen Böden, Feuchtwiesen und in Höhenlagen oder bei Auflagen zur Schnitthöhe fallen nach Hartmann und Strehler (1995) jährlich nur zwischen 2,5 und 4 t/ha TS Grüngut an. Dies bestätigen Ergebnisse von Schmid, Troxler et al.(1989), die auf ungedüngten Magerwiesen durchschnittlich 3 t/ha*a und auf schwach gedüngten Flächen etwa 5 t/ha*a ernteten.

Nutzungsalternativen für Grünschnitt

Technisch möglich ist eine Nutzungsänderung, bei der Teile der Fläche umgebrochen und in Acker umgewandelt werden. Ebenso könnte die Dauergrünlandfläche in Zukunft für Kurzumtriebsplantagen genutzt werden.

Für eine Erhaltung des extensiven Dauergrünlands spricht allerdings dessen hoher ökologischer Wert. Auf Wiesen mit mittleren Standortbedingungen sind besonders viele Arten zu finden und extreme Standorte bieten Lebensraum für viele seltene Spezies (Thomet/Schmid u.a. 1989; Briemle 1990).

Im Hinblick auf Boden- und Gewässerschutz bietet Grünland außerdem Vorteile gegenüber Acker, etwa durch eine geringere Nitratauswaschung (Briemle 1990). Auch im Agrarbericht der Bundesregierung sind Grünlandumbruch und -intensivierung als Gründe einer erhöhten Nährstoffauswaschung und des Verlusts von biologischer Vielfalt genannt (BMVEL 2003).

Im Rahmen eines Expertenworkshops innerhalb des Biomasseprojekts (ÖKO 2003) wurde daher der Erhalt der Grünlandstandorte als wünschenswert erachtet. Darüber hinaus fordern auch Umweltverbände (NABU 1999) und Politik (Agra-Europe 2003; Agra-Europe 2003) Grünlanderhalt als politisches Ziel. Zwar wäre aus Naturschutzsicht ein Anbau von mehrjährigen Energiepflanzen auf 10 % der Grünlandflächen möglich, insbesondere an intensiven Standorten (TUB 2003+IFUE/IUS 2003). Diese Flächen werden in den Projektszenarien allerdings zu einem großen Teil durch die ökologische Rinder- und Milchviehhaltung nachgefragt. Aufgrund der hohen Wertschätzung von Dauergrünland genießt dieses in diesem Projekt daher Bestandsschutz und darf entsprechend nicht zu Ackerland umgebrochen werden.

Soll Grünland aus Umweltschutzgründen und zur Erhaltung der Kulturlandschaft im bisherigen Umfang bestehen bleiben, so konkurrieren extensive Beweidung mit der Nutzung des Grünschnitts als Kosubstrat in Biogasanlagen oder durch Verbrennung des getrockneten Grases. Besonders auf feuchten Standorten von hoher Produktivität entstehen dabei Nutzungskonflikte.

Um abzuschätzen, wie viel Grünland in Zukunft für die Energiebiomasse zur Verfügung stehen könnte, wurde auf die Ergebnisse von HEKTOR zurückgegriffen.

Energiepotenziale aus Grünschnitt als Kosubstrat

Bei der Nutzung von Grünschnitt als Kosubstrat wird das Material zusammen mit Gülle in Biogasanlagen vergärt. Die Ausbeute an Biogas hängt dabei vom Schnittzeitpunkt und den Spezifikationen der Anlage ab. Durchschnittlich können aus Wiesengras ca. 0,67 m³ Biogas pro kg organischer Trockensubstanz (oTS) erzeugt werden, wobei die oTS einen Anteil von 80% an der gesamten Trockenmasse aufweist (Kaltschmitt/Thrän 2003). Der Heizwert von Biogas wird mit 21,6 Megajoule (MJ) pro Kubikmeter (m³) angesetzt (Wilfert/Schattauer 2002).

Energiepotenziale aus Grünschnitt als Heu

Wird der Grasschnitt zunächst getrocknet, so kann er auch direkt der Verbrennung zugeführt werden. Die Energieausbeute beträgt dabei 14,0 MJ/kg Heu bei einem Wassergehalt von 15 % (Kaltschmitt/Thrän 2003). Dem Vorteil einer direkten Energiegewinnung steht allerdings ein erhöhter Arbeits- und Energieaufwand durch die Trocknung auf dem Feld gegenüber.

5.8.2 Die Energiepotenziale aus Grünschnitt in den Szenarien

Wie für die übrigen Potenziale wurden für Grünschnitt aus der Landwirtschaft die Szenarien *Referenz*, *Umwelt* und *Biomasse* berechnet. Die spezifischen Annahmen und Potenziale sind im Folgenden dargestellt.

Referenzszenario

Im Referenzszenario basieren die Flächen, die zukünftig für den Nahrungsmittelverbrauch benötigt werden auf der Weiterführung der aktuellen europäischen Agrarpolitik. Aufgrund der oben beschriebenen Trends zum zukünftigen Verbrauch¹¹⁰ berechnet HEKTOR bis 2030 Grünlandflächen, die nicht mehr durch die Tierhaltung genutzt werden.

Von diesen Flächen müssen 30 % des zukünftigen Flächenverbrauchs durch Verkehr, Siedlung etc. abgezogen werden sowie Ausgleichsflächen und Flächenansprüche für den Naturschutz befreit werden. Letzteres führt allerdings zur Erhöhung des Flächenpotenzials bei Grünland.

Falls die freien Flächen als Grünland erhalten bleiben sollen, müssen sie beweidet oder maschinell gepflegt werden. Für Landschaftspflegeflächen wurde ein relativ niedriger Ertrag von 3 t/ha*a TS geschätzt. Darin ist bereits enthalten, dass der Aufwuchs einiger Flächen aufgrund von Hanglage, Erreichbarkeit etc. teilweise nicht genutzt werden wird. Da diese 3 t/ha auch langfristig ohne Düngung beibehalten werden können, wird dieser Ertrag für den gesamten Zeitraum bis 2030 angenommen.

Tabelle 129 Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenziale des Referenzszenarios

		2010	2020	2030
Fläche	ha	315 000	453 000	862 000
Grünschnittmenge	Mio. t TS	0,95	1,36	2,59
Energiepotenzial Verbrennung	PJ	15,6	22,4	42,6
Energiepotenzial Biogas	PJ	11,0	15,7	29,9

Wird das Schnittgut der Grünlandflächen, wie sie im Referenzszenario zur Verfügung stehen in Zukunft vollständig verbrannt so steigt das Energiepotenzial auf gut 43 PJ im Jahr 2030 an.

Umweltszenario

Das Umweltszenario, das innerhalb des Biomasseprojekts als eigentlicher Vergleichsfall dient, unterscheidet sich vom Referenzszenario durch die Annahme, dass für eine nachhaltige Biomasseproduktion auch eine nachhaltige Landwirtschaft vorausgesetzt werden muss. Für die zukünftige Weiterentwicklung wurde daher von einer Umsetzung der Agrarwende ausgegangen.

¹¹⁰ Verbrauch bei steigender Milchleistung und sinkender Nachfrage durch eine sinkende Bevölkerung, bei in der Regel gleich bleibenden Selbstversorgungsgraden.

Für die Entwicklung der Flächen ist vor allem die geplante Zunahme des ökologischen Landbaus von Bedeutung, der einen erhöhten Flächenbedarf gegenüber der konventionellen Landwirtschaft aufweist. Im Gegenzug müssen nur geringere Flächenverbräuche und Ausgleichsflächen von den freiwerdenden Flächen abgezogen werden.

Für die berechnete Grünlandfreisetzung ist besonders die Annahme einer höheren Grünlandnutzung in der ökologischen Rinderhaltung gegenüber der konventionellen Rinderhaltung von Bedeutung. Die freigesetzte Fläche, wie sie durch HEKTOR berechnet wurde ist daher gegenüber dem Referenzszenario wesentlich kleiner. In 2010 stehen 121.000 ha zur Verfügung.

Tabelle 130 Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenziale des Umweltszenarios

		2010	2020	2030
Fläche	ha	121 000	235 000	542 000
Grünschnittmenge	Mio. t TS	0,36	0,71	1,63
Energiepotenzial Verbrennung	PJ	6,0	11,6	26,8
Energiepotenzial Biogas	PJ	4,2	8,2	18,8

Biomasse-Szenario

Im Biomasseszenario greift HEKTOR auf die Annahmen im Umweltszenario zurück, berechnet aber Flächen die bei einer Senkung der Selbstversorgung bei Rindfleisch auf 100 % ab 2020 frei würden. Außerdem werden die Ansprüche des Naturschutzes an zusätzlichen Flächen nur zur Hälfte befriedigt, weswegen weniger Ackerflächen in Grünland umgewandelt werden.

Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Flächen nicht nur zur Landschaftspflege gemäht werden, sondern gleichzeitig geeignetes Substrat für die Vergärung gewonnen werden soll. Dazu werden die Flächen weiterhin extensiv bewirtschaftet, wodurch ein etwas höherer Ertrag als bei der reinen Landschaftspflege erzielt werden kann. Bei einer Mineraldüngung der Grünlandflächen wird für den gesamten Zeitraum bis 2030 eine Ernte von durchschnittlich jährlich 4,5 t/ha TS angenommen.

Tabelle 131 Verfügbare Dauergrünlandfläche, Grünschnittmenge und Energiepotenzial des Biomasseszenarios

		2010	2020	2030
Fläche	ha	27 000	186 000	497 000
Grünschnittmenge	Mio. t TS	0,12	0,84	2,24
Energiepotenzial Verbrennung	PJ	2,0	13,8	36,8
Energiepotenzial Biogas	PJ	1,4	9,7	25,9

Im Biomasseszenario ist bei den errechneten Potenzialen in 2010 die geringe Schärfe von HEKTOR bei kleinen Flächen zu beachten.

5.8.3 Überblick zum energetischen Potenzial von Grünschnitt aus der Landwirtschaft

Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Potenzialanalyse nochmals im Überblick zusammen.

Tabelle 132 Energetisch nutzbares Grünschnittpotenzial in den Szenarien

Energiepotenzial bei Nutzung als Biogas				
- in PJ/a -	2000	2010	2020	2030
Referenz	0	11,0	15,7	29,9
Umwelt	0	4,2	8,2	18,8
Biomasse	0	1,4	9,7	25,9
Energiepotenzial bei Nutzung durch Verbrennung				
- in PJ/a -	2000	2010	2020	2030
Referenz	0	15,6	22,4	42,6
Umwelt	0	6,0	11,6	26,8
Biomasse	0	2,0	13,8	36,8

Für das Jahr 2000 besteht kein Potenzial, da definitionsgemäß noch keine Flächen für Grünschnitt „freiwerden“ – dies erfolgt aufgrund der Szenariodynamik erst bis 2010.

5.8.4 Biomassepotenziale aus Naturschutz- und Ausgleichsflächen

Derzeit gibt es in Deutschland ca. 10,7 Mio. ha¹¹¹, deren Nutzung durch Naturschutzauflagen unterschiedlich eingeschränkt ist (BMVEL 2001). Während auf einigen Flächen die Nutzung kaum eingeschränkt ist (z.B. in den 6,8 Mio. ha Naturpark in Deutschland), können andere Flächen überhaupt nicht genutzt werden. Allerdings entsteht auch auf den Flächen mit reiner Naturschutzfunktion Biomasse, die zum Teil entzogen werden muss um die Funktion der Fläche zu erhalten. Als Biomasse fällt dabei sowohl Strauch- und Baumschnitt als auch Grünschnitt an. Diese Reststoffe können kompostiert, aber auch energetisch durch Verbrennung oder Vergärung genutzt werden. Darüber hinaus können manche Flächen durch extensive Weidesysteme gepflegt werden.

Neben den bereits bestehenden Auflagen bestehen weitere Anforderungen des Naturschutzes an derzeit landwirtschaftlich genutzte Flächen, die in Zukunft berücksichtigt werden müssen. Die Umsetzung dieser Ansprüche ist in Kapitel 5.7 beschrieben.

¹¹¹ Nationalparke, Biosphärenreservate, Naturschutzgebiete, Naturparke, Feuchtgebiete und Naturwaldreservate

Bei diesen Naturschutzflächen erschwert die Variabilität der Umsetzung und damit der entstehenden Biomasse die Erhebung von Potenzialen an Biomasse und daraus gewinnbarer Energie¹¹². Die Varianten reichen dabei von einer Grasschnittnutzung mit weniger als 2 t/ha TM pro Jahr (Schmid/Troxler 1989) bis hin zu einer Nutzung durch mehrjährige Energiepflanzen auf erosionsgefährdeten Standorten, die weit über 10 t/ha TM pro Jahr erreichen können (Hartmann/Kaltschmitt 2002). Zur Erhebung der Potenziale von Naturschutzflächen besteht daher weiterer Forschungsbedarf.

Daneben besteht noch erhebliche Unsicherheit bezüglich der Mobilisierung der Biomasse auf Naturschutzflächen. Kaltschmitt/Trän (2003) gehen von einer Bandbreite von 25-66 % für die Nutzung von Landschaftspflegeflächen zur Energiegewinnung aus. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf um Synergieeffekte zwischen Naturschutz und energetischer Biomassenutzung besser einschätzen zu können.

¹¹² Kaltschmitt/Trän (2003) nennen ein Biomassepotenzial von 0,01 Mio. t/a FM aus Gewässerrandgehölzen und 0,195 Mio. t/a FM aus Windschutzhecken. Dies deckt aber nur einen Bruchteil der Naturschutzflächen ab.

5.9 Zusammenfassung zu den energetischen Biomassepotenzialen

Aus den vorangegangenen Teilkapiteln zu den einzelnen technischen Potenzialen zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen werden in der folgenden Tabelle die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 133 Szenariobezogene Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen

Waldrest- und Schwachholz	2000	2010	2020	2030
Referenz	149	149	156	164
Umwelt	149	149	153	158
Biomasse	226	219	219	220
Industrierestholz	2000	2010	2020	2030
Referenz	55	55	55	55
Umwelt	55	55	55	55
Biomasse	55	55	55	55
Altholz	2000	2010	2020	2030
Referenz	69	69	69	69
Umwelt	69	69	69	69
Biomasse	78	78	78	78
Holzanteil im Hausmüll	2000	2010	2020	2030
Referenz	20	22	21	20
Umwelt	20	21	20	20
Biomasse	20	21	20	20
Klärschlamm	2000	2010	2020	2030
Referenz	10	19	22	22
Umwelt	10	16	18	19
Biomasse	11	22	25	25
Stroh	2000	2010	2020	2030
Referenz	59	57	61	58
Umwelt	59	52	54	51
Biomasse	110	88	74	71
Zoomasse	2000	2010	2020	2030
Referenz	15	14	14	14
Umwelt	15	14	14	14
Biomasse	15	14	14	14
Teilsomme feste Reststoffe	2000	2010	2020	2030
Referenz	377	384	397	403
Umwelt	377	376	384	385
Biomasse	515	497	485	482

Tabelle ...Fortsetzung

Gülle/Festmist	2000	2010	2020	2030
Referenz	88	84	85	83
Umwelt	88	87	88	87
Biomasse	94	94	96	94
Ernterückstände	2000	2010	2020	2030
Referenz	9	9	9	8
Umwelt	9	9	9	8
Biomasse	18	15	13	12
org. Hausmüllanteile	2000	2010	2020	2030
Referenz	12	12	13	14
Umwelt	12	16	18	19
Biomasse	12	17	20	23
Industrielle Substrate	2000	2010	2020	2030
Referenz	6	6	6	6
Umwelt	6	6	6	6
Biomasse	12	12	12	12
Deponiegas	2000	2010	2020	2030
Referenz	22	11	4	1
Umwelt	22	11	4	1
Biomasse	22	11	4	1
Klär gas	2000	2010	2020	2030
Referenz	4	6	7	8
Umwelt	7	16	20	20
Biomasse	4	6	7	8
Biogas aus Grünschnitt	2000	2010	2020	2030
Referenz	0	11	15,7	29,9
Umwelt	0	4	8,2	18,8
Biomasse	0	1,4	9,7	25,9
Teilsomme biogene Gase	2000	2010	2020	2030
Referenz	141	139	139	149
Umwelt	144	148	152	159
Biomasse	162	157	161	176

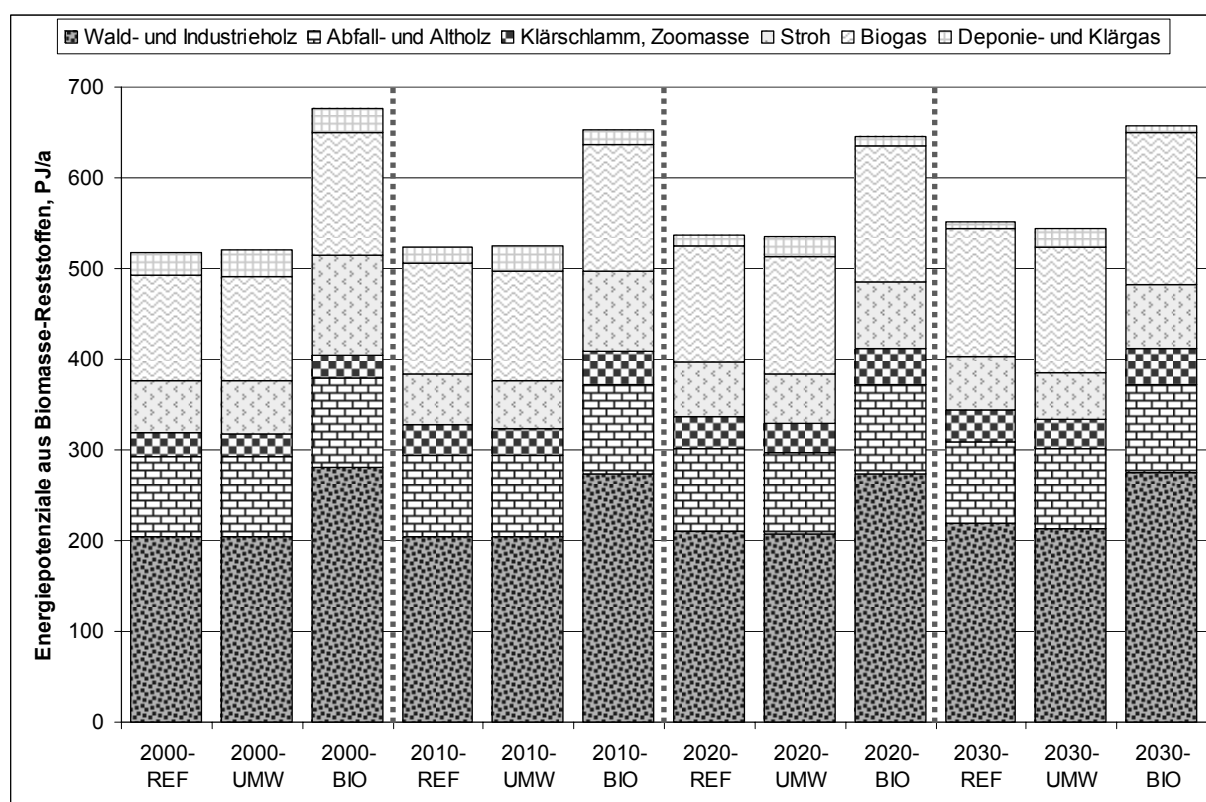
Gesamtpotenzial energetisch nutzbare Biomasse-Reststoffe	2000	2010	2020	2030
Referenz	518	523	536	552
Umwelt	520	525	536	545
Biomasse	677	654	646	658

Alle Angaben in PJ

Das im Jahr 2000 bei Biomasse höhere Potenzial ergibt sich aus der fiktiven Umsetzung der Annahmen.

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse in grafischer Form, wobei hier die Einzelpotenziale aggregiert wurden.

Bild 40 Überblick zu den szenariobezogenen energetischen Potenzialen von Biomasse-Reststoffen



Deutlich sichtbar ist in der Abbildung, dass sich die Reststoffpotenziale von Referenz- und Umwelt-Szenario nur wenig unterscheiden – die größten Unterschiede bestehen hier bei Deponie- und Klärgas sowie Klärschlamm, wo Umweltaspekte eingehen. Das Biomasse-Szenario hat erwartungsgemäß die höchsten Potenziale, die vor allem durch Steigerungen bei Waldrest- und Schwachholz sowie Reststroh erzielt werden.

Insgesamt ist die Dynamik der szenariobezogenen Potenziale an Biomasse-Reststoffen vergleichsweise gering – die Nutzungsrestriktionen können z.T. durch technologische Verbesserungen ausgeglichen werden¹¹³. Damit sind die Ergebnisse der Potenzialanalysen *als durchweg belastbar* zu bezeichnen und würden auch bei Variation von Szenario-Annahmen relativ stabil bleiben.

Die folgenden Tabellen zeigen nochmals die Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen für die einzelnen Szenarien.

¹¹³ Dies ist bei den szenariobezogenen Potenzialen zum Biomasse-Anbau deutlich anders – vgl. Kapitel 5.7.

Tabelle 134 *Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Referenz-Szenario*

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Waldrest- und Schwachholz	149	149	156	164
Industrierestholz	55	55	55	55
Altholz	69	69	69	69
Holzanteil im Hausmüll	20	22	21	20
Klärschlamm	10	19	22	22
Stroh	59	57	61	58
Zoomasse	15	14	14	14
Teilsumme feste Reststoffe	377	384	397	403
Biogas - Gülle/Festmist	88	84	85	83
Biogas - Ernterückstände	9	9	9	8
Biogas - org. Hausmüllanteile	12	12	13	14
Biogas - industrielle Substrate	6	6	6	6
Deponiegas	22	11	4	1
Klärgas	4	6	7	8
Biogas - Grünschnitt	0	11	16	30
Teilsumme biogene Gase	141	139	139	149
Gesamtpotenzial energetisch nutzbare Biomasse-Reststoffe	518	523	536	552

Tabelle 135 Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Umwelt-Szenario

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Waldrest- und Schwachholz	149	149	153	158
Industrierestholz	55	55	55	55
Altholz	69	69	69	69
Holzanteil im Hausmüll	20	21	20	20
Klärschlamm	10	16	18	19
Stroh	59	52	54	51
Zoomasse	15	14	14	14
Teilsomme feste Reststoffe	377	376	384	385
Biogas - Gülle/Festmist	88	87	88	87
Biogas - Ernterückstände	9	9	9	8
Biogas - org. Hausmüllanteile	12	16	18	19
Biogas - industrielle Substrate	6	6	6	6
Deponiegas	22	11	4	1
Klärgas	7	16	20	20
Biogas – Grünschnitt	0	4	8	19
Teilsomme biogene Gase	144	148	152	159
Gesamtpotenzial energetisch nutz- bare Biomasse-Reststoffe	520	525	536	545

Tabelle 136 *Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse-Reststoffen im Biomasse-Szenario*

- Angaben in PJ -	2000	2010	2020	2030
Waldrest- und Schwachholz	226	219	219	220
Industrierestholz	55	55	55	55
Altholz	78	78	78	78
Holzanteil im Hausmüll	20	21	20	20
Klärschlamm	11	22	25	25
Stroh	110	88	74	71
Zoomasse	15	14	14	14
Teilsumme feste Reststoffe	515	497	485	482
Biogas - Gülle/Festmist	94	94	96	94
Biogas - Ernterückstände	18	15	13	12
Biogas - org. Hausmüllanteile	12	17	20	23
Biogas - industrielle Substrate	12	12	12	12
Deponiegas	22	11	4	1
Klärgas	4	6	7	8
Biogas - Grünschnitt	0	1	10	26
Teilsumme biogene Gase	162	157	161	176
Gesamtpotenzial energetisch nutzbare Biomasse-Reststoffe	677	654	646	658

6 Szenarien zur energetischen Biomassenutzung

Ein Schwerpunkt im Projekt war die Erstellung von Szenarien zur künftig verstärkten energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland.

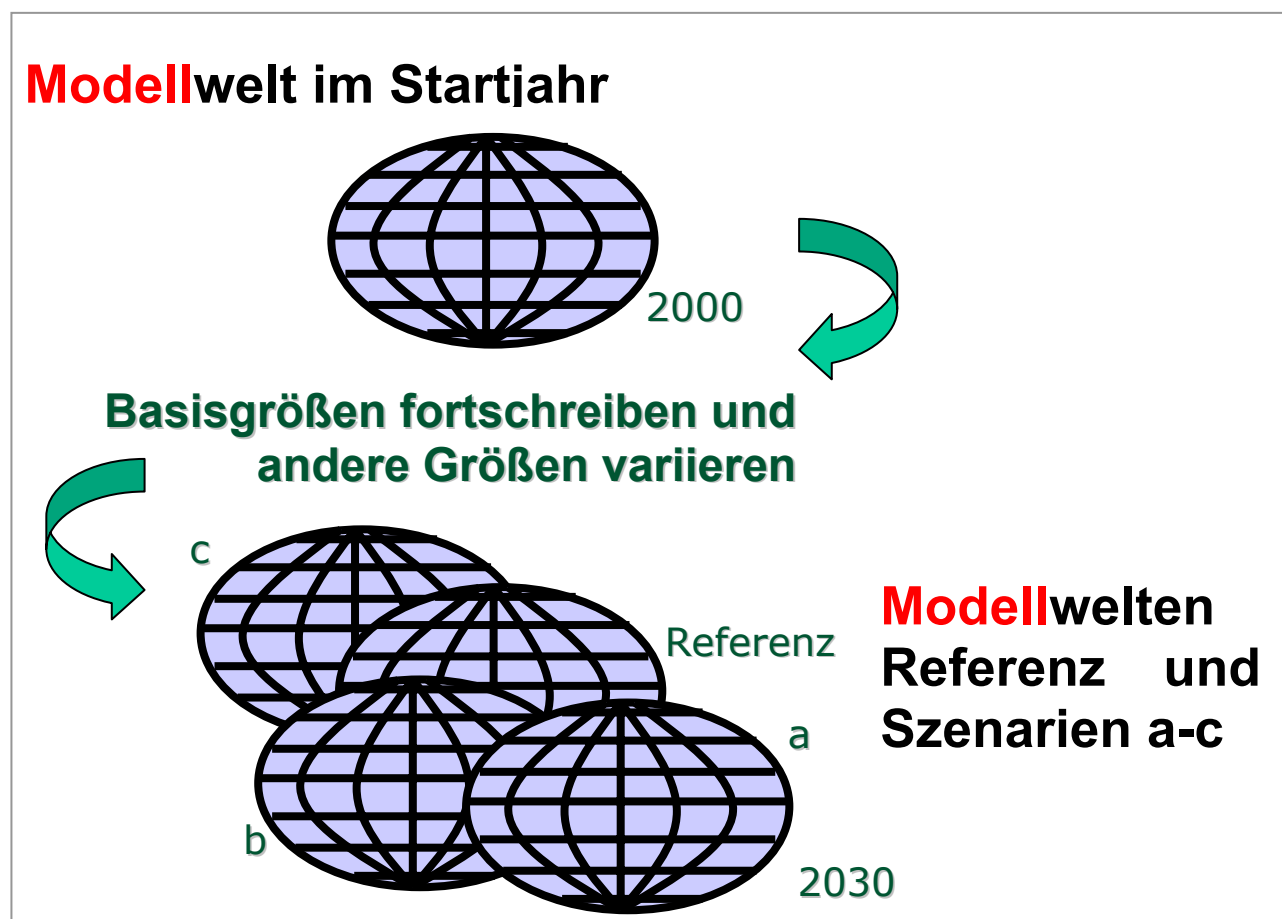
6.1 Fragestellung und methodischer Ansatz

Die Szenarien stellen *keine Prognosen* dar, sondern liefern *wenn-dann*-Aussagen insbesondere zur (zeitlichen) Änderung von Energie- und Stoffströmen, denen dann Umwelt- und Kostenindikatoren zugeordnet werden können.

Als Basisjahr wird im Projekt das Jahr 2000, als Ende des Szenario-Zeitraums das Jahr 2030 gewählt mit Stützzeitpunkten für 2010 und 2020.

Das Prinzip von Szenarien zeigt die folgende Abbildung.

Bild 41 Prinzip von Szenarien als Erzeugung von Modellwelten

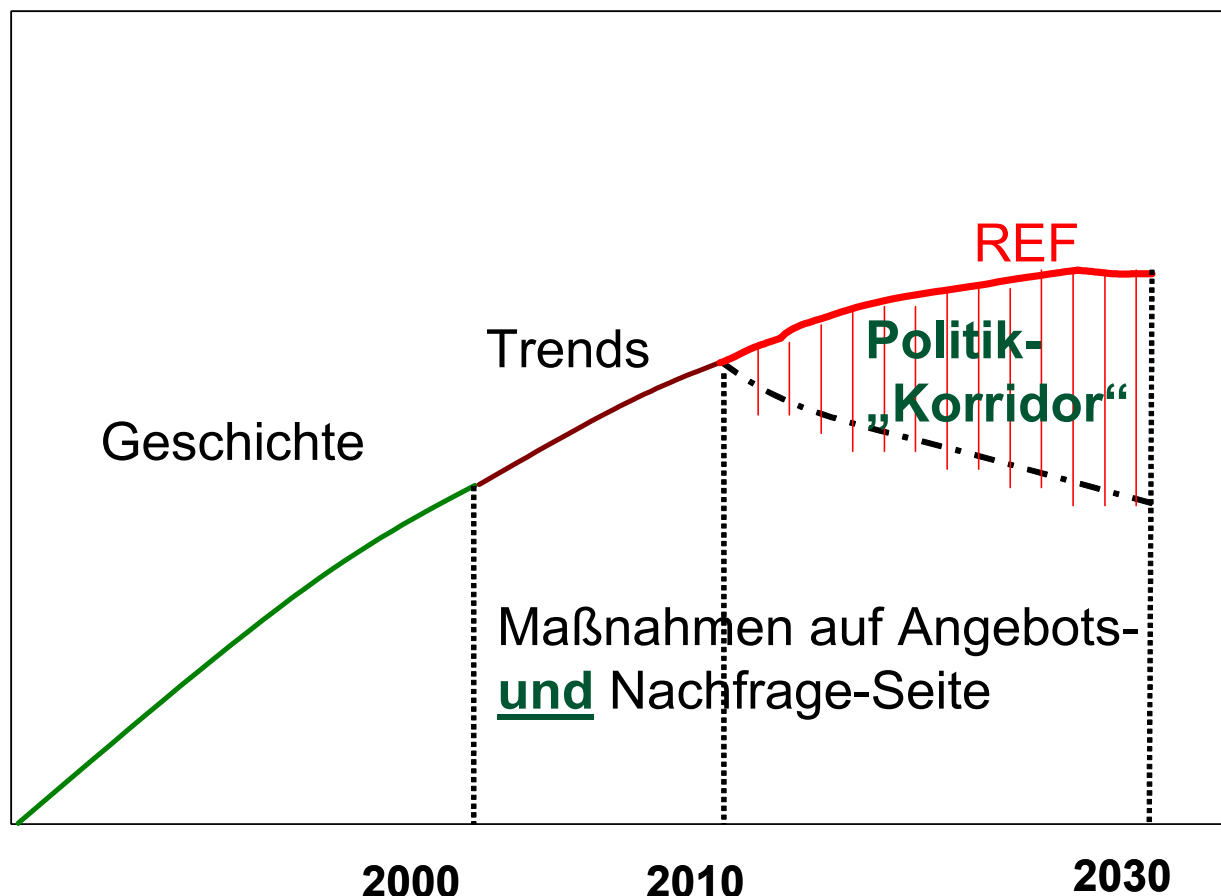


Entscheidend für die Szenarien ist es, Varianten zu einer „Referenz“-Entwicklung aufzustellen, die den potenziellen Handlungskorridor in der Zukunft umreißen – dies ist der Szenario-„Raum“.

6.2 Der Szenario-Raum

Das Aufspannen des potenziellen Handlungskorridors durch Szenarien zeigt das folgende Schema.

Bild 42 Der „Handlungskorridor“ als Grundprinzip von Szenarien



Die Referenz-Entwicklung schreibt den kurz- und mittelfristigen Trend fort, während in Szenario-Varianten angenommene Maßnahmen diese Entwicklung nach oben oder unten ändern können.

Im vorliegenden Projekt wurden folgende Szenarien aufgestellt:

- REFERENZ als „Trend“-Szenario ohne nennenswerte Maßnahmen zur Biomasse-Nutzung (vgl. Kapitel 6.2.1)
- UMWELT beschreibt die energetische Biomassenutzung unter maximalen ökologischen und naturschutzseitigen Restriktionen (vgl. Kapitel 6.2.2)
- BIOMASSE beschreibt die maximale Biomassenutzung, die bei hohen ökologischen Restriktionen und moderaten Naturschutzanforderungen künftig möglich ist (vgl. Kapitel 6.2.3).

Aus der Analyse dieser drei Szenarien wurde das Szenario NACHHALTIG zur energetischen Biomassenutzung entwickelt (vgl. Kapitel 6.2.4) und daraus politische Umsetzungsempfehlungen abgeleitet (vgl. Kapitel 7).

Die detaillierten Eingabedaten der Szenarien gibt der Anhangband (vgl. beigelegte CDROM).

6.2.1 REFERENZ-Szenario

Als Basis für die anderen Szenarien (siehe unten) wurde ein *energiewirtschaftliches* Referenz-Szenario erstellt, das eine „ungestörte“ Fortschreibung *ohne aktive* Politik reflektiert.

Zwischen den verschiedenen BMU-Forschungsprojekten wurde vereinbart, hierzu das Referenz-Szenario der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ (Enquete 2002) als gemeinsame Grundlage zu verwenden. Mit dieser Referenz sind auch wichtige Kenndaten wie Energiepreise, Investitionskosten für konventionelle Kraftwerke u.ä. festgelegt¹¹⁴.

6.2.2 UMWELT-Szenario

Das vorliegende Projekt zielt nicht auf eine generelle Nachhaltigkeit des Energiesektors, sondern spezifisch auf die der energetischen Biomassenutzung. Daher ist als Einbettung der energetischen Biomassenutzung auch ein Szenario nötig, das möglichst weitgehend eine Nachhaltigkeitsstrategie

- im Energiesektor *insgesamt*,
- in der Land- und Forstwirtschaft sowie
- in der Abfallwirtschaft

abbildet.

Der energiewirtschaftliche Teil dieses Szenarios (Energienachfrage, Angebotsmix) beruht auf dem BMU/UBA-Nachhaltigkeitsszenario (vgl. WI/DLR 2002) und dient als *erste Orientierung* zur Größenordnung der potenziellen Biomassebeiträge unter den Bedingungen einer massiven Effizienzsteigerung (inkl. Kraft-Wärme-Kopplung) und des Ausbaus der erneuerbaren Energien insgesamt.

Dieses Szenario wird UMWELT genannt, da es Umwelt- und Naturschutzbelange am umfassendsten berücksichtigt. Es dient als *eigentlicher Vergleichsfall* für die speziellen Biomasse-Szenarien des Projekts.

Zentral sind dabei die folgenden Annahmen:

- Es beleuchtet die Auswirkungen einer verstärkten Berücksichtigung des *Natur- und Landschaftsschutzes als Potenzialrestriktion* für die Biomassenutzung, da es die potenziellen Flächen für Energiepflanzen sowie die Reststoffpotenziale für Holz und Stroh gegenüber den anderen Szenarien reduziert.
- Im Strom- und Wärmesektor werden Biomasse-Reststoffe eingesetzt, während *Energiepflanzen überwiegend im Personenverkehr* für Biokraftstoffe genutzt werden.

Das Szenario UMWELT wurde zuerst auf Basis der Daten von WI/DLR (2002) aufgestellt und danach mit aktualisierten Daten aus DLR/IFEU/WI (2004) ein Abgleich der Angebotsseite für Strom und Wärme (ohne Biomasse) vorgenommen.

¹¹⁴ Der Energiebedarf im Basisjahr 2000 wurde im Referenz-Szenario der Enquete-Kommission wie auch in DLR/IFEU/WI (2004) für Biomasse nur vereinfacht abgeschätzt, so dass hier eine gewisse Unschärfe gegenüber neueren Daten existiert, die aber für den Vergleich der Szenarien unerheblich ist. Dennoch sollten bei *künftigen* Aktualisierungen der hier vorgelegten Szenarien die erst nach Abschluss des Projekts verfügbar gewordenen detaillierten Daten zur Biomassenutzung (vgl. IE 2004) herangezogen werden.

6.2.3 BIOMASSE-Szenario

Nach dem UMWELT-Szenario werden mit dem BIOMASSE-Szenario die *Obergrenzen* der Biomassepotenziale – ohne weitergehende Naturschutz-Restriktionen - genutzt und der maximale technische Fortschritt bei der Anlagentechnik sowie eine massive Unterstützung der Biomasse in Bezug auf Förderung der Bereitstellung und Investition in die Nutzungstechniken unterstellt. Als wichtige Elemente wurden die folgenden Entwicklungsoptionen einbezogen:

- Im Bereich der *Energiewirtschaft* wird eine Fortschreibung des EEG unterstellt, die zu einer höheren energetischen Biomassenutzung vor allem im *Stromsektor* führt, sowie die Freistellung von erneuerbar erzeugtem Strom von der Ökosteuern.
- Ergänzend wird die *Mitverbrennung* von (Rest)Biomasse zur Stromerzeugung angesetzt. Weiterhin werden absehbare technologische Entwicklungen, die vorteilhaft erscheinen, im Szenariozeitraum durch gezielte F&E-Anstrengungen sowie Markteintrittshilfen (z.B. Demonstrationsprogramme) eingeführt.
- Im Bereich der *Abfallwirtschaft* werden Änderungen bzw. Klarstellungen zum Kreislaufwirtschaftsgesetz, der Bioabfall-Verordnung sowie der Altholz-Verordnung angenommen, die über eine stärkere Getrennterfassung von Abfällen das ökologisch unbedenkliche Potenzial von energetisch nutzbaren Biomassereststoffen erhöhen. Ebenfalls wird dabei die verstärkte Bereitstellung von Biogas bei der mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Abfällen sowie als Vorstufe bei der Kompostierung getrennt erfasster biogener Abfälle angenommen.

Im Bereich der *Land- und Forstwirtschaft* werden die Spielräume zur Um- und Ausgestaltung des „Umbaus“ bis zum Jahr 2030 genutzt.

6.2.4 NACHHALTIG-Szenario

Die Ergebnisse des UMWELT- und BIOMASSE-Szenarios spannen *einen Korridor* auf, der die mögliche zusätzliche Biomassenutzung unter ökologischen Restriktionen bei Gewinnung und Nutzung aufzeigt.

Die Analyse der in den Szenarien unterstellten Maßnahmen hinsichtlich ihrer *ökologisch-ökonomischen tradeoffs* wurde dann genutzt, um ein konsolidiertes Szenario zur nachhaltigen Biomassenutzung zu entwerfen, in dem „robuste“ und effiziente Technologien und Nutzungsformen sowie entsprechende Instrumente zur ihrer Umsetzung maßgeblich sind.

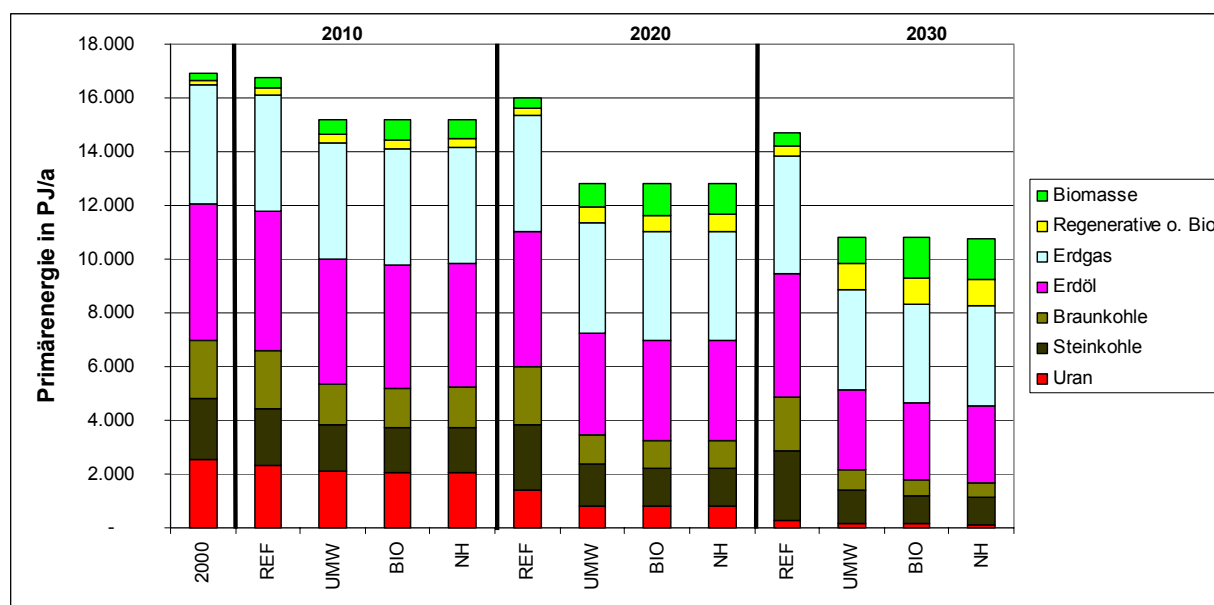
NACHHALTIG orientiert sich stark an den Ergebnissen des BIOMASSE-Szenarios, wobei hier die Technologiewahl und das Szenario-Design *insbesondere Beschäftigungseffekte* berücksichtigen und gegenüber BIOMASSE eine höhere Technologievielfalt unterstellt wird.

6.3 Gesamtergebnisse der Szenarien

Die später in den Kapiteln 6.4 bis 6.6 dargestellten Szenario-Teilergebnisse zu Strom, Wärme und Verkehr führen über die Umrechnung der Endenergie- und Brennstoffbedarfe auf *Primärenergie*¹¹⁵ zu den Szenario-Gesamtergebnissen, die neben Kosten auch Emissions- und Beschäftigungsbilanzen betreffen¹¹⁶.

Bei den Emissionsbilanzen sind die gesamten Lebenswege der jeweiligen Prozesse zur Bereitstellung der Strom-, Wärme- und Verkehrsnachfragen einbezogen, d.h. alle Herstellungsaufwendungen für die Energieträger und auch für die Anlagen sowie Infrastrukturen¹¹⁷.

Bild 43 Primärenergie in den Szenarien insgesamt



REF = REFERENZ-Szenario, UMW = UMWELT-Szenario, BIO = BIOMASSE-Szenario, NH = NACHHALTIG-Szenario; Daten inkl. Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Gaspipelines)

Deutlich sichtbar ist der Effekt der Energieeffizienz, die gegenüber REF in den Maßnahme-Szenarien (UMW, BIO, NH) bis 2020 gut 20 % und bis 2030 mehr als ¼ einsparen kann und damit mehr „NegaWatt“ bereitstellt als alle Regenerativen zusammen¹¹⁸.

¹¹⁵ Bei der Primärenergieberechnung wurde der heute übliche Substitutionsansatz verwendet, der gegenüber dem früher verbreiteten Wirkungsgradansatz zu geringeren Anteilen von Regenerativen führt.

¹¹⁶ Die Ergebnisse zu weiteren Umwelteffekten (CO₂, SO₂, NO_x, Staub, CO, Asche) der Szenarien insgesamt sowie Einzelergebnisse für die Strom- und Wärmebereitstellung und den Personenverkehr finden sich im Anhangband (vgl. beigefügte CDROM).

¹¹⁷ Für den Verkehr wurden die Infrastrukturen aufgrund ungelöster Allokationsprobleme zwischen Personen- und Güterverkehr sowie offenen Datenfragen nicht einbezogen. In den Lebenswegen sind allerdings auch ausländische Anteile (z.B. für Kohle-, Öl- und Erdgasförderung sowie internationale Transporte) mit berücksichtigt.

¹¹⁸ Die Energieeffizienz auf der Nachfrageseite (z.B. Wärmedämmung, effizientere Haushaltsgeräte, stromsparende Beleuchtung und Motoren etc.) wurde im Projekt nicht eigenständig modelliert, sondern die Daten unverändert aus DLR/IFEU/WI (2004) übernommen. Das Stoffstrom-Modell ist in der Lage, auch diese Form der Energie“bereitstellung“ explizit zu modellieren und damit auch in den Szenarien variierbar zu machen.

Die folgenden Tabellen geben die Einzelwerte zum Primärenergiebedarf der Szenarien und die jeweiligen prozentualen Anteile von erneuerbaren Energien ohne Biomasse – also Geothermie, Solarenergie, Wasserkraft, Wind - sowie von Biomasse.

Tabelle 137 Primärenergiebedarf im Szenario REFERENZ

Referenz [PJ]	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	2.518	2.321	1.391	270
Steinkohle	2.306	2.098	2.469	2.574
Braunkohle	2.172	2.159	2.152	2.015
Erdöl	5.066	5.213	4.991	4.582
Erdgas	4.399	4.328	4.335	4.389
Müll	274	258	245	245
Regenerative ohne Biomasse	181	238	274	392
Biomasse-Reststoffe	244	355	375	396
Biomasse-Anbau	12	19	37	73
Summe	17.173	16.989	16.267	14.936
Anteil Regenerative o. Biomasse	1%	1%	2%	3%
Anteil Biomasse	1%	2%	3%	3%
Anteil Regenerative gesamt	3%	4%	4%	6%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004) ; Daten inkl .Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Tankertransporte, Gaspipelines)

Tabelle 138 Primärenergiebedarf im Szenario UMWELT

Umwelt [PJ]	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	2.518	2.087	825	189
Steinkohle	2.306	1.760	1.533	1.214
Braunkohle	2.172	1.519	1.112	772
Erdöl	5.066	4.627	3.794	2.942
Erdgas	4.399	4.314	4.077	3.754
Müll	274	240	219	220
Regenerative ohne Biomasse	181	336	627	986
Biomasse-Reststoffe	244	366	596	586
Biomasse-Anbau	12	165	226	354
Summe	17.173	15.414	13.009	11.017
Anteil Regenerative o. Biomasse	1%	2%	5%	9%
Anteil Biomasse	1%	3%	6%	9%
Anteil Regenerative gesamt	3%	6%	11%	17%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse, andere Daten nach DLR/IFEU/WI (2004) ; Daten inkl .Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Tankertransporte, Gaspipelines)

Tabelle 139 Primärenergiebedarf im Szenario BIOMASSE

Biomasse [PJ]	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	2.518	2.080	805	183
Steinkohle	2.306	1.658	1.398	997
Braunkohle	2.172	1.451	1.015	600
Erdöl	5.066	4.597	3.728	2.862
Erdgas	4.399	4.306	4.071	3.658
Müll	274	237	214	208
Regenerative ohne Biomasse	181	335	625	975
<i>Biomasse-Reststoffe</i>	<i>244</i>	<i>396</i>	<i>623</i>	<i>698</i>
<i>Biomasse-Anbau</i>	<i>12</i>	<i>340</i>	<i>519</i>	<i>823</i>
Summe	17.173	15.400	12.999	11.004
Anteil Regenerative o. Biomasse	1%	2%	5%	9%
<i>Anteil Biomasse</i>	<i>1%</i>	<i>5%</i>	<i>9%</i>	<i>14%</i>
Anteil Regenerative gesamt	3%	7%	14%	23%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse, andere Daten nach DLR/IFEU/WI (2004) ; Daten inkl .Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Tankertransporte, Gaspipelines)

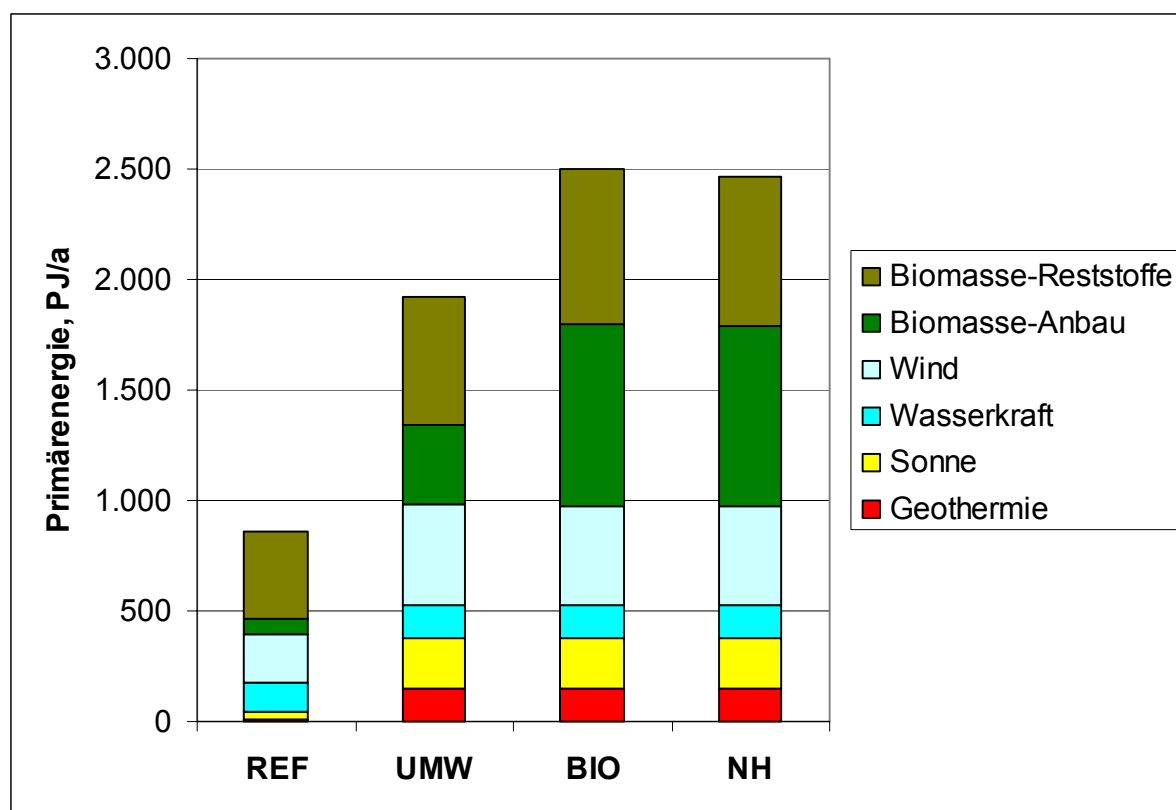
Tabelle 140 Primärenergiebedarf im Szenario NACHHALTIG

Nachhaltig [PJ]	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	2.518	2.080	800	133
Steinkohle	2.306	1.671	1.431	1.021
Braunkohle	2.172	1.486	1.019	547
Erdöl	5.066	4.597	3.730	2.862
Erdgas	4.399	4.311	4.074	3.723
Müll	274	238	212	199
Regenerative ohne Biomasse	181	336	624	970
<i>Biomasse-Reststoffe</i>	<i>244</i>	<i>411</i>	<i>640</i>	<i>673</i>
<i>Biomasse-Anbau</i>	<i>12</i>	<i>297</i>	<i>512</i>	<i>821</i>
Summe	17.173	15.425	13.041	10.949
Anteil Regenerative o. Biomasse	1%	2%	5%	9%
<i>Anteil Biomasse</i>	<i>1%</i>	<i>5%</i>	<i>9%</i>	<i>14%</i>
Anteil Regenerative gesamt	3%	7%	14%	23%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse, andere Daten nach DLR/IFEU/WI (2004) ; Daten inkl .Auslandsanteile durch Vorketten (z.B. Ölförderung, Tankertransporte, Gaspipelines)

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass bis 2030 im Szenario NACHHALTIG (NH) die Biomasse einen *größeren* Anteil erreichen kann als die anderen regenerativen Energien *zusammen* – dies zeigt die folgende Abbildung nochmals im Detail.

Bild 44

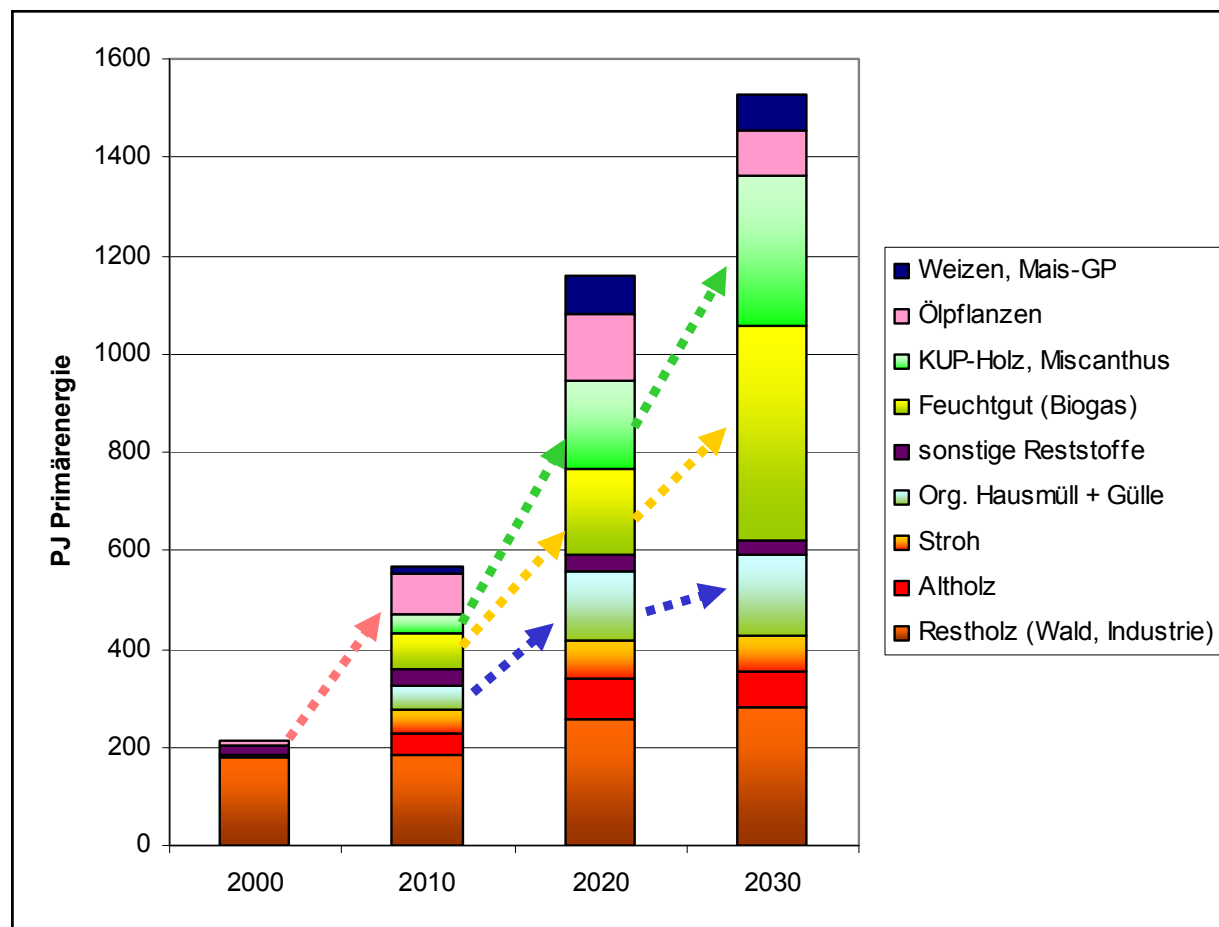
Regenerative Primärenergie in den Szenarien im Jahr 2030

Bei der Biomasse liegen die Anteile von Bio-Energie aus Reststoffen etwa gleich hoch wie die aus Anbau-Bioenergieträgern (Energiepflanzen), wobei letztere bis 2030 leicht überwiegen.

Die Biomasse-Reststoffe bringen etwas mehr Primärenergie als die Windkraft, während die Energiepflanzen mehr als Wasserkraft, Geothermie und Solarenergie zusammen bereitstellen.

Biomasse insgesamt wäre im Szenario NACHHALTIG genauso stark an der Primärenergie beteiligt wie Stein- und Braunkohle gemeinsam – dies unterstreicht die sehr große potenzielle Bedeutung der biogenen Energieträger.

Bild 45 Künftige Entwicklung der energetischen Biomassenutzung in Deutschland im Szenario NACHHALTIG



GP= Ganzpflanzen; KUP= Kurzumtriebsplantagen

Deutlich sichtbar ist, dass neben den „klassischen“ Bioenergieträgern Restholz und Reststroh vor allem Biogas aus organischen Reststoffen und Gülle und die „neuen“ Bioenergieträger *Biogas aus Feuchtgut* sowie die *mehrfährigen Energiepflanzen* (Kurzumtriebsholz, Miscanthus) erhebliche Zunahmen aufweisen. Demgegenüber spielen die Ölpflanzen (für Biodiesel) bzw. die Ganzpflanzennutzung von Weizen und Mais (für Bioethanol bzw. Biogas) nur eine relativ geringe Rolle.

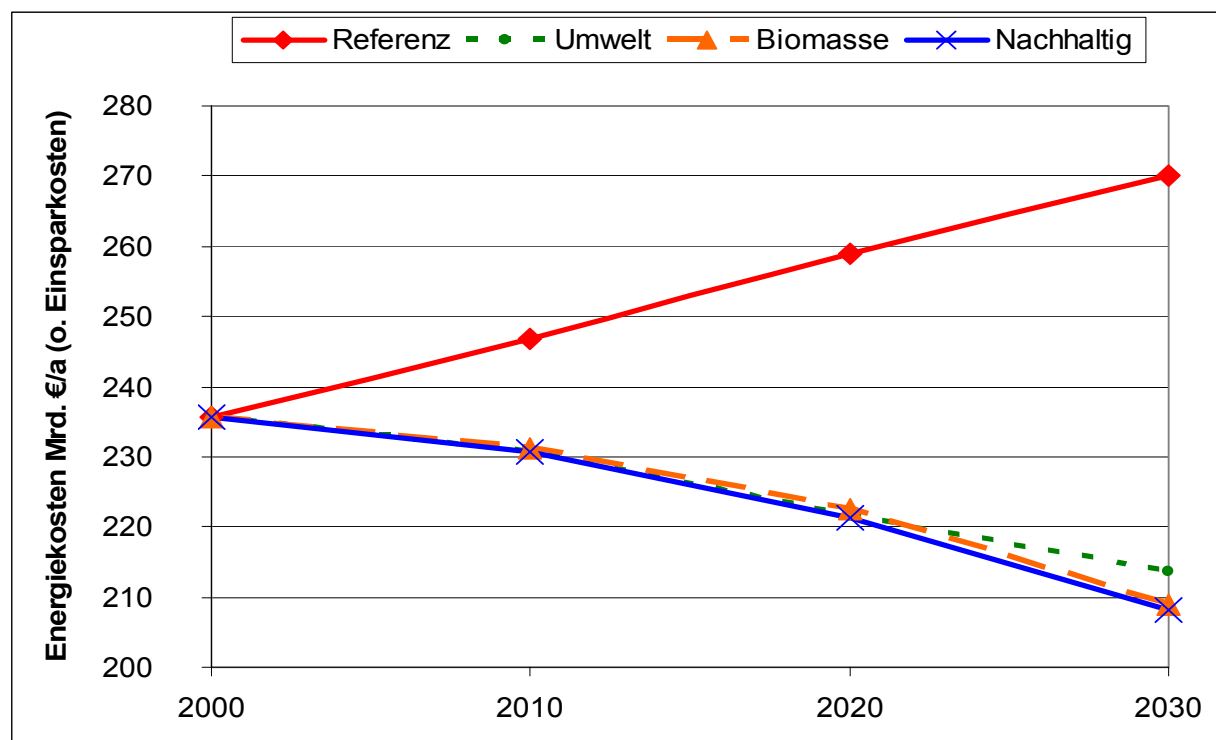
Die unterschiedliche Bedeutung der Bioenergieträger liegt in der angenommenen Verwendung:

Die *Nettoflächenerträge* – also unter Einrechnung der *gesamtem Lebenswege* (inkl. Dünger usw.) - und die Naturschutzaspekte von Feuchtgutlinien und KUP-Holz sind *erheblich günstiger* als die von z.B. Raps oder Mais-Ganzpflanzen. Auf den nur beschränkt zur Verfügung stehenden Anbauflächen sollten daher vorrangig die nachhaltigsten Bioenergieträger zum Einsatz kommen.

Bei der Verwendung sind die Restbiomassen i.d.R. ökologisch und ökonomisch günstiger im stationären Bereich (Strom- und Wärmebereitstellung) einsetzbar, erst nach 2020 kann auch Reststroh und z.T. Restholz über die BtL-Route effizient als Biokraftstoff verwendet werden. Bei den Anbaubiomassen wird dementsprechend Biogas aus Feuchtgutlinien primär in dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt, während KUP-Holz vorrangig über BtL als Biokraftstoff dient.

Neben der Primärenergie interessieren auch die gesamten Kosten der Szenarien - hier wurden die Vollkosten (Anlagen + Brennstoffe) bei Strom und Wärme einbezogen sowie im Verkehr *nur die Kraftstoffkosten* (also nicht die Fahrzeuge und Infrastrukturen).

Bild 46 Kosten in den Szenarien insgesamt



Kosten (real, in €₂₀₀₀) ohne Aufwendungen für Energieeinsparung

Bei den Ergebnissen zu den Kosten ist zu beachten, dass hier die Kosten für die unterstellte Energieeinsparung (Wärmedämmung, effizientere Geräte und Fahrzeuge) *nicht* mit berücksichtigt sind.

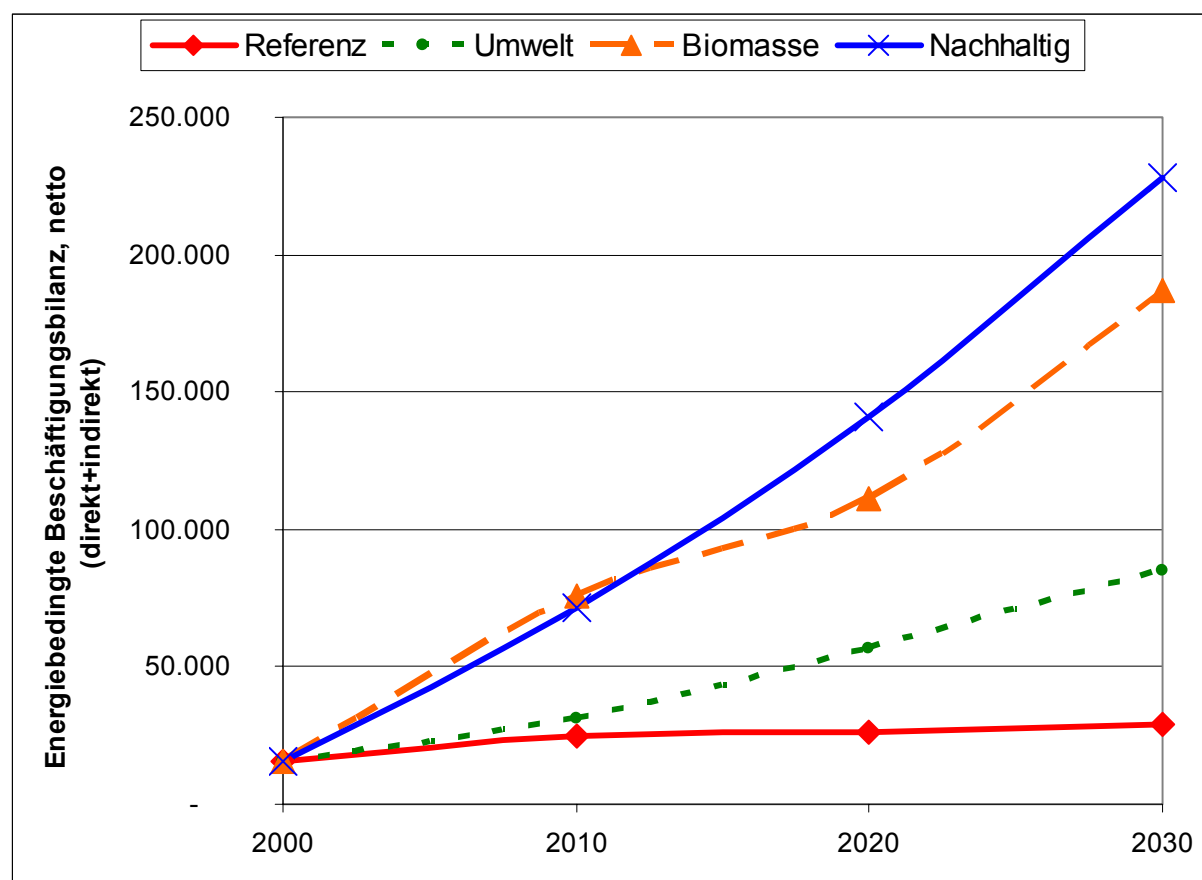
Neben den Kosten wurden auch die direkten und indirekten Effekte für die Beschäftigung ermittelt und die Nettobilanz der energiebedingten Beschäftigung berechnet, die auch die saldierten Effekte bei den fossilen Energieträgern in Deutschland mit umfasst.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt das folgende Bild¹¹⁹.

¹¹⁹ In der Nettobilanz sind den *Vorketten* auch die Mineralölprodukte (Heizöl, Diesel, Benzin) und Erdgas sowie die direkten und indirekten Effekte des Kohlebergbaus in Deutschland einbezogen. Ebenfalls sind vereinfachte Daten zur direkten und indirekten Beschäftigungswirkung bei Solar-, Wind- und Wasserkraft sowie Geothermie berücksichtigt.

Bild 47

Nettobilanz der Beschäftigung in den Szenarien insgesamt

Angaben ohne Effekte der Energieeinsparung

NACHHALTIG kann bis 2030 somit rund $\frac{1}{4}$ Million Beschäftigte *zusätzlich* bewirken, wobei davon rund ein Drittel *direkte* Arbeitsplätze sind, die bei der Biomassegewinnung und –verarbeitung entstehen, d.h. im ländlichen Raum (vgl. folgende Tabelle).

Tabelle 141 Beschäftigungsbilanzen (netto) in den Szenarien

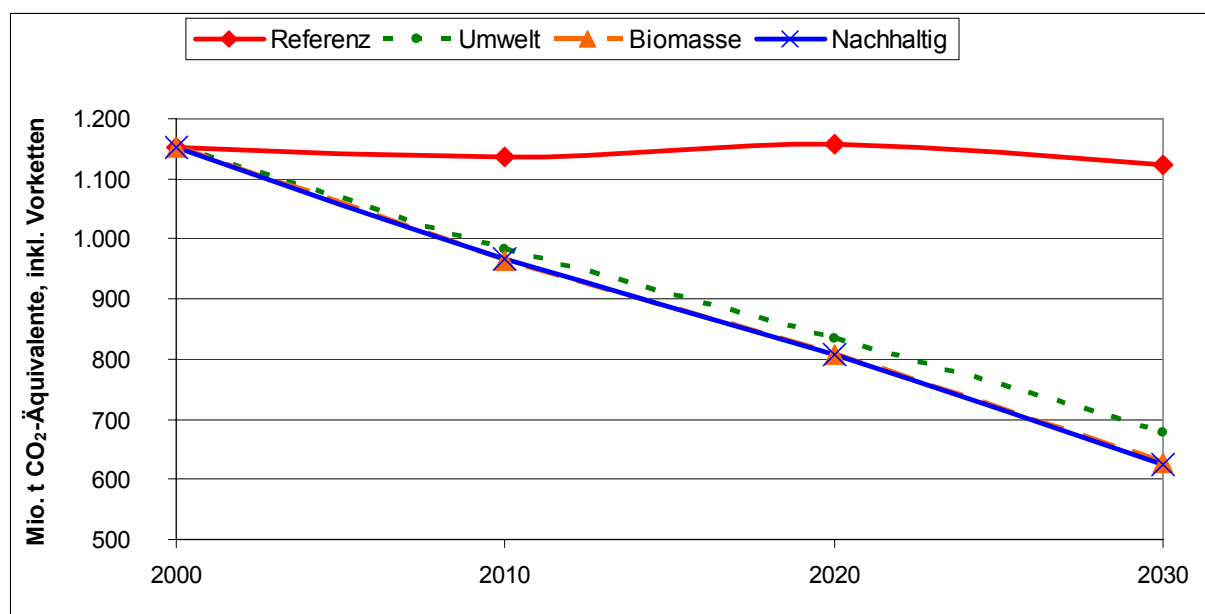
Referenz	2000	2010	2020	2030
Direkt	4.236	8.944	9.966	12.667
Indirekt	11.547	15.936	15.915	16.558
Umwelt				
Direkt	4.236	16.381	25.550	31.805
Indirekt	11.547	14.763	31.219	52.974
Summe	15.783	31.144	56.769	84.779
Biomasse				
Direkt	4.236	52.887	72.797	131.657
Indirekt	11.547	22.657	38.576	55.367
Nachhaltig				
direkt	4.236	47.143	83.150	142.639
indirekt	11.547	24.655	58.039	85.278

Angaben ohne Effekte der Energieeinsparung

Auch hier ist zu beachten, dass bei den Beschäftigten die Effekte der Energieeffizienz (z.B. Wärmedämmung) *nicht* mit einbezogen sind¹²⁰.

Als Indikator für die Klimawirkung wurden die Treibhausgasemissionen der Szenarien bestimmt, die im Folgenden gezeigt werden.

Bild 48 Treibhausgasemissionen in den Szenarien insgesamt



THG-Emissionen inkl. Auslandsanteile der Vorketten (z.B. aus Ölförderung, Gaspipelines)

Das Szenario REFERENZ würde bis 2030 praktisch gleich bleibende Emissionen an Treibhausgasen bewirken und damit die Kyoto-Ziele und die darüber hinaus von der Bundesregierung angestrebte 40 %-Reduzierung bis 2020 (gegenüber 1990) weit verfehlen.

Demgegenüber würden die Maßnahme-Szenarien – insbesondere NACHHALTIG – die Emissionen um gut 55 % bis 2030 (gegenüber 2000) reduzieren, dies entspricht einer Reduktion von ca. 65 % gegenüber 1990. Die internationalen Verpflichtungen sowie die längerfristigen nationalen Klimaschutzziele ließen sich somit klar erreichen.

Bei den Ergebnissen zu den Treibhausgasemissionen ist zu beachten, dass aufgrund der Lebenswegbilanzen auch ausländische Anteile und für das Basisjahr 2000 auch „historische“ Emissionen aus der Herstellung der Prozesse einbezogen sind, die das Ergebnis um ca. 15 % erhöhen. Ein direkter Vergleich mit z.B. nationalen Treibhausgasbilanzen muss dies beachten.

¹²⁰ Überschlägige Berechnungen in anderen Studien zeigen, dass eine Größenordnung von netto ca. 100.000 Vollzeit-Arbeitsplätzen durch die Einsparttechnologien bis 2030 geschaffen werden könnten.

6.4 Ergebnisse für Strom

Die folgenden Abschnitte erläutern die Annahmen und Ergebnisse zur Stromerzeugung in den Szenarien, wobei sich Details zu den jeweiligen Einzel-Technologien im Anhangband finden.

6.4.1 Stromerzeugung im Szenario REFERENZ

Die Stromerzeugung in REFERENZ wurde auf Basis von WI/DLR (2002) ausgelegt, hierbei aber minimale Erhöhungen bei der Stromerzeugung aus Öl und Müll sowie Biomasse angesetzt, die den aktualisierten Daten aus DLR/IFEU/WI (2004) entsprechen. Die generelle Struktur der Stromerzeugung wurde dadurch aber nicht geändert.

Tabelle 142 *Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario REFERENZ*

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	170	155	85	0
Steinkohle	142	138	189	219
Braunkohle	151	161	176	181
Öl	5	6	6	7
Erdgas	55	84	88	107
Müll	4	4	4	5
Regenerative ohne Biomasse	32	44	52	77
Biomasse	2	3	6	8
Strom insgesamt	561	595	607	604
Anteil Regenerative o. Biomasse an gesamt	5,7%	7,4%	8,6%	12,8%
Anteil Bio an gesamt	0,3%	0,6%	1,0%	1,3%
Anteil Regenerative gesamt	6,0%	8,0%	9,6%	14,1%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Bei der Modellierung mit dem Stoffstrom-Szenario-Generator (vgl. Kapitel 2.2.3) wurde eine höhere Auflösung der Strom-Prozesse als im BMU-Forschungsvorhaben „Ökologisch orientierter Ausbau der erneuerbaren Energien“ gewählt (DLR/IFEU/WI 2004), da hierzu die Basisdaten vorlagen.

Für Steinkohle wurden die Anteile von heimischer und importierter Kohle, für Braunkohle die von ost- und westdeutschen Anlagen sowie für alle Kohle- und Erdgas-Kraftwerke *zusätzlich die Altersverteilung* der Anlagen explizit modelliert¹²¹.

Die Stromerzeugung *aus Biomasse* verteilt sich in REFERENZ überwiegend auf Altholz sowie geringe Teile Deponie- und Klärgas sowie Klärschlamm (abnehmend bis 2030) bzw. Biogas aus Reststoffen (zunehmend bis 2030), wie die folgende Tabelle zeigt.

¹²¹ Modellintern wird über ein stock-exchange-Submodell dabei die Lebensdauer der schon existierenden Anlagen berücksichtigt und insoweit die Eingaben der Modell-Anwender intern korrigiert: „Lebt“ z.B. ein Kraftwerk, das schon im Jahr 2000 bestand, auch im Jahr 2010 oder 2020 noch, so wird dies vom Szenario-Generator bei der Berechnung einbezogen und nur die zusätzlichen Anteile aus Neuanlagen bereitgestellt. Die Lebensdauer-Daten werden bei der Übergabe der Daten aus GEMIS an das Szenario-Modell mitgeliefert. Die Einzeldaten finden sich im Anhangband (vgl. beigefügte CDROM).

Tabelle 143 Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario REFERENZ

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Biogas-Reststoffe	0,1	0,4	0,6	1,2
Deponie-, Klärgas/Schlamm	1,3	1,4	0,9	0,8
Waldholz	0,0	0,0	0,0	0,0
Altholz	0,4	1,7	4,4	5,7
Stroh	0,0	0,0	0,0	0,0
KUP/Miscanthus	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogas-Anbau	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	1,8	3,4	5,9	7,6

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Diese Aufteilung erfolgte nach der Logik der „minimalen Kosten“ – es wurden also jeweils die preisgünstigsten Bio-Stromprozesse herangezogen und deren Potenziale weitgehend ausgenutzt.

6.4.2 Stromerzeugung im Szenario UMWELT

In UMWELT wird der – durch Stromsparmaßnahmen gesenkte – Bedarf durch einen gegenüber REFERENZ erheblich gesteigerten Anteil von Regenerativen gedeckt. Die Annahmen zur Stromerzeugung (außer Biomasse) beruhen auf den aktualisierten Daten von DLR/IFEU/WI (2004), während für die Biomasse-Stromerzeugung *eigene Annahmen* verwendet wurden.

Tabelle 144 Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario UMWELT

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	170	140	42	0
Steinkohle	142	119	106	83
Braunkohle	151	104	74	49
Öl	5	5	6	5
Erdgas	55	81	108	123
Müll	4	4	5	5
Regenerative <i>ohne</i> Biomasse	32	71	130	179
Biomasse	2	9	25	40
Strom insgesamt	561	533	495	485
Anteil Regenerative o. Biomasse an gesamt	5,7%	13,3%	26,3%	37,0%
Anteil Bio an gesamt	0,3%	1,6%	5,0%	8,3%
Anteil Regenerative gesamt	6,0%	15,0%	31,3%	45,3%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse, andere nach DLR/IFEU/WI (2004)

Gegenüber REFERENZ sind hier die deutlich steigenden Anteile *aller Regenerativen* zu beachten sowie die durch Energieeffizienz um gut 20% *reduzierte* Stromerzeugung.

Die Anteile für die Regenerativen sowie die anderen Stromerzeuger wurden entsprechend der aktualisierten Daten aus dem BMU-Forschungsvorhaben „Ökologisch orientierter Ausbau der erneuerbaren Energien“ (DLR/IFEU/WI 2004) übernommen, wobei das dortige Szenario BASIS verwendet wurde.

Wie im REFERENZ-Szenario wurden auch hier im Rahmen des Stoffstrom-Projekts eine detailliertere Aufteilung des Kraftwerksparks nach Kohletypen und Altersstruktur der Kraftwerke vorgenommen (vgl. Anhangband auf beigefügter CDROM).

Für die fossilen und biogenen Stromtechnologien wurden dabei die über Lernkurven fortgeschriebenen Effizienz- und Kostendaten verwendet.

Für Solar-, Wind-, Wasser- und Geothermie-Kraftwerke wurden *ebenfalls* Lernkurven angesetzt, die Daten hierzu beruhen auf DLR/IFEU/WI (2004).

Bezogen auf die *biogene* Stromerzeugung zeigt sich folgende Struktur.

Tabelle 145 *Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario UMWELT*

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Biogas-Reststoffe	0,1	2,5	5,9	9,6
Deponie-, Klärgas/Schlamm	1,3	2,7	3,2	4,4
Waldholz	0,0	1,6	7,9	10,2
Altholz	0,4	1,9	5,3	6,6
Stroh	0,0	0,0	1,1	1,9
KUP/Miscanthus	0,0	0,0	1,2	7,7
Biogas aus Energiepflanzen	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	1,8	8,6	24,7	40,4

Vorrangig werden in UMWELT die biogenen *Reststoffe* aus der Landwirtschaft genutzt, die über Biogas in dezentralen BHKW mit Gasmotoren Strom liefern und dabei die Stoffkreisläufe weitestgehend schließen¹²².

Weiterhin wird *Rest- und Schwachholz aus der Forstwirtschaft* eingesetzt, wobei hier vor allem dezentrale KWK-Technologien auf Basis von Dampfmotoren und Gasmotoren mit kleineren Festbett- und mittleren Wirbelschichtvergaser Verwendung finden. Ab 2020 tragen zudem Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW mit Synthesegas aus Waldrestholz in nennenswertem Umfang zur Stromerzeugung bei.

Stroh als landwirtschaftlicher Reststoff wird nur in geringem Umfang in kleinen Dampfmotor-HKW eingesetzt, da hier die Umweltrestriktionen das Potenzial einschränken (vgl. Kapitel 5.2.1).

Im UMWELT-Szenario stehen durch die Restriktionen *beim Anbau von Biomasse* (vgl. Kapitel 5.7) nicht genügend Flächen zur Verfügung, um parallel zur Bio-Kraftstoff-Bereitstellung noch nennenswert Energiepflanzen für Strom (oder auch Wärme) anzubieten. Um die im Szenario verfügbaren Flächen möglichst effizient zu nutzen, wurden kleinere Beiträge aus *KUP-Holz* berücksichtigt, die in dezentralen Festbettvergäsern mit nachgeschaltetem Mikrogasturbinen-BHKW sowie in mittleren Wirbelschicht-Vergäsern mit Gasmotor-BHKW Strom und Wärme erzeugen. Zusätzlich wurden geringe Mengen an *Miscanthus* einbezogen, wofür die Mitverbrennung in kleineren Kohle-HKW angesetzt wurde.

¹²² Bei der Biogasproduktion werden die vergorenen Substrate wieder auf die Felder als Wirtschaftsdünger ausgebracht, so dass die Stoffbilanzen für Stickstoff und Spurenelemente wie Kalium, Kalzium und Phosphor weitestgehend geschlossen werden. Bei der Biogasgewinnung wird i.W. der Kohlenstoffanteil der Substrate zu Energie umgesetzt.

6.4.3 Stromerzeugung im Szenario BIOMASSE

In BIOMASSE wird der Anteil von Regenerativen (ohne Biomasse) gleich wie in UMWELT angesetzt, während für die Biomasse-Stromerzeugung eigene Annahmen verwendet wurden.

Tabelle 146 Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario BIOMASSE

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	170	140	42	0
Steinkohle	142	110	93	63
Braunkohle	151	98	64	35
Öl	5	5	5	5
Erdgas	55	81	108	112
Müll	4	4	5	5
Regenerative ohne Biomasse	32	71	130	179
Biomasse	2	24	47	86
Strom insgesamt	561	533	495	485
Anteil Regenerative o. Biomasse an gesamt	5,7%	13,4%	26,3%	37,0%
Anteil Bio an gesamt	0,3%	4,4%	9,5%	17,7%
Anteil Regenerative gesamt	6,0%	17,8%	35,9%	54,7%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse und fossile Erzeugung; andere Regenerative und Atomstrom nach DLR/IFEU/WI (2004)

Die Stromerzeugung basiert im ersten Schritt auf der Struktur des UMWELT-Szenarios, wurde dann jedoch aufgrund der in BIOMASSE möglichen höheren biogenen Erzeugung angepasst. Dabei wurden die Anteile von Stein- und Braunkohle entsprechend der höheren biogenen Stromerzeugung reduziert, während die anderen Regenerativen gleich wie in UMWELT belassen wurden.

Tabelle 147 Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario BIOMASSE

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Biogas-Reststoffe	0,1	2,8	5,8	10,6
Deponie-, Klärgas/Schlamm	1,3	2,5	2,7	3,7
Waldholz	0,0	5,3	14,9	19,9
Altholz	0,4	4,0	6,2	8,1
Stroh	0,0	0,5	4,2	7,8
KUP/Miscanthus	0,0	3,2	5,9	9,2
Biogas aus Energiepflanzen	0,0	5,3	7,4	26,7
Summe	1,8	23,7	47,2	86,0

Die biogene Stromerzeugung in BIOMASSE ist gut doppelt so hoch wie in UMWELT – dies liegt in erster Linie an den deutlich höheren Potenzialen, aber in zweiter Linie auch am verstärkten Einsatz hocheffizienter (aber auch in 2030 noch teurer) Stromprozesse.

Diesem Erzeugungsmix liegen folgende Annahmen zugrunde:

Bei Biogas aus Reststoffen wird das in BIOMASSE höhere Potenzial ausgenutzt, während bei Deponie- und Klärgas hier das Potenzial etwas geringer ist – dafür steht aber mehr Klärschlamm zur Verfügung, dessen Anteil sich gegenüber UMWELT fast verdoppelt.

Bei *Waldholz* ist das Potenzial im BIOMASSE-Szenario ebenfalls höher und wird entsprechend genutzt. Hinzu kommt, dass rund $\square$ des Stroms aus Waldholz auch aus *Mitverbrennung* in mittelgroßen Kohle-Heizkraftwerken (Industrie, größere Städte) angenommen wurde¹²³. Ergänzend wird Waldholz statt in kleinen Dampfmotor-BHKW und Gasmotor-BHKW mit vorgeschalteten Festbettvergasern in effizienteren (aber teureren) GuD-Heizkraftwerken mit vorgeschalteter Druck-WSF-Vergasung eingesetzt.

Ähnlich wird bei *Altholz* im BIOMASSE-Szenario die Mitverbrennung in Kohle-HKW anstelle der dezentralen Dampfmotor-BHKW verwendet und insgesamt mehr Altholz eingesetzt.

Bei *Stroh* wird das gegenüber UMWELT höhere Potenzial ab 2020 vor allem durch die innovativen Brennstoffzellen-BHKW mit Synthesegas zur Stromerzeugung genutzt, auch wenn dies (leicht) teurer ist als das Dampfmotor-BHKW im UMWELT-Szenario.

Durch das gegenüber UMWELT *deutlich* höhere Potenzial an Flächen für *Energiepflanzen* kann im BIOMASSE-Szenario parallel zur Bio-Kraftstoffbereitstellung auch noch ein erheblicher Anteil an Strom aus Anbaubiomasse erzeugt werden.

Hier setzt das BIOMASSE-Szenario wiederum auf die Mitverbrennung von KUP-Holz und – etwa dreifach höher als in UMWELT – auch Miscanthus und nutzt mit über 5 % der Stromerzeugung *vor allem die Feuchtgutlinie mit Biogas-BHKW*, die in UMWELT aus Mangel an Flächen nicht eingesetzt wird.

Diese starke Bevorzugung von Biogas aus Feuchtgut beruht darauf, dass diese Anbauvariante eine vergleichsweise hohe Beschäftigung bei längerfristig günstigen Kosten und geringen Emissionen erlaubt. Zudem sind hier – wie bei Biogas aus landwirtschaftlichen Reststoffen – die Stoffkreisläufe weitestgehend geschlossen.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich von UMWELT und BIOMASSE, dass in ersterem etwa 10 % des biogenen Stroms durch Mitverbrennung und 90 % durch eher dezentrale KWK-Systeme erzeugt werden, während in BIOMASSE der Mitverbrennungsanteil bei knapp 20 % liegt und die dezentralen KWK-Systeme „nur“ 80 % des Stroms bereitstellen – aber in absoluten Werten sind dies gut 69 TWh im Vergleich zu 37 TWh in UMWELT.

¹²³ Dagegen wurde im UMWELT-Szenario die Mitverbrennung nur für sehr geringe Anteile von Miscanthus in kleineren Kohle-HKW angenommen.

6.4.4 Stromerzeugung im Szenario NACHHALTIG

In NACHHALTIG wird der Anteil von Regenerativen (ohne Biomasse) gleich wie in UMWELT und BIOMASSE angesetzt, während die biogene Stromerzeugung auf *eigenen* Annahmen beruht.

Tabelle 148 *Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario NACHHALTIG*

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Atomenergie	170	140	42	0
Steinkohle	142	111	99	73
Braunkohle	151	101	67	35
Öl	5	5	5	5
Erdgas	55	81	108	111
Müll	4	4	5	5
Regenerative ohne Biomasse	32	71	130	179
Biomasse	2	19	40	77
Anteil Regenerative o. Biomasse an gesamt	5,7%	13,4%	26,3%	37,0%
Anteil Bio an gesamt	0,3%	3,5%	8,0%	15,9%
Anteil Regenerative gesamt	6,0%	16,8%	34,3%	52,8%

Quelle: eigene Berechnungen für Biomasse und fossile Erzeugung; andere Regenerative und Atomstrom nach DLR/IFEU/WI (2004)

Durch die gegenüber BIOMASSE etwas geringere biogene Stromerzeugung liegt der Steinkohle-Anteil etwas höher, ansonsten ist der Erzeugungsmix fast gleich.

Bezogen auf die Struktur der biogenen Stromerzeugung zeigt sich folgender Mix:

Tabelle 149 *Biogene Stromerzeugung inkl. KWK im Szenario NACHHALTIG*

Strom [TWh] aus	2000	2010	2020	2030
Biogas-Reststoffe	0,1	2,7	5,7	10,6
Deponie-, Klärgas/Schlamm	1,3	1,9	1,7	1,8
Waldholz	0,0	3,2	8,9	14,8
Altholz	0,4	3,5	5,0	6,3
Stroh	0,0	1,3	3,0	2,9
KUP/Miscanthus	0,0	1,9	5,0	8,5
Biogas aus Energiepflanzen	0,0	4,1	10,4	32,0
Summe	1,8	18,6	39,6	76,9

Gegenüber BIOMASSE sind die „umweltkritischen“ Anteile aus Klärschlamm und Altholz sowie Stroh reduziert und liegen auf dem Niveau von UMWELT.

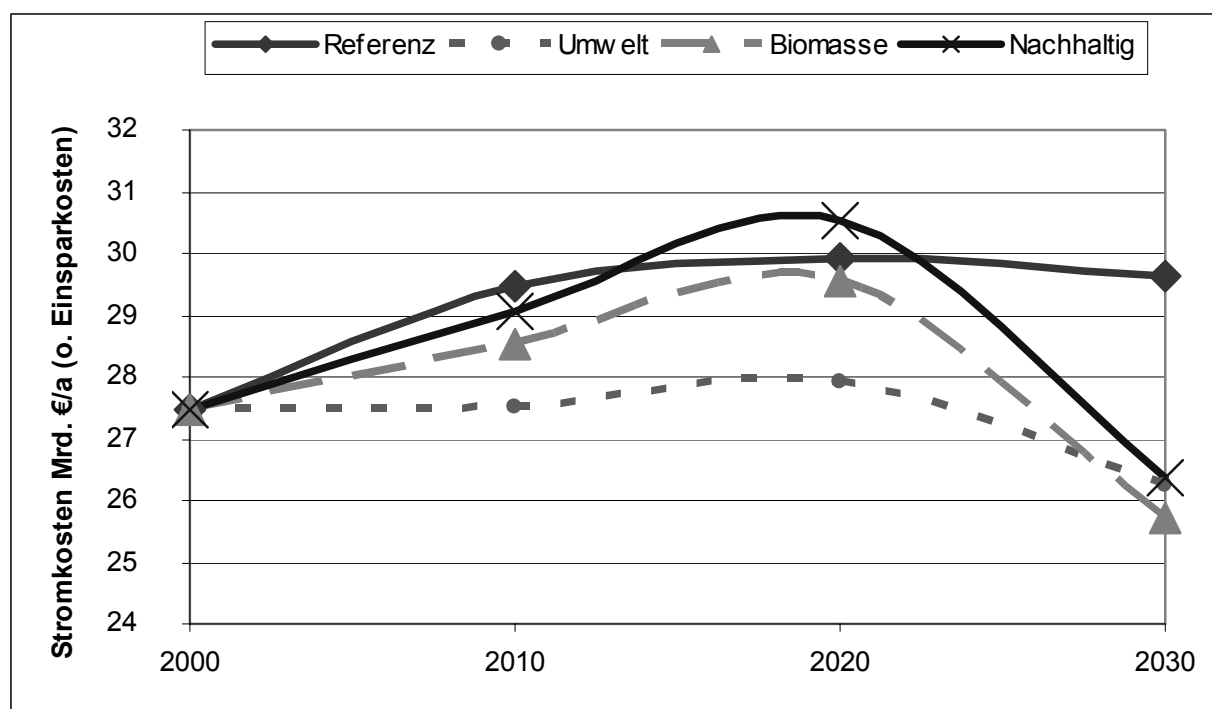
Für Biogas aus Reststoffen entspricht das Szenario den Werten in BIOMASSE, während bei den Energiepflanzen die KUP/Miscanthus-Anteile zu Gunsten der Feuchtgutlinie mit Biogas reduziert wurden. Grund hierfür ist, dass letztere etwas kostengünstiger sind und gegenüber der Verbrennung von KUP/Miscanthus geschlossene Stoffkreisläufe erlauben.

Bezogen auf die Bereitstellungstechnologien verfolgt NACHHALTIG die Strategie, stärker auf innovative und dezentrale Verfahren zu setzen, wobei erstere – vor allem die Vergasungsprozesse mit Druck - etwas langsamer als in BIOMASSE eingeführt werden. Im NACHHALTIG-Szenario wird *keine* Mitverbrennung unterstellt.

6.4.5 Ergebnisübersicht zur Strombereitstellung in den Szenarien

Die folgende Abbildung zeigt die Gesamtkosten für die Stromerzeugung in den Szenarien als Übersicht.

Bild 49 Kosten für die Strombereitstellung in den Szenarien

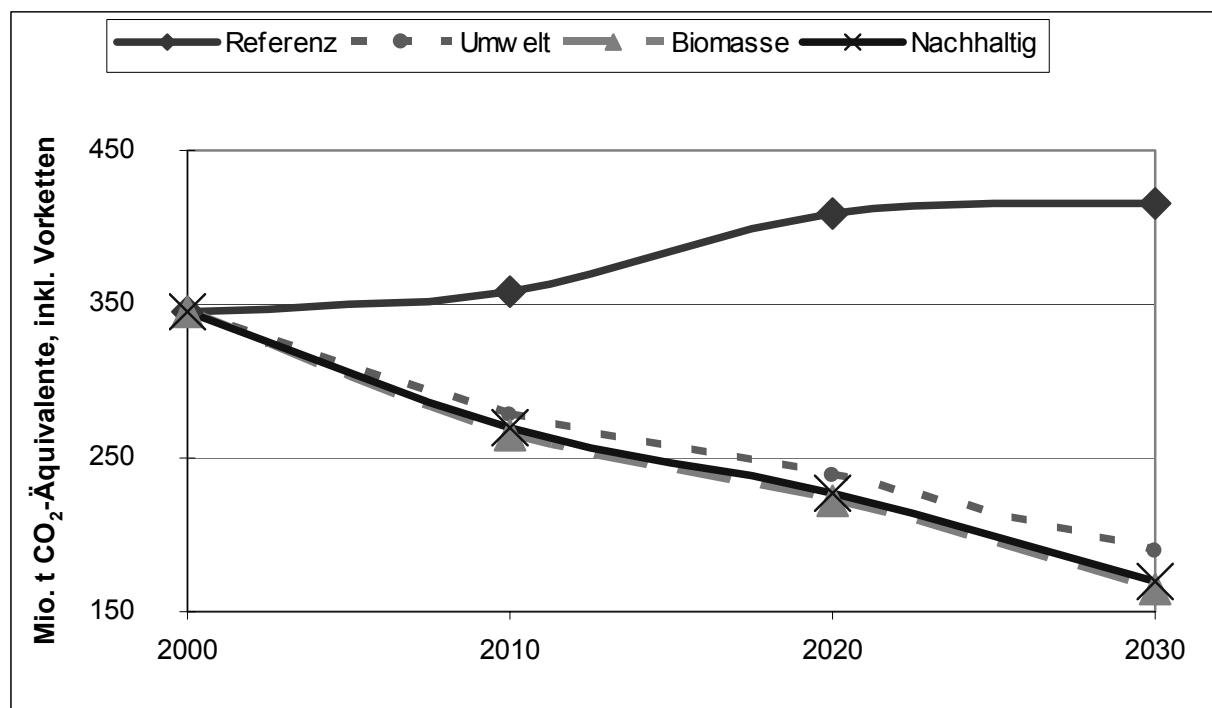


Diese Grafik zeigt deutlich, dass bis 2010 die Kosten sehr eng beieinander liegen, während danach die Kosten des NACHHALTIG-Szenarios bis ca. 2025 über denen von REFERENZ liegen. Grund hierfür ist der hohe Anteil an vergleichsweise teuren Investitionen in KWK-Systeme, deren Kosten *modellseitig voll* auf die Stromseite gerechnet wurden (zum dadurch erreichten Entlastungseffekt bei der Wärme siehe unten Kapitel 6.5).

In *allen* Maßnahme-Szenarien sinken die Kosten der Stromerzeugung bis 2030 ab, da bis dahin der „Umbau“ in Richtung Erneuerbare weitestgehend stattfand und in REFERENZ die langsam steigenden Brennstoffkosten zum Tragen kommen.

Bild 50

Treibhausgasemissionen der Strombereitstellung in den Szenarien



THG-Emissionen inkl. Auslandsanteile der Vorketten (z.B. aus Ölförderung, Gaspipelines)

Durch die massiven Investitionen in Regenerative (und Energieeffizienz) in den Maßnahme-Szenarien sinken die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung drastisch – und dies, obwohl die Emissionen der stark anwachsenden KWK komplett der Stromseite zugerechnet wurden.

Grund hierfür sind die sehr geringen spezifischen Emissionen der Regenerativen, deren Anteil ja parallel zur KWK ebenfalls deutlich steigt, und der deutliche Rückgang des Kohleinsatzes in allen Maßnahme-Szenarien.

In REFERENZ steigen die Treibhausgase ab 2010 wieder an, da hier der Ersatz für auslaufende Atomstromerzeugung überwiegend durch Importkohle- und Erdgas-GuD-Kraftwerke stattfindet.

6.5 Ergebnisse für Wärme

Der zweite Sektor der Energiebereitstellung betrifft die Wärme für alle Verbraucher, also Heizung, Warmwasser und Prozesswärme (Kochen, Trocknung, industrielle Prozesse usw.).

Hier erfolgte eine *vereinfachte* Abbildung der real sehr komplexen Erzeugungsstrukturen durch „typische“ Wärmeerzeuger im Bereich Haushalte/Kleinverbraucher (vorwiegend Heizungen bzw. Nahwärme) und im Bereich Industrie (vorwiegend größere Kessel).

Auch für die Wärme wurden Daten aus DLR/IFEU/WI (2004) verwendet, um die Kompatibilität der BMU-geförderten Projekte untereinander zu erhöhen.

Im Stoffstrom-Modell wird die genutzte *Abwärme aus den KWK-Prozessen* zur Stromerzeugung in den Wärmesektor (abzüglich Wärmeverteilungsverluste) gebucht, wobei die gesamten Kosten und Emissionen sowie Arbeitsplätze beim Strom bilanziert werden – die KWK-Abwärme ist somit „kostenlos“ verfügbar.

Bei Nahwärme aus Heizwerken werden dagegen die Vollkosten für die Bereitstellung (sowie die Emissionen und Beschäftigten) inkl. Wärmenetzen dem Wärmesektor zugerechnet.

6.5.1 Wärmebereitstellung im Szenario REFERENZ

Die aus DLR/IFEU/WI (2004) übernommene Nachfrage und Erzeugungsstruktur für Wärme zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 150 Wärmebereitstellung im Szenario REFERENZ

Energieträger	2000	2010	2020	2030
Heizöl	1.739	1.658	1.662	1.458
Erdgas	2.867	2.687	2.753	2.786
Kohle	455	340	280	268
Strom	587	588	577	562
Regenerative o. Biomasse	7	19	24	42
Biomasse inkl. KWK-Wärme	142	235	235	250
Wärme insgesamt	5.797	5.527	5.531	5.365
Anteil Regenerative o. Biomasse	0,1%	0,3%	0,4%	0,8%
Anteil Biomasse	2,5%	4,2%	4,2%	4,7%
Anteil Regenerative gesamt	2,6%	4,6%	4,7%	5,5%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Der relativ hohe Erdöl- und Erdgasanteil wird in REFERENZ auch langfristig erhalten bleiben, während der Kohleanteil deutlich zurückgeht. Strom bleibt fast konstant, Biomasse kann bei geringem Ausgangsniveau ihren Beitrag verdoppeln. Die anderen Erneuerbaren wachsen ebenfalls deutlich, jedoch bei geringen absoluten Anteilen.

Bei den fossilen Heizsystemen wurden *keine* Lernkurven unterlegt, da hier das Entwicklungspotenzial als gering eingeschätzt und die Marktentwicklung insgesamt rückläufig sein wird.

Bei den regenerativen Heizsystemen Solar-Kollektor und Geothermie-Heizwerk wurden ebenfalls *keine* Lernkurven angesetzt. Geothermie und Solarwärme spielen – ähnlich wie Biomasse – zwar mit deutlich steigenden Anteilen eine gewisse Rolle, ihre absoluten Beiträge bleiben jedoch im REFERENZ-Szenario vergleichsweise gering.

Die Nahwärme aus fossilen Energieträgern wird etwa konstant bleiben, während biogene KWK-Abwärme sich – bei geringem Ausgangsniveau – knapp verdreifacht.

Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der biogenen Wärmebereitstellung.

Tabelle 151 Biogene Wärmebereitstellung im Szenario REFERENZ

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Bio-KWK-Wärme	7,6	17,0	18,4	19,1
Holz-Hzg	86,4	96,7	96,2	97,6
Holz-Nahwärme	45,2	60,8	69,1	80,4
KUP-Hzg/HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Miscanthus-HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Stroh-Hzg/HW	0,0	48,1	37,6	39,1
Tiermehl/fett	2,9	12,2	13,5	13,9
Summe	142,1	234,7	234,9	250,2

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Bei der biogenen Wärmebereitstellung wird in REFERENZ vor allem die Nahwärme aus Holz und Stroh zulegen sowie die industrielle Prozesswärme aus der Mitverbrennung von Zoomasse (Tiermehl/Tierfett) in Zementwerken.

Keine Bedeutung haben in REFERENZ die Energiepflanzen, da sie auch bis 2030 kaum konkurrenzfähige Wärmepreise zeigen.

6.5.2 Wärmebereitstellung im Szenario UMWELT

In UMWELT wird der – durch Energieeffizienz deutlich gesenkte – Wärmebedarf durch einen gegenüber REFERENZ erheblich gesteigerten Anteil von Regenerativen gedeckt. Die Annahmen zur Wärmebereitstellung beruhen auf den aktualisierten Daten von DLR/IFEU/WI (2004), während für die direkte biogene Wärmebereitstellung *eigene Annahmen* verwendet wurden.

Tabelle 152 Wärmebereitstellung im Szenario UMWELT

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Heizöl	1.739	1.380	1.025	632
Erdgas	2.867	2.719	2.484	2.233
Kohle	455	215	150	100
Strom	587	518	456	401
Regenerative o. Biomasse	7	34	161	475
Biomasse inkl. KWK-Wärme	142	189	230	255
Wärme insgesamt	5.797	5.056	4.506	4.096
Anteil Regenerative o. Biomasse	0,1%	0,7%	3,6%	11,6%
Anteil Biomasse	2,5%	3,7%	5,2%	6,5%
Anteil Regenerative gesamt	2,6%	4,4%	8,7%	18,1%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Gegenüber REFERENZ sind hier die deutlich steigenden Anteile *aller Regenerativen* zu beachten sowie die durch Energieeffizienz um 24 % *reduzierte* Wärmebereitstellung.

Die Anteile für die Regenerativen sowie die anderen Wärmeerzeuger wurden entsprechend der aktualisierten Daten aus DLR/IFEU/WI (2004) übernommen, wobei das dortige Szenario BASIS verwendet wurde.

Wie im REFERENZ-Szenario wurden auch hier im Rahmen des Stoffstrom-Projekts eine detailliertere Aufteilung von Kohleinsatz und Altersstruktur vorgenommen.

Durch den höheren Anteil der Regenerativen kann gegenüber REFERENZ der Einsatz fossiler Heizsysteme deutlich gesenkt werden – insbesondere im Bereich Heizöl, Kohle und z.T. Strom. Dagegen steigt aufgrund der höheren Anteile von biogener KWK-Abwärme der Anteil der fossilen Heizwerke (zur Abdeckung der Spitzenlast) gegenüber REFERENZ an.

Geothermie erzielt bis 2030 mit einer mehr als 600 %-Steigerung die höchsten relativen Zuwächse gegenüber REFERENZ, aber auch die Solarwärme aus Kollektoren kann gegenüber REFERENZ verzehnfacht werden. Ähnlich dramatisch steigt die biogene KWK-Abwärme.

Die Verteilung der direkten biogenen Wärmeerzeugung gibt folgende Tabelle wieder.

Tabelle 153 Biogene Wärmebereitstellung im Szenario UMWELT

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Bio-KWK-Wärme	7,6	44,1	123,1	167,5
Holz-Hzg	86,4	85,9	53,6	49,3
Holz-Nahwärme	45,2	40,4	35,8	23,7
KUP-Hzg/HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Miscanthus-HW	0,0	2,5	2,2	2,0
Stroh-Hzg/HW	0,0	5,1	4,5	2,8
Tiermehl/fett	2,9	11,1	10,9	10,3
Summe	142,1	189,1	230,2	255,4

Diese Darstellung zeigt, dass in UMWELT zwar absolut der Beitrag der biogenen Wärme in 2030 (255 PJ) fast gleich ist wie in REFERENZ (250 PJ), jedoch die Struktur sich stark ändert:

Gegenüber REFERENZ verzehnfacht sich die biogene KWK-Wärme, während die Anteile der direkten biogenen Wärmeerzeugung aus Holz und Stroh stark reduzieren. Neu hinzu kommen – allerdings geringe – Anteile von Nahwärme aus Energiepflanzen (KUP/Miscanthus), dagegen spielt Stroh nur eine sehr geringe Rolle. Tiermehl und Tierfett werden in leicht reduziertem Umfang eingesetzt, da im Szenario insgesamt die Bautätigkeit geringer ist und somit auch Zementwerke weniger Einsatzmöglichkeiten bieten.

Die Bedeutung der biogenen Heizsysteme sinkt in UMWELT bis 2030 auf zusammen knapp 1,4 % des Wärmebedarfs (REF: 2,1 %), während biogene Nahwärme plus KWK-Abwärme zusammen auf 5,1 % anwachsen (REF: 2,3 %). Dies unterstreicht die große Bedeutung der Nah- und Fernwärmenetze für die Wärmebereitstellung in UMWELT.

6.5.3 Wärmebereitstellung im Szenario BIOMASSE

In BIOMASSE wird wie beim Strom auch für die Wärme der Anteil von Regenerativen (ohne Biomasse) gleich dem in UMWELT angesetzt, während für die Biomasse-Wärmebereitstellung eigene Annahmen verwendet wurden.

Tabelle 154 Wärmebereitstellung im Szenario BIOMASSE

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Heizöl	1.739	1.380	1.011	596
Erdgas	2.867	2.719	2.484	2.233
Kohle	455	203	146	96
Strom	587	518	437	324
Regenerative o. Biomasse	7	34	161	475
Biomasse inkl. KWK-Wärme	142	202	267	372
Wärme insgesamt	5.797	5.055	4.506	4.096
Anteil Regenerative o. Biomasse	0,1%	0,7%	3,6%	11,6%
Anteil Biomasse	2,5%	4,0%	6,0%	9,4%
Anteil Regenerative gesamt	2,6%	4,7%	9,5%	21,0%

Die Wärmebereitstellung basiert im ersten Schritt auf der Struktur des UMWELT-Szenarios, wurde dann jedoch aufgrund der in BIOMASSE möglichen höheren biogenen Erzeugung angepasst.

Dabei wurden die Anteile von Stein- und Braunkohle sowie Heizöl und teilweise Strom und Erdgas entsprechend der höheren biogenen Wärmeanteilen reduziert, während die anderen Regenerativen gleich wie in UMWELT belassen wurden.

Für die biogene Wärme, die wiederum insbesondere biogene KWK-Abwärme umfasst, zeigt die folgende Tabelle die Aufteilung auf Bio-Energieträger.

Tabelle 155 Biogene Wärmebereitstellung im Szenario BIOMASSE

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Bio-KWK-Wärme	7,6	115,2	216,4	311,7
Holz-Hzg	86,4	54,6	39,1	46,5
Holz-Nahwärme	45,2	22,2	0,0	0,0
KUP-Hzg/HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Miscanthus-HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Stroh-Hzg/HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Tiermehl/fett	2,9	10,1	11,2	13,4
Summe	142,1	202,1	266,7	371,7

Das Szenario BIOMASSE führt bis 2030 zu einer Steigerung der biogenen KWK-Abwärme gegenüber UMWELT von gut 50 %, parallel setzt es kein Stroh und keine Energiepflanzen ein. Auch auf klassische Nahwärme aus Holz wird in BIOMASSE zu Gunsten der biogenen KWK verzichtet, nur Holzheizungen (vorwiegend mit Pellets) sind als dezentrale Einzelsysteme etwa im Umfang wie in UMWELT vertreten.

Insgesamt setzt das Szenario BIOMASSE im Wärmesektor vorwiegend auf biogene KWK-Abwärme, während Einzelheizungen nur für Industrierestholz-Pellets Bedeutung haben. Stroh und Energiepflanzen werden nicht zur dezentralen Wärmebereitstellung verwendet, sondern dienen über die KWK-Stromerzeugung als „Abwärme“-Lieferanten.

6.5.4 Wärmebereitstellung im Szenario NACHHALTIG

In NACHHALTIG wird der Anteil von Regenerativen (ohne Biomasse) gleich wie in UMWELT und BIOMASSE angesetzt, während die biogene Wärmebereitstellung auf *eigenen* Annahmen beruht.

Tabelle 156 Wärmebereitstellung im Szenario NACHHALTIG

Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Heizöl	1.739	1.380	1.011	596
Erdgas	2.867	2.719	2.484	2.307
Kohle	455	203	146	96
Strom	587	509	415	255
Regenerative o. Biomasse	7	34	161	475
Biomasse inkl. KWK-Wärme	142	210	288	367
Wärme insgesamt	5.797	5.055	4.506	4.096
Anteil Regenerative o. Biomasse	0,1%	0,7%	3,6%	11,6%
Anteil Biomasse	2,5%	4,2%	6,5%	9,3%
Anteil Regenerative gesamt	2,6%	4,8%	10,0%	20,9%

Auf der Wärmeseite entspricht NACHHALTIG fast genau dem Szenario BIOMASSE, es weist bis 2030 nur minimal geringere biogene Wärmeanteile auf (9,3% statt 9,4% in BIOMASSE). In der *Struktur* der biogenen Wärmebereitstellung (vgl. Tabelle unten) liegt NACHHALTIG zwischen UMWELT und BIOMASSE.

Tabelle 157 Biogene Wärmebereitstellung im Szenario NACHHALTIG

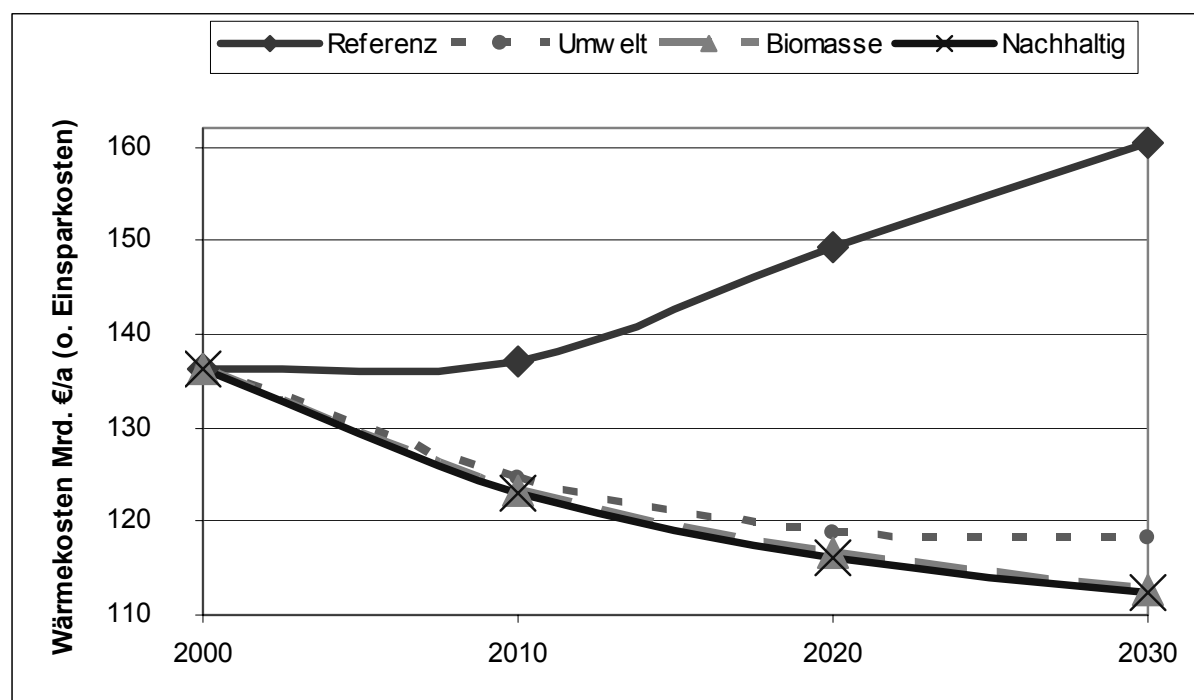
Angaben in [PJ]	2000	2010	2020	2030
Bio-KWK-Wärme	7,6	101,6	203,5	286,2
Holz-Hzg	86,4	58,1	38,0	47,3
Holz-Nahwärme	45,2	35,4	31,3	15,8
KUP-Hzg/HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Miscanthus-HW	0,0	0,0	0,0	0,0
Stroh-Hzg/HW	0,0	5,1	4,5	3,9
Tiermehl/fett	2,9	10,1	11,2	13,4
Summe	142,1	210,2	288,4	366,7

Der gegenüber BIOMASSE etwas geringere biogene KWK-Anteil wird durch einen höheren Anteil von Holz-Nahwärme kompensiert, hinzukommen geringe Mengen an Stroh in (größeren) Heizsystemen.

6.5.5 Ergebnisübersicht zur Wärmebereitstellung in den Szenarien

Wie zuvor beim Strom fassen die folgenden Abbildungen die Gesamteffekte der Szenarien im Bereich Wärme zusammen. Zu beachten ist hier stets, dass die Kosten und Emissionen der KWK-Wärme modellseitig auf der Stromseite bilanziert werden.

Bild 51 Kosten für die Wärmebereitstellung in den Szenarien



Angaben ohne Kosten für Energieeinsparung

Die Kostenbilanz für Wärme zeigt eine *spiegelbildliche* Entwicklung zum Strom: Durch die in den Maßnahme-Szenarien steigenden KWK-Anteile reduzieren sich die Ausgaben für Wärme deutlich, wobei dies zusätzlich durch die Kostensenkung durch Energieeffizienz überlagert wird.

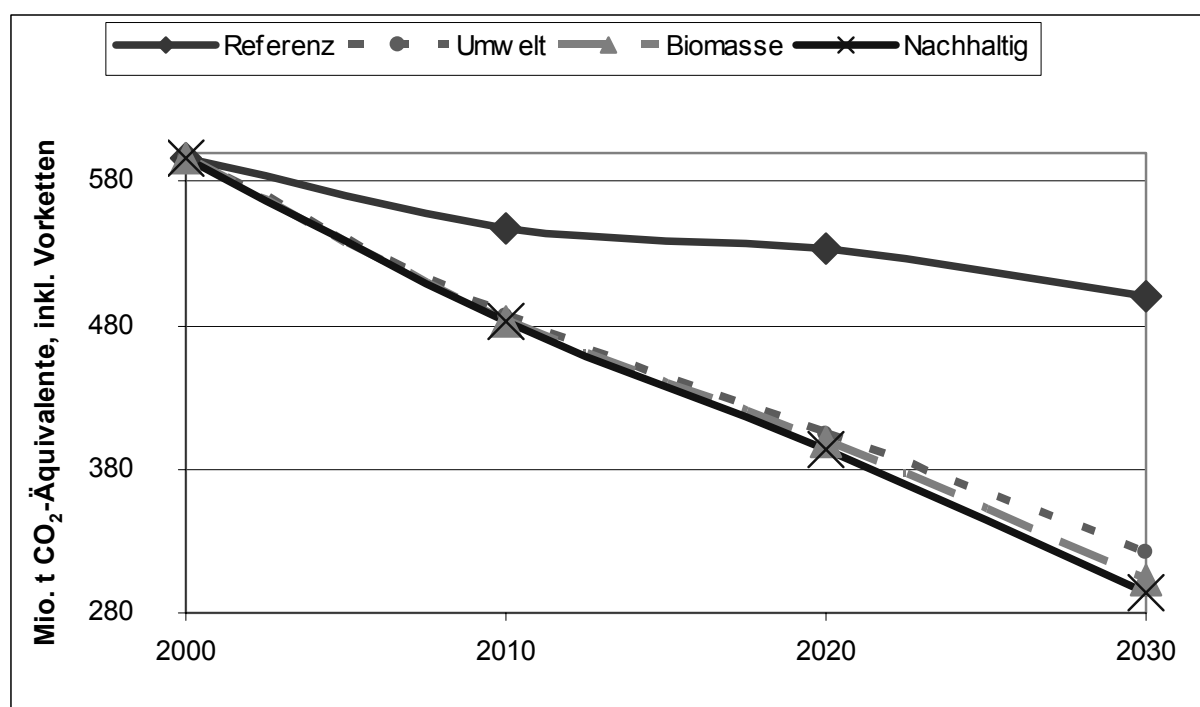
Demgegenüber steigen die Ausgaben für Wärme im REFERENZ-Szenario deutlich an, da hier weiterhin auf die – sich bis 2030 moderat verteuernenden – fossilen Energieträger gesetzt wird (insb. Erdgas).

Durch die höheren KWK-Anteile in BIOMASSE und NACHHALTIG ist die Kostensenkung gegenüber UMWELT im Wärmesektor ebenfalls deutlich sichtbar. Entscheidend ist dabei, dass das Saldo zwischen dem Strom- und Wärmesektor in BIOMASSE und NACHHALTIG positiv ist, also die Einsparungen auf der Wärmeseite die Mehrausgaben für die KWK-Stromerzeugung deutlich überkompensieren.

Hinsichtlich der Emissionen von Treibhausgasen ergibt sich für die Wärmebereitstellung eine Entwicklung ähnlich der im Stromsektor.

Bild 52

Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung in den Szenarien



THG-Emissionen inkl. Auslandsanteile der Vorketten (z.B. aus Ölförderung, Gaspipelines)

Außer REFERENZ führen alle Szenarien zu drastischen Einsparungen, die auf den geringen Emissionen der Regenerativen, dem Einsatz der Energieeffizienz und der Verdrängung von Kohle und Öl sowie teilweise Erdgas beruhen.

6.6 Ergebnisse zum Verkehr

Im Verkehrssektor wurde im Projekt nur der Einsatz biogener Kraftstoffe *im Personenverkehr* angenommen, da für den Güterverkehr keine besonderen Biomasse-Technologien zur Verfügung stehen und die Diesel- und Benzin-Substitution durch Biokraftstoffe sich auf den Personenverkehr mit Pkw konzentriert.

Das Modell bildet dennoch den gesamten Verkehr (Personen und Güter) ab, allerdings wird hinsichtlich des Güterverkehrs nur zwischen REFERENZ und UMWELT unterschieden.

Die Szenario-Modellierung im Verkehr erfolgte wie in den anderen Sektoren ausgehend von Daten aus DLR/IFEU/WI (2004). Das Szenario UMWELT basiert auf dem dort entwickelten BASIS-Szenario, jedoch wurden die biogenen Anteile in BIOMASSE und NACHHALTIG variiert.

Wie bei Strom und Wärme wurde dabei ergänzend eine Detaillierung der Altersstruktur der Fahrzeugparks für Bahn, Flugzeuge, Lkw und Pkw unterlegt und nur bei Bussen und den wenig bedeutsamen Erdgas- und H₂-Fahrzeugen vereinfacht mit jeweils *nur einem* Datensatz für alle Szenarien und Zeitpunkte gerechnet.

Die Verkehrstechnologien wurden dabei in ihrer Energieeffizienz an die Entwicklungen des REFERENZ-Szenarios aus DLR/IFEU/WI (2004) angelegt, während in UMWELT die - deutlich erhöhten - Effizienzdaten basierend auf dem dortigen BASIS-Szenario angesetzt wurden.

Bei den biogenen Kraftstoff- und Strom-Vorketten wurden die jeweiligen Lernkurven für die Technologien (Kraftwerke, biogene Kraftstoffbereitstellung) angenommen und die Kosten für die Kraftstoffe szenariospezifisch angesetzt. Bei den Öl- und Erdgas-Vorketten für die Kraftstoffe (Benzin, Diesel, CNG usw.) wurden dagegen keine Lernkurven angenommen, da sich die dortigen künftigen Verbesserungen mit steigenden spezifischen Aufwänden weitestgehend kompensieren.

6.6.1 Verkehr im Szenario REFERENZ

Das REFERENZ-Szenario für den Personenverkehr zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 158 Personenverkehr im Szenario REFERENZ

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
Bahn	78,4	84,0	79,7	79,7
Bus	80,3	86,2	84,2	82,0
Flugzeug	33,9	48,0	54,6	60,4
Pkw-Diesel	152,0	211,7	261,7	295,0
Pkw-Benzin	614,7	648,1	628,2	561,5
Pkw-Erdgas	4,8	6,5	14,8	21,6
Pkw-BZ-H2	0,0	0,0	0,0	4,6
Pkw-Bio	3,9	6,5	14,8	34,2
Anteil Pkw-Bio	0,40%	0,60%	1,30%	3,00%
Anteil Bio an MIV	0,50%	0,75%	1,61%	3,73%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Der Anteil von Bahn/Bussen bleibt praktisch konstant, während der Flugverkehr sich fast verdoppelt. Diesel-Pkw nehmen deutlich zu, während der Anteil der Benzin-Pkw leicht rückläufig ist. Pkw mit biogenen Kraftstoffen spielen in REFERENZ mit einem Anteil von nur 3 % bis 2030 kaum eine Rolle, untergeordnet sind auch Gas- und Wasserstoff-Pkw mit Brennstoffzellen (BZ).

Der biogene Kraftstoff-Anteil wird durch ein Mix von Rapsöl (1 %) und RME (2 %) bis 2030 gedeckt, alle anderen Biokraftstoffe sind nicht vertreten.

Tabelle 159 Anteile von Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario REFERENZ

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
BtL-Triticale	0	0	0	0
Rapsöl/RME	3,9	6,5	14,8	34,2
SB-Öl/SME	0	0	0	0
BtL-KUP-Pappel	0	0	0	0
BtL-Miscanthus	0	0	0	0
BioEtOH-Weizen	0	0	0	0
BioEtOH-ZR	0	0	0	0
BtL-Waldrestholz/Stroh	0	0	0	0
Summe	3,9	6,5	14,8	34,2

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Beim Güterverkehr zeigt die folgende Tabelle die künftige Entwicklung im Szenario REFERENZ. Hier erfolgt keine Nutzung von biogenen Kraftstoffen im Szenario.

Tabelle 160 Verteilung des Güterverkehrs im Szenario REFERENZ

Technologie	2000	2010	2020	2030
Zug-el-Güter REF-2000	16,3 %	10,0 %		
Zug-el-Güter REF-2010		5,4 %	2,5 %	
Zug-el-Güter REF-2020			12,0 %	6,0 %
Zug-el-Güter REF-2030				8,2 %
Schiff-Güter-Binnen	13,9 %	13,4 %	12,7 %	12,5 %
LKW_mittel REF-2000	69,8 %	35,0 %		
LKW_mittel REF-2010		36,2 %	18,0 %	
LKW_mittel REF-2020			54,8 %	27,4 %
LKW_mittel REF-2030				45,9 %

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

6.6.2 Verkehr im Szenario UMWELT

Im Szenario UMWELT werden einerseits energieeffizientere Fahrzeuge (Bahn, Lkw, Pkw) als in REFERENZ eingesetzt, andererseits steigen dort die Anteile von Pkw mit biogenen Kraftstoffen.

Die Verkehrsnachfrage selbst (Verkehrsleistung in P*km bzw. t*km) ist dagegen gleich, ebenso der modal split¹²⁴.

Für die biogenen Kraftstoffe wurde in UMWELT ein Zielwert von 5,75 % der gesamten Verkehrsleistung angesetzt, der sich an den EU-Vorgaben bis 2010 orientiert. Danach wurden die Anteile entsprechend der verfügbaren Anbauflächen für Bioenergieträger gesteigert.

Tabelle 161 Personenverkehr im Szenario UMWELT

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
Bahn	78,4	84,0	79,7	79,7
Bus	80,3	86,2	84,2	82,0
Flugzeug	33,9	46,4	51,2	55,8
Pkw-Diesel	152,0	177,8	250,4	230,6
Pkw-Benzin	614,7	621,9	586,1	557,5
Pkw-Erdgas	4,8	12,0	20,5	30,8
Pkw-BZ-H2	0,0	0,0	0,0	0,0
Pkw-Bio	3,9	62,7	66,0	102,5
Anteil Pkw-Bio	0,40%	5,75%	5,80%	9,00%
Anteil Bio an MIV	0,50%	7,17%	7,15%	11,12%

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

In UMWELT ändert sich der Fahrzeugpark gegenüber REFERENZ, indem sukzessive effizientere Fahrzeuge eingesetzt und Benzin/Diesel-Pkw partiell durch Fahrzeuge mit Biokraftstoffen ersetzt werden.

Bei den Pkw mit Biokraftstoffen wurde im Szenario UMWELT die folgende Verteilung angenommen.

¹²⁴ Beide Kenngrößen können im Modell szenariospezifisch variiert werden. Aufgrund der Kompatibilität mit DLR/IFEU/WI (2004) und den Schwerpunkten des Stoffstromprojekts wurde davon abgesehen, eigene Annahmen zu diesen verkehrspolitisch wichtigen Aspekten zu treffen. Dies bleibt künftigen Arbeiten vorbehalten.

Tabelle 162 Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario UMWELT

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
BtL-Triticale	0	0,0	0,0	5,7
Rapsöl/RME	3,9	46,4	34,1	28,5
SB-Öl/SME	0	0,0	0,0	14,2
BtL-KUP-Pappel	0	0,0	11,4	34,2
BtL-Miscanthus	0	0,0	5,7	17,1
BioEtOH-Weizen	0	16,4	14,8	8,5
BioEtOH-ZR	0	0	0	0
BtL-Waldrestholz/Stroh	0	0	0	0
Summe	3,9	62,7	66,0	102,5

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

Gegenüber REFERENZ geht der Anteil von Rapsöl bzw. RME bis 2030 leicht zurück, während Sonnenblumen-Öl (SB-Öl) bzw. Sonnenblumen-Methylester (SME) und Bioethanol aus Weizen leicht gewinnen. Deutliche Anteile gewinnen die Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe (BtL) aus vor allem KUP-Holz (Pappel) sowie teilweise Miscanthus und Triticale.

Aufgrund der Flächenrestriktionen wäre es in UMWELT nicht möglich, bis 2010 den Zielwert von 5,75% Anteil zu erreichen, wenn – wie in einer Szenario-Variante unterstellt – die Biokraftstoffe Biodiesel und Ethanol aus Ökoanbau stammen, da hier die Erträge zu gering sind.

Gegenüber REFERENZ kann in UMWELT bis 2030 aber eine sehr deutliche Steigerung auf über 9% der Personenverkehrsleistung bzw. über 11 % der Verkehrsleistung des Motorisierten Individual-Verkehrs (MIV) erreicht werden.

Beim *Güterverkehr* wurden in UMWELT „nur“ die effizienteren Fahrzeuge auf Grundlage des BASIS-Szenarios aus DLR/IFEU/WI (2004) angenommen, also *kein* zusätzlicher Einsatz biogener Kraftstoffe.

Tabelle 163 Verteilung des Güterverkehrs im Szenario UMWELT

Technologie	2000	2010	2020	2030
Zug-el-Güter REF-2000	16,3 %	10,0 %		
Zug-el-Güter UMW-2010		5,4 %	2,5 %	
Zug-el-Güter UMW-2020			12,0 %	6,0 %
Zug-el-Güter UMW-2030				8,2 %
Schiff-Güter-Binnen	13,9 %	13,4 %	12,7 %	12,5 %
LKW_mittel REF-2000	69,8 %	35,0 %	0,0 %	0,0 %
LKW_mittel UMW-2010		36,2 %	18,0 %	
LKW_mittel UMW-2020			54,8 %	27,4 %
LKW_mittel UMW-2030				45,9 %

Quelle: eigene Berechnungen nach DLR/IFEU/WI (2004)

6.6.3 Verkehr im Szenario BIOMASSE

In BIOMASSE kann gegenüber UMWELT aufgrund der höheren Potenziale – bei ansonst gleichen Fahrzeugeffizienzen – ein größerer Anteil der Personenverkehrsleistung über biogene Kraftstoffe bereitgestellt werden.

Tabelle 164 Personenverkehr im Szenario BIOMASSE

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
Bahn	78,4	84,0	79,7	79,7
Bus	80,3	86,2	84,2	82,0
Flugzeug	33,9	46,4	51,2	55,8
Pkw-Diesel	152,0	154,4	196,9	205,0
Pkw-Benzin	614,7	621,9	596,3	535,3
Pkw-Erdgas	4,8	10,9	17,1	30,8
Pkw-BZ-H2	0,0	0,0	0,0	0,0
Pkw-Bio	3,9	87,3	112,7	150,3
Anteil Pkw-Bio	0,40%	8,00%	9,90%	13,20%
Anteil Bio an MIV	0,50%	9,98%	12,21%	16,32%

Bio-Pkw erbringen in BIOMASSE bis 2030 rund 50 % mehr Verkehrsleistung als in UMWELT und bieten auch in den Jahren davor schon wesentlich höhere Beiträge.

Daher können in diesem Szenario auch wesentlich weniger fossile Kraftstoffe (Benzin, Diesel) eingesetzt werden als in UMWELT – bei Diesel etwa 10 % weniger und bei Benzin rund 5 % Reduktion (jeweils in 2030).

Tabelle 165 Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario BIOMASSE

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
BtL-Triticale	0	0,0	0,0	0,0
Rapsöl/RME	3,9	21,8	28,5	28,5
SB-Öl/SME	0	27,3	17,1	11,4
BtL-KUP-Pappel	0	5,5	11,4	22,8
BtL-Miscanthus	0	5,5	15,9	47,8
BioEtOH-Weizen	0	0,0	0,0	0,0
BioEtOH-ZR	0	21,8	34,1	34,2
BtL-Waldrestholz/Stroh	0	4,8	4,8	4,8
Summe	3,9	86,7	111,8	149,5

In BIOMASSE werden bei den biogenen Kraftstoffen gegenüber UMWELT vor allem deutlich mehr Miscanthus (als BtL) und Bioethanol aus Zuckerrüben eingesetzt, während die Beiträge von Raps und Sonnenblumen gleich sind und KUP-Pappelholz etwa um $\square$ weniger genutzt wird.

Der *Güterverkehr* wurde wie im Szenario UMWELT angesetzt, d.h. es wurden *keine* Fahrzeuge mit biogenen Kraftstoffen einbezogen.

6.6.4 Verkehr im Szenario NACHHALTIG

Wie in den anderen Sektoren ist auch im Verkehr das Szenario NACHHALTIG ein Mix von Elementen aus UMWELT und BIOMASSE. Beim Personenverkehr ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 166 Personenverkehr im Szenario NACHHALTIG

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
Bahn	78,4	84,0	79,7	79,7
Bus	80,3	86,2	84,2	82,0
Flugzeug	33,9	46,4	51,2	55,8
Pkw-Diesel	152,0	161,5	235,0	207,9
Pkw-Benzin	614,7	621,9	573,0	549,0
Pkw-Erdgas	4,8	12,0	20,5	30,8
Pkw-BZ-H2	0,0	0,0	0,0	0,0
Pkw-Bio	3,9	79,1	94,5	133,8
Anteil Pkw-Bio	0,40%	7,25%	8,30%	11,75%
Anteil Bio an MIV	0,50%	9,05%	10,23%	14,54%

Der Beitrag der Biokraftstoffe liegt in NACHHALTIG zwischen dem in UMWELT und BIOMASSE, wobei die Verteilung der Biokraftstoffe im Folgenden gezeigt ist.

Tabelle 167 Pkw mit biogenen Kraftstoffen im Szenario NACHHALTIG

Angaben in [Mrd. P*km]	2000	2010	2020	2030
BtL-Triticale	0	0,0	0,0	0,0
Rapsöl/RME	3,9	32,7	25,6	22,8
SB-Öl/SME	0	30,0	25,0	22,8
BtL-KUP-Pappel	0	2,2	17,1	45,6
BtL-Miscanthus	0	1,1	5,7	17,1
BioEtOH-Weizen	0	13,1	14,2	11,4
BioEtOH-ZR	0	0	0	0
BtL-Waldrestholz/Stroh	0	0,0	5,8	12,1
Summe	3,9	79,1	93,4	131,7

Gegenüber BIOMASSE wird eine Umverteilung von Raps zu Gunsten einer gleichen Gewichtung von Sonnenblumen (SB-Öl/SME) vorgenommen, bei Mehrjährigen wird der hohe Miscanthus-Anteil aus BIOMASSE im NACHHALTIG-Szenario auf das Niveau von UMWELT reduziert zu Gunsten von KUP-Pappelholz.

Entsprechend wird auch der Bioethanol-Anteil aus Zuckerrüben wie in UMWELT auf Null gesenkt und dafür mehr Bioethanol aus Weizen sowie Reststoffe (Waldholz, Stroh) als Kraftstoff über die BtL-Route eingesetzt.

Zudem ist die Nutzung von BtL in NACHHALTIG erst später als in BIOMASSE vorgesehen, um „vorsichtig“ hinsichtlich dieser noch recht spekulativen Technik zu sein.

Der Güterverkehr wurde wie im Szenario UMWELT angesetzt, d.h. es wurden *keine* Fahrzeuge mit biogenen Kraftstoffen einbezogen.

6.6.5 Ergebnisübersicht zum Verkehr in den Szenarien

In den Szenarien wurde der Personen- und Güterverkehr untersucht, wobei die Maßnahme-Szenarien vor allem bei dem Pkw im Personenverkehr ansetzen.

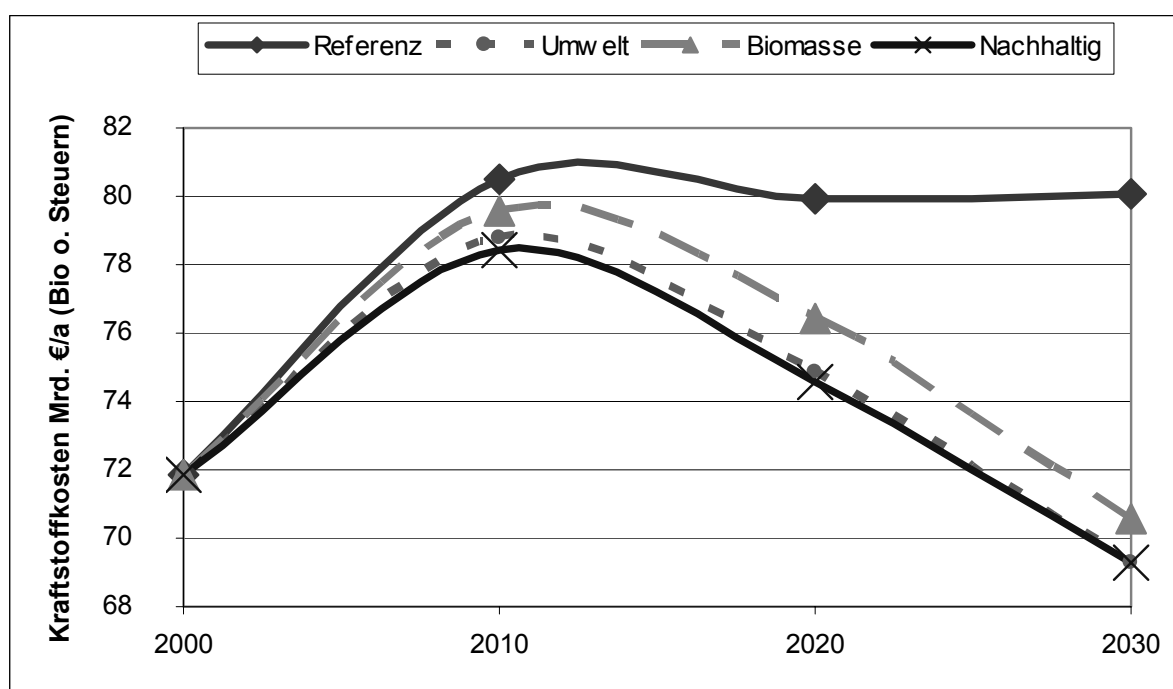
In allen Szenarien wurde eine erhöhte Effizienz aller Fahrzeuge sowie eine (leichte) Steigerung der Besetzungs- bzw. Beladungsgrade angenommen¹²⁵.

Die Modellierung erfolgte dabei so, dass in REFERENZ sowohl für den Pkw- wie auch Lkw-Verkehr eine mittlere Effizienzsteigerung pro Dekade in den jeweiligen Flotten angesetzt wurde, die in den Maßnahme-Szenarien etwas höher liegt.

Der Einsatz von Biokraftstoffen wurde aus Aufwandsgründen nur für die Pkw angenommen.

Die Ergebnisse für die Kraftstoffkosten in den Szenarien zeigt das folgende Bild.

Bild 53 Kosten für die Verkehrsdienstleistungen in den Szenarien



Kosten nur für Kraftstoffverbrauch, ohne Fahrzeug- und Wartungskosten, Biokraftstoffe ohne Steuern

Die Kosten für den Verkehr steigen aufgrund der steigenden Dienstleistungsbereitstellung und der – geringfügig – steigenden Kraftstoffkosten bis 2010 in allen Szenarien deutlich an, danach verbleiben sie in REFERENZ in etwa auf dem gleichen Niveau.

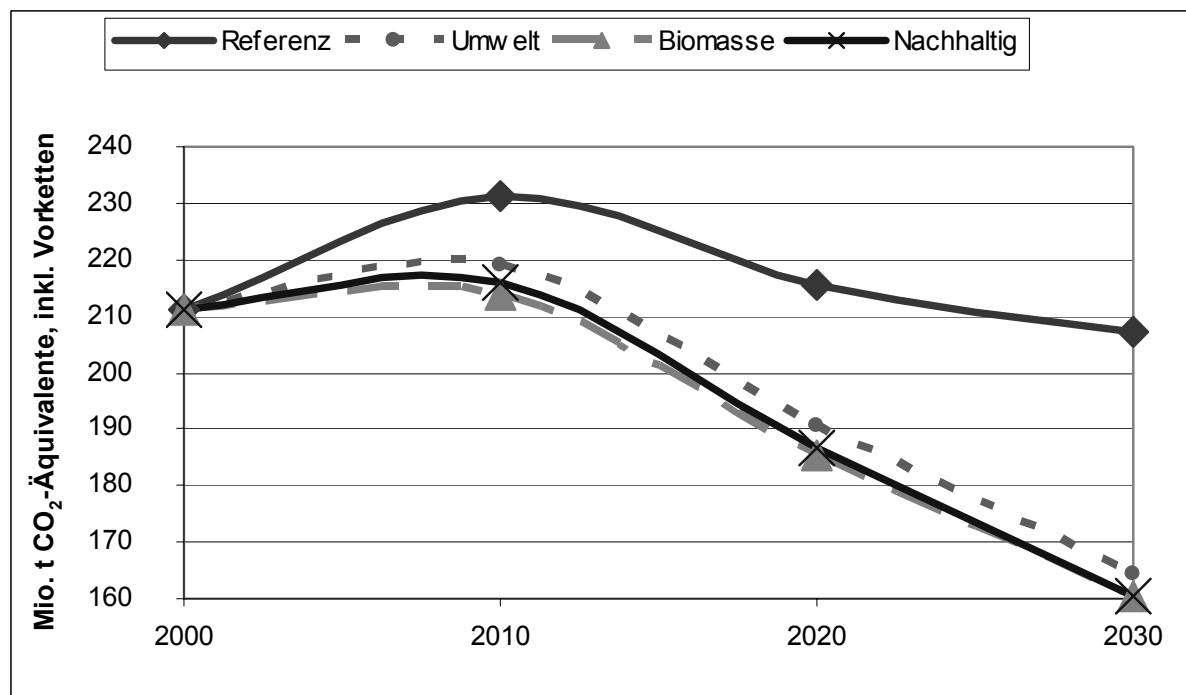
Durch die höhere Effizienz und die – hier steuerfrei angenommenen – Biokraftstoffe kann in den Maßnahmeszenarien eine deutliche Kosteneinsparung gegenüber REFERENZ erreicht werden, die bis 2030 bei gut 10 Mrd. €/a liegen kann.

Dies macht deutlich, dass zumindest nach 2020 auch bei einer (Teil-)Erhebung von Kraftstoffsteuern auf biogene Energieträger das Szenario NACHHALTIG immer noch günstigere Kosten als in REFERENZ aufweisen würde.

¹²⁵ Im Szenario-Modell sind auch Busse, Bahnen und Flugzeuge sowie beim Güterverkehr die Schifffahrt einbezogen. Die Details hierzu finden sich im Anhangband (vgl. beigelegte CDROM).

Bei den Treibhausgasen aus dem Verkehr bringen die Maßnahme-Szenarien gegenüber REFERENZ eine drastische Minderung bis 2030, während REFERENZ bis 2010 leicht steigende und bis 2030 gleich hohe Emissionen wie in 2000 bedingen würde.

Bild 54 Treibhausgasemissionen der Verkehrsdienstleistungen in den Szenarien



Daten inkl. THG-Emissionen durch Auslandsvorketten (z.B. aus Ölförderung, Gaspipelines)

6.7 Hemmnisse für die Umsetzung

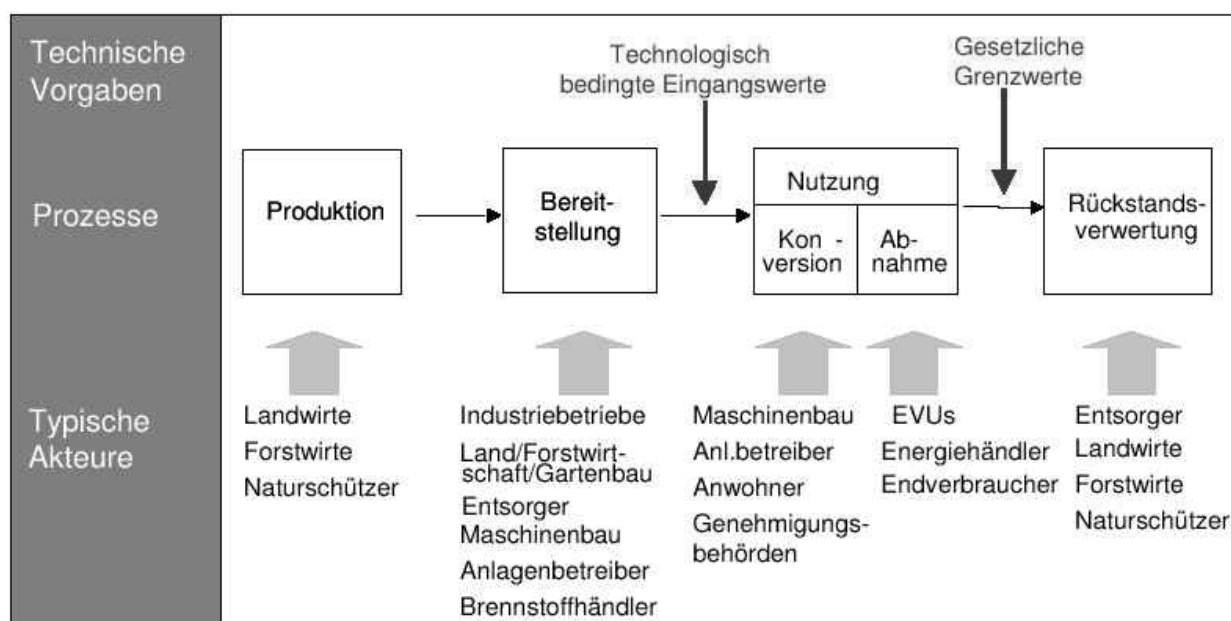
Im Szenario NACHHALTIG kristallisieren sich für die Strom- und Wärmeerzeugung sowie den Personenverkehr bestimmte Verfahrensketten heraus. Im Bereich Stromerzeugung sind dies in erster Linie

- Biogasanlagen, in denen als Substrate Biomüll/Landschaftspflegereste, Feuchtgut sowie Rindergülle und Mais eingesetzt werden,
- Altholz (A1-4)-Dampfturbinenkraftwerke,
- Vergasungsanlagen für Waldrestholz und Pappeln aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) sowie
- Brennstoffzellen-BHKW mit Synthesegas aus Reststroh als Brennstoff.

In der Wärmeerzeugung nimmt die KWK-Wärme im Vergleich zu Holzheizungen und Nahwärme aus Waldrestholzheizwerken den dominierenden Anteil ein. Für den Personenverkehr sind Pflanzenöle (Raps- und Sonnenblumenöl, RME und SME), BtL-Treibstoffe aus KUP-Pappeln, Miscanthus, Waldholz und Stroh sowie Bioethanol aus Weizen relevant.

Der Umsetzung einer nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse im Sinne des Szenarios NACHHALTIG steht jedoch eine Vielzahl von *Hemmnissen* entgegen. Diese Hemmnisse sind aufgrund der Anzahl der verschiedenen Akteure und der komplexen Verfahrensketten der energetischen Biomassenutzung vielschichtig (Bild 55).

Bild 55 *Prinzipschema zu Verfahrensketten bei der Biomassenutzung am Beispiel biogener Festbrennstoffe*



Quelle: Thrän (2003)

In den folgenden Abschnitten werden diese Hemmnisse identifiziert. Hierbei wird insbesondere auf die Hemmnisse eingegangen, die speziell für die energetische Biomassenutzung gelten.

Die Hemmnisse können verschiedenen Kategorien zugeordnet werden, wobei zu beachten ist, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Kategorien unscharf sind, und die Hemmnisse untereinander in Wechselwirkung stehen. Nach Thrän (2003) lassen sich folgende Kategorien unterscheiden:

- Ressourcenseitige Hemmnisse,
- technische Hemmnisse,
- wirtschaftliche und Finanzierungshemmnisse,
- administrative Hemmnisse,
- soziale Hemmnisse und
- nachfragebedingte Hemmnisse.

Ressourcenseitige Hemmnisse beziehen sich auf die Verfügbarkeit und Erschließbarkeit von Ressourcen, die Brennstoffeigenschaften und den Brennstoffmarkt. In der Potenzialanalyse wurden bezüglich der Verfügbarkeit und Erschließbarkeit von Ressourcen bereits verschiedene Aspekte berücksichtigt. Hierzu zählen zum einen Beschränkungen, die durch die Rahmenbedingungen in der Land-, Forst- und Abfallwirtschaft gegeben sind. Der Ausbau der ökologischen Landwirtschaft führt beispielsweise aufgrund des höheren spezifischen Flächenbedarfes dazu, dass für den Anbau von Energiepflanzen weniger Fläche zur Verfügung steht. Ähnlich verhält es sich bei einer nachhaltigen Waldnutzung, die das verfügbare Waldrestholzaufkommen reduziert. In der Forstwirtschaft ist – insbesondere in kleineren Privatwäldern – der eingeschränkte Grad der Mobilisierung von Waldrestholz eine weitere wichtige Restriktion, die in die Potenzialberechnung für die Szenarien eingeht. In der Abfallwirtschaft ist die Menge an potenziell energetisch nutzbarer Biomasse u.a. von der Lenkung der Abfallströme abhängig. Der Grad der getrennten Erfassung von Abfällen, der durch den Einsatz von Biotonnen und finanziellen Anreizen beeinflusst werden kann, wirkt sich hierbei auch auf das technische Brennstoffpotenzial aus. Des Weiteren werden in der Potenzialanalyse Nutzungskonkurrenzen berücksichtigt, die das Angebot an energetisch nutzbarer Biomasse einschränken können. In diesem Zusammenhang ist die stoffliche Nutzung von Holzsortimenten zu nennen, die sowohl für stoffliche als auch für die energetische Verwertung in Frage kommen. Als weitere Beispiele sind die alternative Nutzung von Stroh als Tiereinstreu und Bodenverbesserer oder die Weiterverarbeitung von Tierfett in der chemischen Industrie anzuführen.

Hemmnisse bezüglich des Brennstoffmarktes schließen fehlende Märkte und kooperative Netzwerke mit ein, welche die Bereitstellung der Brennstoffe und Technologien sowie die Abnahme der erzeugten Energie gewährleisten und optimieren sollen.

Technische Hemmnisse, in Form von beispielsweise mangelnder Effizienz, werden in den Szenarien über die durchgeführte Technologiebewertung beachtet. Die zeitliche Fortschreibung des technischen Standes und die Technologieentwicklung spiegeln sich hierbei in den Stützzeitpunkten des Szenarios wider. Die ungenügende Technikverbreitung als ein weiteres, mögliches Hemmnis steht im engen Zusammenhang mit Informationsdefiziten, die den sozialen Hemmnissen zugeordnet werden können.

Wirtschaftliche und Finanzierungshemmnisse betreffen die Kosten für einzelne Nutzungstechnologien und die Bereitstellung der Brennstoffe. Die Investitions-, Fix- und Brennstoffkosten sowie variable Kosten werden in die Technologiebewertung für die Szenarien einbezogen. Die wirtschaftlichen und Finanzierungshemmnisse stehen in enger Verbindung mit den Förderungsprogrammen und Einspeisevergütungen, die auf politischer Ebene bestimmt werden (vgl. Kapitel 7).

Zu den *administrativen Hemmnissen* zählen Auflagen im Genehmigungs-, Emissions- und Abfallrecht, die z.T. noch nicht auf die speziellen Gegebenheiten der energetischen Nutzung von Biomasse abgestimmt sind.

Soziale Hemmnisse beinhalten Interessenskonflikte, Informationsdefizite und Akzeptanzprobleme, wobei die verschiedenen Perspektiven der Akteure (Nutzer, Anwohner, Gesellschaft) zu beachten sind. Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung stehen in engem Bezug zu schlecht quantifizierbaren Umweltwirkungen, wie z.B. Geruchs- und Lärmbelästigung, Explosionsrisiko, toxische Emissionen, optische Beeinträchtigungen und Verkehrsbelästigungen. Bei den Interessenskonflikten spielen auch ökologische Einschränkungen durch Forderungen des Naturschutzes eine Rolle. Über den Bedarf an Naturschutzflächen und dessen zeitliche Entwicklung findet der Naturschutz in den Szenarien bereits teilweise Berücksichtigung. Es sind hierbei jedoch noch weitere Aspekte, wie z.B. der Anbau von nicht einheimischen Pflanzen (*Miscanthus*), zu beachten.

Nachfragebedingte Hemmnisse beziehen sich auf fehlende Strukturen und mangelnden Netzzugang. Diese Hemmnisse werden im Folgenden zusammen mit den Hemmnissen bezüglich des Brennstoffmarktes als *strukturelle Hemmnisse* behandelt.

Die Restriktionen, die in der Potenzialanalyse bereits berücksichtigt werden, gehen in unterschiedlichem Maße in die einzelnen Szenarien ein. Generell ist festzuhalten, dass im REFERENZ- und UMWELT-Szenario die Einschränkungen eine größere Bedeutung haben als im BIOMASSE-Szenario.

Im Folgenden werden die verschiedenen Hemmniskategorien für die im NACHHALTIG-Szenario relevanten Technologien untersucht. Unter Berücksichtigung der bereits in die Szenariodefinition einbezogenen Hemmnisaspekte wird der Schwerpunkt vor allem auf den administrativen, sozialen und strukturellen Hemmnissen liegen. Diese Hemmnisse unterscheiden sich z.T. für die einzelnen Nutzungsketten. Aus diesem Grunde wird eine Unterteilung in technologieübergreifende und spezifische Hemmnisse vorgenommen.

6.7.1 Technologieübergreifende Hemmnisse

Für die energetische Nutzung von Biomasse im Nachhaltigkeitsszenario existieren Hemmnisse, die für die Technologien zur Strom- und Wärmeerzeugung gleichermaßen gelten. Diese technologieübergreifenden Hemmnisse werden in diesem Kapitel dargelegt.

Aktuelle Hemmnisse bestehen auf *administrativ-rechtlicher* Ebene aufgrund der Tatsache, dass es bei Genehmigungsverfahren große Handlungsspielräume auf Seiten der ausführenden Behörden gibt. Dies führt dazu, dass bei der Genehmigung bundesweit keine einheitliche Praxis angewendet wird, so dass die Anlagenbetreiber keine Planungssicherheit besitzen und zeitliche Verzögerungen und zusätzlichen Arbeitsaufwand befürchten müssen. Der Nachweis, dass Brennstoffe eingesetzt werden, die konform zur Biomasseverordnung sind, wird ebenfalls unterschiedlich durchgeführt, wobei dies insbesondere die bescheinigende Stelle und die Frist für die Wiedervorlage betrifft (IE 2003). Die durch die 17. BImSchV erfolgte Gleichsetzung von Anlagen zur Energieerzeugung aus Altholz mit Müllverbrennungsanlagen führt dazu, dass in der Bevölkerung durch die Begriffsbelegung negative Assoziationen erzeugt werden, die zu *sozialen Hemmnissen* führen können (FNR 2000).

Des Weiteren sind *soziale Hemmnisse* zu nennen, die sich in erster Linie auf Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung beziehen. Die Bevölkerung befürchtet aufgrund der Anlieferung der Biomasse ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und damit verbundene Lärmemissionen (FNR 2000). Dieser Befürchtung kann durch entsprechend ausgearbeitete Logistikkonzepte Rechnung getragen werden. Die Brennstofflager erzeugen bei den Anwohner Missfallen, da sie Geruchsemissionen und eine erhöhte Brandgefahr erwarten. Technische Vorkehrungen, wie z.B. Absauganlagen und Sicherheitsvorrichtungen, können hier Abhilfe schaffen. Den Bedenken der Bevölkerung bezüglich gesundheitlicher Gefahren aller Art, wie Keimen, Luftschadstoffen, Geruchs- und Verkehrsbelästigungen sind allgemein mit einer offenen und wohlüberlegten Informationspolitik von Seiten der Betreiber zu begegnen (FNR 2000, Thrän 2003). Ein weiteres soziales Hemmnis betrifft die Technologieverbreitung, welche durch fehlende Informationen zu innovativen Technologien eingeschränkt sein kann (Thrän 2003).

Strukturelle Hemmnisse werden durch fehlende Infrastrukturen verursacht. Insbesondere bei Anlagen mit einem großen Leistungsbereich ist eine kontinuierliche Brennstoffversorgung für den optimalen Anlagenbetrieb wichtig. Saisonale Schwankungen und Ernteauffälle können hier Hemmnisse darstellen (IVD 2000). Auf der Inputseite von Anlagen zur energetischen Nutzung von Biomasse ist somit eine funktionierende Marktstruktur wichtig, die eine sichere Versorgung in entsprechender Qualität gewährleistet. In diesem Zusammenhang ist auch die Etablierung von Qualitätsstandards zu nennen, die durchgängig von der Erfassung über die Aufbereitung bis hin zur energetischen Verwertung der Festbrennstoffe erfolgen sollte (IE 2003). Die outputseitige unkomplizierte Anbindung der Anlagen an Versorgungsnetze im Bereich Strom und Nahwärme müssen den Betreibern Sicherheit für die Abnahme der erzeugten Energie gewähren.

6.7.2 Hemmnisse für ausgewählte Biomasse-Technologien

Im Folgenden wird auf die Verfahrensprozesse näher eingegangen, für die einige spezifische Hemmnisse gelten und die im Nachhaltigkeitsszenario besonders relevant sind. Zum einen sind bei Biogasanlagen z.B. im rechtlich-administrativen Bereich weitere Hemmnisse neben den oben genannten Aspekten zu beachten. Zum anderen ist die Bereitstellung von Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen und Miscanthus aufgrund der noch nicht etablierten Anbau- und Vertriebssysteme mit zusätzlichen Hemmnissen verbunden.

Biogasanlagen

Biogasanlagen gewinnen im Nachhaltigkeitsszenario im Laufe des betrachteten Zeitraums an Bedeutung. An der Stromerzeugung inkl. KWK aus Biomasse ist die Biogastechnologie für den Stützzeitpunkt 2030 mit einem Anteil von 56 % beteiligt. Die Stromerzeugung aus gasförmigen Bioenergieträgern steht jedoch vor einigen spezifischen Hemmnissen, die in diesem Kapitel angesprochen werden. Für eine detailliertere Erläuterung wird auf IE (2003) und Klinski (2002) verwiesen.

Die Stromerzeugung durch Biogasanlagen wird vorwiegend durch *administrative* und *soziale Hemmnisse* erschwert.

Administrative Hemmnisse behindern den Ausbau von Biogasanlagen, weil bestehende Vorschriften oft noch unzureichend auf Biogasanlagen ausgerichtet sind. Im Bereich des Bauplanungsrechts sind unbefriedigende Regelungen bezüglich der Privilegierung insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe und Gemeinschaftsanlagen zu nennen. Bestehende Vorschriften erlauben keine Errichtung von Biogasanlagen im Außenbereich, es sei denn, sie dienen dem landwirtschaftlichen Betrieb, wodurch jedoch eine Einschränkung des Substratzuges oder der möglichen erzeugten Strommenge gegeben ist. Weitere Hemmnisse aufgrund der Gesetzgebung in der Düngemittelverordnung und der Bioabfallverordnung kommen zum Tragen, wenn Kosubstrate in Biogasanlagen genutzt werden. Zum einen können die Gärrückstände bei einem Einsatz von Kosubstraten nach der bestehenden Düngemittelverordnung nicht als Dünger qualifiziert vermarktet werden, womit ein Imageverlust für die Gärrückstände einhergeht. Zum anderen gelten bei der Aufbringung des Gärrückstands auf den Boden die in der BioAbfV festgelegten Grenzwerte für Schwermetalle, die jedoch auf den Trockenmassegehalt von Kompost ausgerichtet sind. Gärrückstände, deren Trockenmassegehalt im Vergleich zu Kompost geringer ist, können diese vorgegebenen Schwermetallgrenzwerte selten einhalten. Zudem orientieren sich die Hygienebestimmungen in der BioAbfV an der Prozessführung von Kompostieranlagen und nicht an denen der Biogasanlage.

Soziale Hemmnisse können entstehen, wenn der Transport und die Lagerung der Substrate für die Biogasanlagen Geruchsemissionen verursacht, die bei der angrenzenden Bevölkerung zu einem Widerstand gegen die Biogasanlage führen. Die Geruchsemissionen sollten durch geschlossene Systeme beim Transport und bei der Umfüllung sowie durch die Installation von Absaugvorrichtungen und Biofilterinstandhaltung minimiert werden.

Weitere Akzeptanzprobleme können bei den Anwohnern auftreten, weil sie das Risiko von Explosionen und toxischen Wirkungen sowie gesundheitliche Gefahren durch Keime aufgrund von undichten Leitungen und ungenügenden Sicherheitsvorrichtungen befürchten.

Bereitstellung von Biomasse aus KUP und Miscanthus

Im Szenario Nachhaltig wird angenommen, dass die Fläche für Mehrjährige von 14.000 ha im Jahr 2010 auf insgesamt 220.000 ha im Jahr 2030 zunehmen wird und für Kurzumtriebsplantagen (KUP) und Miscanthus genutzt wird, so dass dem Anbau von Mehrjährigen eine wichtige Bedeutung beigemessen wird.

Hemmnisse, die für die Bereitstellung von Biomasse aus KUP und Miscanthus bestehen, können sich im Nachhaltigkeitsszenario auf die Produktion von BtL-Treibstoffen aus KUP und Miscanthus auswirken. Diese Hemmnisse können vor allem auf *soziale* und *strukturelle* Probleme zurückgeführt werden.

Soziale Hemmnisse betreffen hauptsächlich die Anbaubereitschaft der Landwirte und die Akzeptanz der beiden Kulturen in der Bevölkerung.

Bei den Landwirten ist der Anbau von Kurzumtriebsplantagen und Miscanthus bisher noch nicht etabliert, so dass hierfür erst eine stärkere Akzeptanz bei den Landwirten geschaffen werden muss.

Aufgrund der langen Bewirtschaftungsdauer der Kurzumtriebsplantagen ist eine kurzfristige, flexible Gestaltung der Fruchtfolge nicht möglich. Das kann die Landwirte bei fehlender langfristiger Perspektive vom Anbau der Kurzumtriebsplantagen abhalten. Aus diesem Grunde sind mittel- bis langfristige Lieferverträge wichtig, die den Landwirten eine gewisse Sicherheit bieten (LWF Bayern 1996).

Hemmend wirkt zudem die mehrjährige Anlaufphase, die zu überwinden ist, bis genügend Teilflächen für eine kontinuierliche Ernte vorhanden sind (Hofmann 1988).

Fehlende Akzeptanz bei der Bevölkerung ist vor allem in waldreicheren Gebieten zu befürchten. In waldarmen Gebieten ist davon auszugehen, dass die Bevölkerung die Kurzumtriebsplantagen als Auflockerung der Kulturlandschaft empfindet. Daher sind Steuerungsmechanismen notwendig, um eine Überfrachtung des Landschaftsbildes mit KUP zu vermeiden (LWF Bayern 1996).

Der Anbau von Miscanthus stößt auf Hemmnisse aus dem Naturschutzbereich, da es sich bei Miscanthus nicht um eine in Deutschland heimische Art handelt und aus diesem Grunde Bedenken gegenüber einem großflächigen Anbau bestehen.

Weiterhin können *strukturelle* Hemmnisse existieren, was z.B. die Verfügbarkeit der speziellen Erntemaschinen in Maschinenringen betrifft (LWF Bayern 1996). Wichtig ist zudem eine funktionierende Vertriebsstruktur beispielsweise in Form von regionalen Distributionsstellen mit kurzen Transportdistanzen.

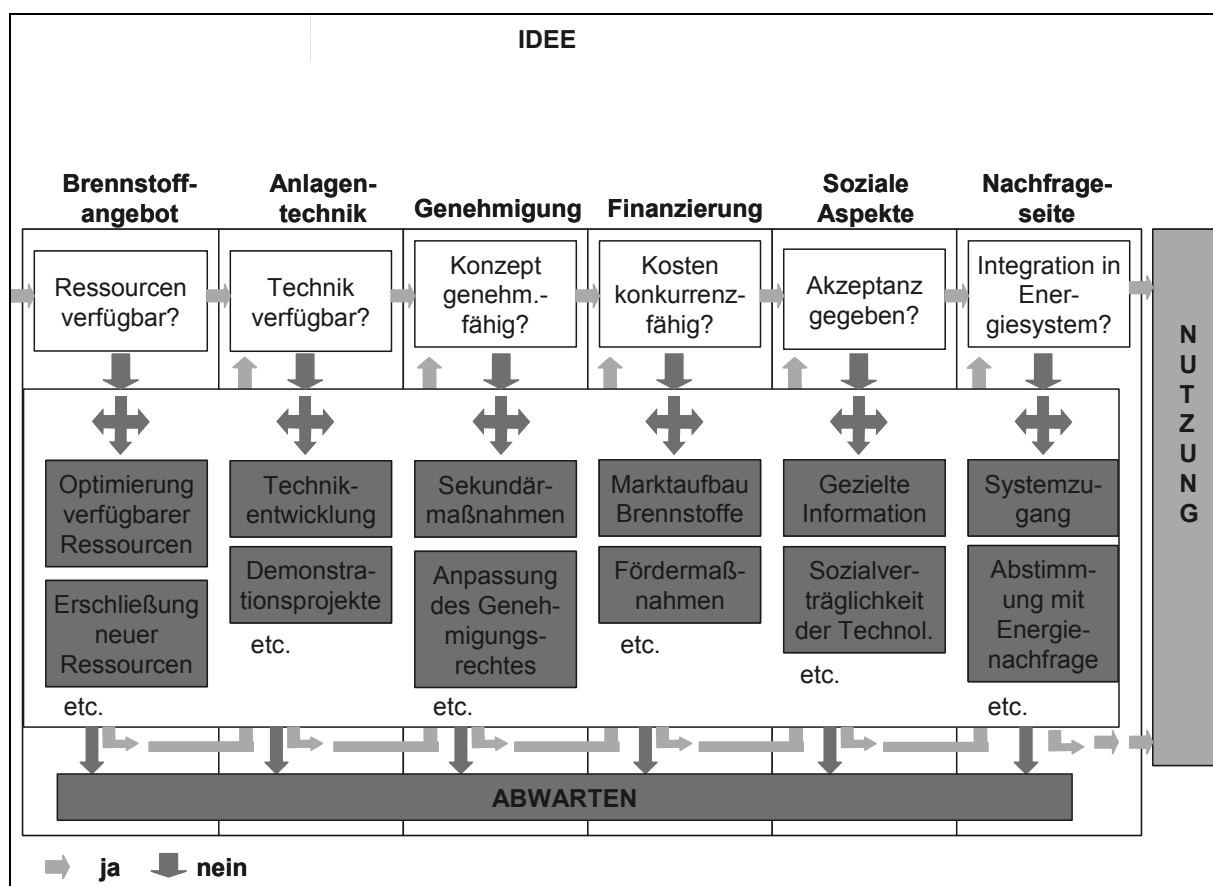
Diese müssten zum einen eine Sammelstelle für die Brennstoffanbieter darstellen und zum anderen ein umfassendes Produktsortiment für die potenziellen Kunden anbieten (Kreikenbohm 2002).

Es ist davon auszugehen, dass die Etablierung von KUP und Miscanthus in die landwirtschaftliche Anbaupraxis aufgrund der genannten Hemmnisse und unter Berücksichtigung der langen Anlaufphase einen mehrjährigen Zeitraum in Anspruch nehmen wird. Für die Umsetzung einer raschen Zunahme von Flächen mit Mehrjährigen, wie sie im Nachhaltigkeitsszenario vorgegeben ist, muss den genannten Hemmnissen bereits in einer frühen Phase des Betrachtungszeitraums intensiv entgegengewirkt werden.

6.7.3 Lösungsansätze

Aufgrund der Komplexität und der Wechselwirkungen untereinander bedarf die Überwindung von Hemmnissen bei der nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse einer breiten Palette kreativer Lösungsansätze.

Bild 56 *Verfügbarmachung von Biomasse – von der Idee zur Nutzung*



Quelle: Thrän/Kaltschmitt (2004)

Bild 56 zeigt die verschiedenen Abschnitte, die bei der Realisierung der energetischen Biomasse-nutzung beachtet werden müssen. Stellen, an denen Hemmnisse wirken, sind in dieser Abbildung als rote Pfeile dargestellt; der positive Verlauf wird durch die grünen Pfeile symbolisiert. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels kann der Abbau von Hemmnissen auf mehreren Wegen erfolgen. Zum einen ist ein direktes Herangehen an das Hemmnis möglich. Zum anderen kann ein Hemmnis auch über die Überwindung von Hemmnissen in anderen Bereichen abgebaut werden. Jedoch ist auch der gegenteilige Effekt möglich, indem bei der Beseitigung eines Hemmnisses neue Hemmnisse entstehen (Thrän 2003).

Neben der Weiterentwicklung von Technologien und der finanziellen Förderung von Biomasse-projekten zum Abbau von technischen und finanziellen Hemmnissen gilt es, die administrativen, strukturellen und sozialen Hemmnisse durch entsprechende Maßnahmen zu überwinden.

Administrative Hemmnisse können auf politischer Ebene beseitigt werden, indem die betreffenden Gesetze und Verordnungen an die Erfordernisse der Biomassenutzung angepasst werden. Hierbei ist jedoch eventuell eine Abwägung mit anderen Interessen erforderlich. Bei der Genehmigung von Biomasse-Anlagen kann eine frühzeitige Beteiligung der zuständigen Behörden und Gutachter Hemmnisse minimieren (IE 2003).

Strukturelle Hemmnisse auf der Angebotsseite sollten über die Schaffung von regionalen Versorgungsstrukturen in Form von Biomassezentren auf Landkreisebene sowie von Internetportalen angegangen werden (IZES 2002). Auch auf der Nachfrageseite spielen die Kommunen eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die Nachfrage von Energie aus Biomasse bei Neubautätigkeiten und Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen und anzuregen.

Informationsdefizite in Verwaltungen, die zu sozialen als auch zu administrativen Hemmnissen führen können, sind durch frühzeitige und aktive Kommunikation vermeidbar. Zur Steigerung der Anwohner-, wie auch Nutzerakzeptanz sind z.B. Informationsveranstaltungen und Broschüren, ein frühzeitiger Einbezug der Anwohner in die Planungen sowie Exkursionen zu Referenzanlagen hilfreich. Wichtig ist außerdem auch eine klare Ansprache von sektoralen Nachteilen, die die energetische Nutzung von Biomasse mit sich bringt (FNR 2003).

Für die ausführenden Stellen bei der Planung und des Betriebes von Biomasseanlagen werden Schulungen von Mitarbeitern in der Verwaltung und in Handwerksbetrieben empfohlen (BMU 2003). Durch die offene Kommunikation mit anderen betroffenen Gruppen, wie z.B. dem Naturschutz, können weitere soziale Hemmnisse überwunden werden.

Zu den sozialen Hemmnissen, die kaum durch Informationen und wissenschaftlichen Fakten abgebaut werden können, gehören emotional behaftete Vorbehalte, wie z.B. Geruchsemissionen und die Gleichsetzung von Holzverbrennungsanlagen mit Müllverbrennungsanlagen. Diesen Hemmnissen ist mit besonderem psychologischem Geschick zu begegnen (BMU 2003).

7 Empfehlungen zur Umsetzung

Erneuerbare Energien – darunter auch Biomasse – sind klimaschonende Energieträger, darum will die Bundesregierung mit Blick auf die nationalen Verpflichtungen zur Senkung der Treibhausgase den Anteil der erneuerbaren Energien bis 2010 gegenüber 2000 verdoppeln, beim Strom auf 12,5 % und auf 4 % der Primärenergie.

Langfristig sind, wie die Szenarien gezeigt haben, durchaus ehrgeizigere Ziele möglich – bis ins Jahr 2030 können erneuerbare Energien 22 % des Energiebedarf decken. Dabei bringt die Biomasse mit gut 14% den Löwenanteil.

Die Ergebnisse belegen zudem, dass eine nachhaltige energetische Biomassenutzung gut mit Umwelt- und Naturschutz vereinbar ist und sogar Synergiepotenziale aufweist.

Die Umsetzung dieser Möglichkeiten geschieht jedoch *nicht von selbst* – sie erfordert eine *aktive* Biomassepolitik insbesondere auf der Ebene des Bundes.

Die folgenden Empfehlungen für eine solche Politik wurden aus der Szenario-Analyse insbesondere des Szenarios NACHHALTIG abgeleitet.

7.1 Instrumente: Biomasse im EEG und im Emissionshandel

Die Bundesregierung setzt bei der Förderung erneuerbarer Energien auf zwei klare Schwerpunkte – das EEG und den Emissionshandel. Während das EEG die Stromerzeugung aus kleineren und mittleren Anlagen abdeckt, bezieht sich der gerade beschlossene Emissionshandel auf die CO₂-Emissionen aus großen Feuerungen und Kraftwerken, die mit fossilen Energien betrieben werden, aber kann durch den Handel mit CO₂-Zertifikaten auch und gerade Biomasse im Bereich dieser Anlagen indirekt fördern,

7.1.1 Biomasse und EEG

Im EEG ist die Biomasse mit einigen speziellen Regelungen einbezogen. Entsprechend der im August 2004 novellierten EEG sind höhere Vergütungen für biogenen Strom dann möglich, wenn fortschrittliche Technologien mit Abwärmenutzung zum Einsatz kommen und „reine“ Bioenergie aus der Land- und Forstwirtschaft genutzt wird.

Unsere Analysen der Kosten von Technologien zur biogenen Stromerzeugung (vgl. Kapitel 4.3) belegen sehr deutlich, dass diese Vergütungssätze für eine ganze Reihe von Biomasse-Technologien wichtige Anreize darstellen – daher wird das EEG nun *eine erhebliche Anschubwirkung* vor allem im Bereich *Biogas* entfalten.

Die Ergebnisse belegen aber auch, dass biogener Strom *aus Energiepflanzen* kurzfristig auch bei den novellierten EEG-Vergütungssätzen nicht ohne weitere Förderung wirtschaftlich wird, sofern nicht sehr günstige Bedingungen an einzelnen Standorten vorliegen. Um die mittelfristig erwartbare Kostensenkung von biogenen Stromerzeugungsoptionen nicht zu gefährden, ist daher ein *zusätzliches Anreizprogramm* für Energiepflanzen sinnvoll, das angesichts der Kosten und potenziellen Beschäftigungseffekte volkswirtschaftliche Nettogewinne verspricht.

Die Ausgestaltung eines solchen Programms sollte gezielt auf die Land- und Forstwirtschaft als potenzielle Energielieferanten im ländlichen Raum ausgerichtet sein und dabei Naturschutzaspekte aktiv einbeziehen, um die bei der Potenzialanalyse identifizierten Möglichkeiten zu Synergien zu nutzen. Wichtig sind hier Anreize bzw. Nutzungsaufgaben für Mehrjährige wie Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln und Weiden (insb. zum Erosionsschutz) sowie die Förderung von Landschaftsstrukturelementen wie Hecken, deren Schnittmasse energetisch genutzt werden könnte.

Eine ressortübergreifende Regelung, die mit dem BMVEL und seinen Programmen zur Modulation der Agrarfördermittel und den BMU-Anstrengungen im Bereich Naturschutz zu koordinieren wäre, sollte in Abstimmung mit den Ländern entworfen und als mittelfristiges Programm parallel zum EEG implementiert werden.

Ergänzend hierzu ist die Weiterentwicklung innovativer Technologien durch ein technologisches Förderprogramm anzustreben (vgl. Kapitel 7.3), bei dem auch die optimierte Wärmenutzung bei stromgeführten Anlagen thematisiert wird.

7.1.2 Biomasse und Emissionshandel

Der ab 2005 beginnende Emissionshandel verspricht, über die monetäre Bewertung von CO₂-Einsparungen eine indirekte Förderung für den Biomasse-Einsatz in größeren Feuerungen und Kraftwerken. Unsere Analysen am Beispiel der Mitverbrennung von Alt- und Waldrestholz sowie Stroh (vgl. Kapitel 4.3) zeigen, dass vor allem die Mitverbrennung in bestehenden Kohle-HKW durch den Emissionshandel deutlich gefördert werden könnte und damit eine größere Verbreitung im Markt ohne staatliche Regelungen möglich wird.

Um diese Möglichkeiten kurzfristig zu befördern, ist jedoch eine Konzertierung von Akteuren unter Einbeziehung größerer Unternehmen (vgl. Kapitel 7.4) sinnvoll.

7.2 Instrumente für den biogenen Wärmemarkt

Die Technologieanalyse und die Szenario-Ergebnisse belegen, dass die Biomasse im Wärmemarkt eine große Rolle dann spielen kann, wenn sie über Prozesse zur Bereitstellung von Nah- und Fernwärme genutzt wird.

Bei der ökonomisch und ökologisch vorteilhaften KWK sind ebenso wie bei den reinen Biomasse-Heizwerken Wärmenetze von entscheidender Bedeutung – und genau hier fehlt derzeit ein Instrument zur Förderung.

Daher sollten die von BMU und UBA begonnenen Überlegungen zu entsprechenden Instrumenten für die Förderung von erneuerbaren Energien im Wärmesektor intensiviert und dabei die zentrale Rolle von Wärmenetzen auch für Solarthermie und Geothermie berücksichtigt werden. Hier wird daher ein Schwerpunkt „Netzentwicklung“ vorgeschlagen, der insbesondere Möglichkeiten der finanziellen Förderung von entsprechenden Investitionen mit dem Einsatz von Biomasse, Solarenergie und Erdwärme koppelt.

Parallel hierzu wäre die mittelfristige Fortschreibung der Ökosteuer auf Erdöl und Erdgas ein wichtiger Hebel, um die Nah- und Fernwärme über die Preisentwicklung der konkurrierenden Energieträger indirekt zu befördern.

7.3 Instrumente zur Technologieentwicklung

Das EEG bzw. seine Novelle setzt mit der erhöhten Vergütung für innovative Verfahren zur Biomasse-Stromerzeugung einen ersten wichtigen Anreiz, der nach unseren Analysen bei günstigen Standortbedingungen durchaus zu entsprechenden Marktreaktionen führen kann.

Die mittelfristig aufgrund der Kostensenkungs- und Effizienzerhöhungspotenziale interessanten Biomasse-Technologien wie Dampfmotor-BHKW, ORC-Prozesse sowie verschiedene Verfahren zur Vergasung von Biomasse können jedoch nur realisiert werden, wenn eine *dynamische Markteinführung* über Nischenanwendungen hinaus erfolgt.

Diese innovativen Verfahren erfordert über das EEG hinaus zusätzlich ein gezieltes *Demonstrations- und Markteinführungsprogramm*, das analog zu der früheren Investitionsförderung bei Windkraft über einen längeren Zeitraum genug Anreize bietet, um Technologie-Entwickler und Technologie-Nachfrager für entsprechende Investitionen zu gewinnen.

Mit Blick auf Bio-Kraftstoffe sind entsprechende erste Schritte bereits gemacht (BtL-Pilotanlagen), die auch für die o.g. Prozesse zur dezentralen Vergasung und innovativer KWK eingeschlagen werden sollten. Bei der Konzeption dieses Programms sollte eine europäische Komponente mit überlegt werden.

Zusätzlich sollten die schon laufenden Anstrengungen von Seiten der Ressorts BMU und BMVEL (bzw. BfN, UBA und FNR) zu Monitoring und Evaluation bestehender Anlagen und Technologien fortgeführt und eine zentrale Informationsdrehzscheibe für Biomasse-Technologiefragen („clearinghouse“) analog zu den US-amerikanischen Vorbildern eingeführt werden.

Schließlich ist es mit Blick auf die internationale Entwicklung von Technologien und Fragen des Exports sinnvoll und notwendig, dass Deutschland

- im Rahmen der IEA den verschiedenen Kooperationsvereinbarungen zur energetischen Biomassennutzung beitrifft und
- sich im Rahmen der bi- und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit (KfW, Weltbank usw.) stärker für (deutsche) Biomasse-Technologien einsetzt.

7.4 Akteurskonzertierung: Einbeziehung der Wirtschaft

Der Emissionshandel eröffnet für die Mitverbrennung von Biomasse wichtige Anreize – hier sollte kurzfristig versucht werden, mit größeren Emittenten die Biomasse-Mitverbrennung in einigen realen Anlagen zu demonstrieren und als gutes Beispiel für die positiven Auswirkungen des Emissionshandels auszuweisen. Eine entsprechende „Konzertierung“ von Unternehmen wäre im Rahmen der nationalen Koordinationsstelle für den Emissionshandel (UBA) zu initiieren.

Parallel hierzu könnte die für die Umsetzung wesentliche Nutzung von Biomasse in KWK durch eine Beteiligung von z.B. Gasversorgungsunternehmen und dem Heizöl-Handel an entsprechenden Anlagen erleichtert werden, wobei auch die geforderte Demonstration innovativer Verfahren hier einbezogen werden sollte. Als Akteur wäre hier z.B. die Deutsche Energie-Agentur zu nennen oder ein Kooperationsverbund mit Contracting-Unternehmen.

8 Ausblick

Über die unmittelbaren Ergebnisse des Vorhabens und die Empfehlungen für die Biomassepolitik hinaus sind abschließend noch zwei Aspekte der Projektergebnisse herauszuheben, die auf anstehende Weiterarbeiten verweisen und insoweit einen Ausblick geben.

8.1 Künftige Nutzung der Werkzeuge

Die im Projekt entwickelten Werkzeuge zur Stoffstromanalyse stehen nunmehr zur Verfügung, um auch außerhalb des Projektkontextes angewendet zu werden:

- Die Technologie-Datenbasis kann über das kostenlos verfügbare ComputermodeLL GEMIS sowohl bei der Technologieanalyse wie auch bei Fragen der Planung von Anlagen, Förderprogrammen u.ä. direkt genutzt werden¹²⁶.
- Zusätzlich stehen die wichtigsten Biomasse-Daten unmittelbar über die Datenbank des UBA im Internet ohne weitere Software zur Verfügung¹²⁷.
- Das Szenario-Tool mit seinen weiteren Werkzeugen zur Potenzialanalyse steht für Interessierte auf Nachfrage zur Nutzung bereit, kann jedoch aufgrund der Komplexität nicht ohne Einführung angewendet werden. Es wendet sich vorrangig an Nutzer, die Fragen der künftigen Biomasse-Entwicklung analysieren und hierbei eigene Szenarien entwerfen wollen.

Die Anwendung dieser Werkzeuge kann in den unterschiedlichsten Konstellationen sinnvoll sein und erfordert je nach Fragestellung ggf. eine Anpassung der Datenbasis.

Auf der Ebene der Bundesländer und von Regionen gibt es bereits entsprechende Initiativen, so dass mittelfristig von einer breiteren Nutzung auszugehen ist. Mit Blick auf die Datenbasis wäre eine Erweiterung für die EU bzw. die neuen Mitgliedsstaaten zumindest für einige Fragen interessant¹²⁸.

¹²⁶ Der Bezug des Programms inkl. der Biomasse-Datenbasis ist kostenlos im Internet unter www.gemis.de möglich.

¹²⁷ Siehe www.probas.umweltbundesamt.de

¹²⁸ Ein Nachfolge-Projekt zu Fragen der Ex- und Importe von Biomasse wurde bereits von BMU gefördert. Die EU hat ein kleineres Vorhaben zu durchaus vergleichbaren Fragen wie im vorliegenden Projekt begonnen, dass Ende 2004 abgeschlossen werden soll und das auf die Ergebnisse des Stoffstrom-Vorhabens zurückgreift.

8.2 Weiterer Forschungsbedarf

Mit dem Abschluss des Projekts sind auch offene Fragen zu adressieren – die umfänglichen Arbeiten zur Datenbasis und den Potenzialen sowie Szenario-Rechnungen haben zwar insgesamt einen hohen Stand der Datengüte und Detaillierung erreicht, erlaubten jedoch aufgrund der Mittel- und Zeitrestriktionen zu einigen Fragen nur orientierende Aussagen.

Dies betrifft insbesondere

- *Biokraftstoffe*: die Stoffstromanalyse konnte in diesem Bereich eine gute Grundlage für die Analyse konkurrierender Optionen liefern, eine Weiterentwicklung der Datenbasis ist aber insbesondere hinsichtlich des *Güterverkehrs*, schienengebundener Systeme und der Kosten von BtL sinnvoll. Zudem ist eine *energieträgerübergreifende* Analyse der Stoffströme, Kosten und Beschäftigung sinnvoll, die neben Biomasse auch andere erneuerbare Energien (z.B. Strom aus Wind), Wasserstoff und Erdgas mit einbezieht und hier die jeweiligen *Infrastrukturen* berücksichtigt.
- *Naturschutzflächen* und Bioenergieträger: Im Vorhaben konnten nur sehr grobe Überlegungen zu den Kosten und Nutzungsformen von Bioenergieträgern angestellt werden, die bei der Bewirtschaftung von Naturschutzflächen anfallen. Hier wäre eine nähere Betrachtung der Technologien, Kosten und Logistiken sinnvoll.
- *Beschäftigungsbilanzen*: Im Projekt wurden direkte und indirekte Beschäftigungseffekte mit dem Schwerpunkt Biomasse ermittelt und bei den anderen erneuerbaren Energien sowie den fossilen Systemen nur orientierende Daten erhoben, die Frage der Energieeffizienz musste ausgeklammert werden. Aufgrund der hohen Bedeutung der Beschäftigungsaspekte sollten die bisherigen Arbeiten entsprechend ergänzt, vertieft und dabei auch der sog. „Budgeteffekt“ kritisch reflektiert werden.

Im Zusammenhang mit abfallwirtschaftlichen Regelungen gibt es Grauzonen hinsichtlich der Anerkennung bestimmter organischer Abfälle als Biomasse im Sinne der BiomasseV (z.B. Abfälle aus der Papierindustrie). Hier erscheint eine vertiefte Betrachtung potenziell konkurrierender Regelinsteressen erforderlich.

Über die o.g. Schwerpunkte hinaus ist *mittelfristig* eine Aktualisierung der Grunddaten zu den Technologien sowie eine Fortschreibung der Szenario-Annahmen sinnvoll, um die Aussagegüte der Werkzeuge zu erhalten¹²⁹.

Die Ergebnisse des Projekts haben einen *nationalen* Bezug, so dass sie nur zu Teilen auf *regionale* Gegebenheiten - z.B. im Sinne konkreter Nutzungsstrategien - übertragen werden können. Unter Berücksichtigung möglicher regionalspezifischer Hemmnisse sollte daher eine *Regionalisierung* der entwickelten Instrumente auf der Basis konkreter Fragestellungen für mehrere, in der Biomassenutzung aktive bzw. daran interessierte Modellregionen erfolgen.

¹²⁹ Wie schon vorher bemerkt, sollten bei künftigen Aktualisierungen der hier vorgelegten Szenarien die erst nach Abschluss des Projekts verfügbar gewordenen detaillierten Daten zur Biomassenutzung (vgl. IE 2004) sowie die aktualisierten Daten zum Waldinventar der BFH (für Mitte 2004 erwartet) herangezogen werden.

Literatur

- Agra-Europe 2003a: Grünlandbewirtschaftung - unverzichtbar für Bayern; *Agra-Europe* 03(29)
- Agra-Europe 2003b: Grünlandförderung als politischer Schwerpunkt; *Agra-Europe* 03(25)
- Alwast, H. u.a. 2003: 2005 oder „5 vor 12“, in: Müll und Abfall Nr. 1/2003
- Anonym 2003: Umweltsituation und Umweltpolitik in Frankreich; <http://www.frankreich-business.de/infos/markt/umweltpolitik/.htm>
- ANS 2002: Tagungsband 63. Informationsgespräch des ANS e.V., Berlin
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) - Hrsg. 2001a: BHKW-Kenndaten 2001 - Module, Anbieter, Kosten, Frankfurt a.M.
- ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) - Hrsg. 2001b: Mikro-KWK - Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen, Frankfurt a.M.
- ATV-DVWK (Abwassertechnische Vereinigung - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) 2001: Schlammbehandlung mit Ultraschall: Ein aktuelles Leistungsbild; Klärschlammstage mit begleitender Fachausstellung im Congress Centrum Würzburg, 08.Mai.2001
- Bergs, C. 2002: Grenzwertkonzept der Bundesregierung, in: ANS 2002
- BFH (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft) – Hrsg. - 2002: Holzbilanzen 2000 und 2001 für die Bundesrepublik Deutschland; M. Dieter, Hamburg
- BFH (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft) 1996: Entwicklung des potentiellen Rohholzaufkommens bis zum Jahr 2020 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland; H. Polley/V. Sasse/H. Englert. (Hrsg.), Hamburg
- BGGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.) 2002: Verzeichnis der Kompostierungs- und Vergärungsanlagen in Deutschland
- BHF (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft) 2001: Abschätzung des Rohholzpotenzials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland; M. Dieter/H. Englert (Hrsg.), Hamburg
- Bischofsberger, Claus u.a. 2001: Altmöbelverwertung – Stoffstromuntersuchungen im Freistaat Sachsen; Müllhandbuch, Lfg. 06/01, Nr. 8535.2, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- BMELF (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) 1998: Agrarbericht der Bundesregierung 1998, Bonn
- BMELF (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) 2000a: Agrarbericht der Bundesregierung 2000, Bonn
- BMELF (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) 2000b: Nationales Waldprogramm Deutschland – Ein gesellschaftspolitischer Dialog zur Förderung nachhaltiger Waldbewirtschaftung im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung 1999/2000, Bonn
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2002: Zeitschrift Umwelt 12/2002
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)/BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft) 2002: Gute Qualität und sichere Erträge, wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?, Berlin

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2003: Nutzung von Biomasse in Kommunen – Ein Leitfaden; Berlin
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung und Landwirtschaft) 2001: Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten, Münster
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) 2003: Ernährungs- und agrarpolitischer Bericht 2003 der Bundesregierung, Bonn
- Boelcke, B. 1996: Feste nachwachsende Energieträger – Anbaueignung und Ertragsbildung von Miscanthus, schnellwachsenden Baumarten und Getreideganzpflanzen in Mecklenburg-Vorpommern; Forschungsbericht Nr. 12/10/93/96; Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Institut für Pflanzenbau
- Boelcke, B. 1999: Produktionschancen für feste Brennstoffe auf sandigen Ackerböden in Mecklenburg-Vorpommern; in: Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Heft 20 – 1999
- Boelcke, B. 2003: persönliches Gespräch vom 10.08.2003; Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
- Boerrigter, H./den Uil, H./Cali, H.P. 2002: Green Diesel from Biomass by Fischer-Tropsch Synthesis: New Insights in Gas Cleaning and Process Design, in: Proceedings of PGBW Expert Meeting
- Briemle, G. 1990: Extensivierung von Dauergrünland - Forderungen und Möglichkeiten, in: *Landwirtschaftliches Jahrbuch* 67(3)
- Brun, Klaus/Jones, Robert M. 2001: Economic Viability and Outlook of IGCC from a Gas Turbine Manufacturer Perspective, in: Gasification Technologies 2001 Conference; San Francisco
- BUND (Bund Umwelt- und Naturschutz Deutschland) 2000: Positionen des BUND zur energetischen Nutzung von Biomasse. Gemeinsames Positionspapier der Bundesarbeitskreise Abfallwirtschaft, Energie, Landwirtschaft, Naturschutz und Wald (http://www.bund.net/lab/reddot2/energiepolitik_977.htm)
- Bundesregierung 2002: Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, Berlin www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Nachhaltigkeitsstrategie_komplett.pdf
- Butz, W. 1997: Klimarelevanz von Deponiegasen, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 11, Trier
- Butz, W. 2003: Neuere rechtliche Vorgaben im Bereich Deponiegas, Trier
- BWK (Brennstoff-Wärme-Kraft) 2002: Regenerative Energien; Kaltschmitt, M./Merten, D./Falkenberg, D., in: BWK Bd. 54 (2002), Nr. 4, S. 68-74
- BWK (Brennstoff-Wärme-Kraft) 2003: Erneuerbare Energien; Falkenberg, D./Schneider, S./Kaltschmitt, M., in: BWK Bd. 55 (2003), Nr. 4, S. 68-77
- Byrne, D. 2003: Speaking Note, Agriculture Council, Transmissible Spongiform Encephalopathies (TSEs), http://europa.eu.int/comm/dgs/health_consumer/library/speeches/speech161_en.pdf
- Choren (Choren Industries) 2003: Biokraftstoffe – Stand und Perspektiven; Unterlagen der Choren Industries GmbH

Christian-Bickelhaupt, R. 2003: Aktueller Stand der Diskussion zur landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlämmen; Vortrag beim VDI-Wissenforum Klärschlamm/Gülle/Tiermehl/Biogene Abfälle am 16.-17.10.2003 in Dortmund

Cogen Europe - Hrsg. 2002: MICRO-MAP: Mini and Micro CHP-Market Assessment and Development Plan; Summary Report, www.cogen.org

Cogen Europe - Hrsg. 1999: The Future of CHP in the European Market - The European Cogeneration Study; Bericht Nr. XVII/4.1031/P/99-169, www.cogen.org

Deutsche Bank Research 2002: Entsorgungswirtschaft – Zwangspfand und Neuausschreibung von Verträgen verschärfen Wettbewerb und Konzentrationsprozess; Aktuelle Themen Nr. 234, Frankfurt

Dissemond 1995: Stroh – ein nachwachsender Rohstoff für die energetische Nutzung. Aus Die Bodenkultur; in: Journal für die landwirtschaftliche Forschung; Österreichischer Agrarverlag, A-Klosterneuburg

DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) 2003: Umweltauswirkungen, Rahmenbedingungen und Marktpotenziale des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen, gefördert vom BMU im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms, Stuttgart

DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt)/IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung)/ WI (Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH) 2004: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland; J. Nitsch u.a. (unter Mitarbeit von Karl Scheurlen, IUS Potsdam), Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU, FKZ 901 41 803, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal

Doedens, H. 1996: Einfluss der Sammellogistik und des Gebührensystems auf die Bioabfallmengen; in: Biologische Abfallbehandlung III, Witzenhausen – Institut, Kassel

Döhler, H. u.a. 2001: BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010; Umweltbundesamt, Berlin

Dreyer, W. 2003: persönliches Gespräch vom 01.07.2003; Ökoring Niedersachsen

DWV (Deutscher Wasserstoff-Verband) 2002: Straßenkarte für den Weg zum sauberen Treibstoff Wasserstoff geplant; Pressemitteilung Nr. 4/02, www.dwv-info.de

Eckert, H./Breitschuh, G./Sauerbeck D. 1999: Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung (KUL) – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben, in: Agribiological Research, Bd. 52, H. 1, 57-76 (Sonderdruck).

Edelmann, W. 1999: Gegenüberstellung der Ökobilanzen und ökonomischen Daten von Kompostierung, Vergärung und thermischer Behandlung biogener Abfälle; in: Bio- und Restabfallbehandlung III, Witzenhausen – Institut, Kassel

Edelmann, W. 2001: Biogaserzeugung und -nutzung; in: Kaltschmitt/Hartmann, Energie aus Biomasse, Berlin

EEA (European Environment Agency) 2002: Indicators, Kopenhagen http://themes.eea.eu.int/Sectors_and_activities/agriculture/indicators

EEG 2002: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 29.März 2000, zuletzt geändert am 23.07.2002; BGBl. I S. 2778

EEG 2004: Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes vom 2.April 2004, Beschlussfassung des Dt. Bundestags

Enquete (Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags) 2002: Alternativer Technologie-datensatz für die Szenarienrechnungen im Rahmen der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ (Variante 1); Stand 11.02.2002; Berlin

Enquete (Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags) 2003: Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung; Schlussbericht; Berlin

Ertl/Birneck 1988: 1000 Fragen für den jungen Landwirt, München (10. überarbeitete Auflage)

Escherle, A./Witthauer, K.-D./Mottitschka, W. 2001: Aus Schlamm wird Glas und Gas; in: Müllmagazin 4/2001 Seite 75-79

EU (Europäische Kommission) 2002: Die Verwendung tierischer Proteine in Futter für Nutztiere, Generaldirektion Gesundheit und Verbraucherschutz, Brüssel (vgl. http://europa.eu.int/comm/food/fs/bse/bse47_de.pdf)

EU (Europäische Kommission) 2003: Fragen und Antworten zu BSE, Generaldirektion Gesundheit und Verbraucherschutz, Brüssel (vgl. http://europa.eu.int/rapid/start/cgi/guesten.ksh?p_action.gettxt=gt&doc=MEMO/03/3|0|RAPID&lg=DE&display=))

EUWID 2003: Wirtschaft, Re Nr. 7 v. 11.02.2003: Klärschlamm und Tiermehl weisen hohe Potentiale an Phosphor auf – Rückgewinnung von Phosphor aus Gülle zieht Probleme nach sich, Seite 4; Problem der Wirtschaftlichkeit trübt Aussichten der Phosphorverwertung – Ruchay: Kein Verbot der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung, Seite 5; Bund fördert mit zwei Mio € Klärschlammaufbereitung in Gifhorn – Projekt soll Phosphorrückgewinnung zu marktfähigen Preisen ermöglichen, Seite 18

Fichtner 2002: Erarbeitung von energetischen und ökonomischen Kenndaten zur Bioenergie; B. Jahraus, Kurzbericht zum Vorhaben "Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse" im Auftrag des Öko-Instituts, Stuttgart

Fischer, P. 1988: Kompostierung von Grünrückständen aus Garten und Parks, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München

Flachowsky, G. u.a. 2002: Steigende Milchleistungen - Kann die Tierernährung Schritt halten?, in: Folkhard Isermeyer, Milchproduktion 2025; Braunschweig (Sonderheft 242)

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) – Hrsg. - 2000: Leitfaden Bioenergie, im Auftrag des BMVEL, Gülzow

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) 2000: Leitfaden Bioenergie, im Auftrag des BMVEL, Gülzow

Fricke, K u.a. 2000: Bundesweite Umfrage zur Optimierung der Bioabfallsammlung, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Fricke, K./Turk, T./Vogtmann, H. 1989: Grundlagen zur Kompostierung von Bioabfällen, Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen, Kassel

FSC (Forest Stewardship Council) 2001: Deutscher FSC- Standard vom 28. November 2001; FSC Arbeitsgruppe Deutschland e.V., Freiburg

FSC (Forest Stewardship Council) 2003: Internetauftritt der AG Deutschland des FSC unter www.fsc-deutschland.de

- Hamelinck, C.N. u.a. 2002: Fischer-Tropsch from Biomass: system Study and routing to implementation - preliminary results, in: Proceedings of 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 17-21 June 2002, Amsterdam
- Hartmann, Hans 1995: Energie aus Biomasse; VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf
- Hartmann, Hans/Kaltschmitt, Martin (Hrsg.) 2002: Biomasse als erneuerbarer Energieträger - Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Energien; Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Bd. 3, Landwirtschaftsverlag
- Hartmann, Hans/Strehler, A. 1995: Die Stellung der Biomasse; Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Münster
- Hensche, H.-U. u.a. 1998: Schweinefleischproduktion in 2000 und 2010 - Szenarien und zukunftsrobuste Strategien, Universität-Gesamthochschule Paderborn, Soest
- Hoffmann, H. 2002: mündliche Mitteilung
- Hofmann u.a. 2000: Waldnutzung in Deutschland; Materialien zur Umweltforschung 35, Hrsg. Sachverständigenrat für Umweltfragen, Stuttgart
- Hofmann, M. 1998: Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen im Kurzumtrieb, Merkblatt 11, Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten, Hann. Münden.
- IE (Institut für Energetik und Umwelt) 2003: Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG); Endbericht, Leipzig
- IE (Institut für Energetik und Umwelt) 2004: Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) - Anhang: Wärmegewinnung aus Biomasse; Projektnummer 17/02, Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Leipzig
- IEA (International Energy Agency) 2000: Experience Curves for Energy Technology Policy, Paris
- IEA (International Energy Agency) 2003: Creating Markets for Energy Technologies, Paris
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) 2002: Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Entwicklung und Anpassung von Methoden zur Emissionsprognose und zur Erstellung von Emissionsszenarien; Teilbericht (Entwurf) Abfall- und Abwasserwirtschaft, Heidelberg
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung)/IUS (IUS Weisser & Ness GmbH) 2004: Naturschutzaspekte bei der Nutzung erneuerbarer Energien; Endbericht für das BfN, Heidelberg/Potsdam
- IfLS (Institut für Ländliche Strukturforchung and der Universität Frankfurt) 2001: Nachhaltige Nahrungsmittelproduktion: Szenarien und Prognosen für die Landwirtschaft bis 2030 - Handlungsbedarf und Langfriststrategien für die Umweltpolitik, Karlheinz Knickel et al., Endbericht zum F&E-Vorhaben für das UBA, Frankfurt
- IUS (IUS Weisser & Ness GmbH)/TUB (Technische Universität Berlin - Institut für Landschafts- und Umweltplanung, Fachgebiet Landschaftsplanung) 2003: Festlegungen für Biomasse-Potenzialannahmen unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten im Stoffstrom- und Ausbauprojekt; K. Scheurlen/W. Peters, Potsdam/Berlin

- IVD (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen) 2000a: Verhalten von Quecksilberemissionen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen unter besonderer Berücksichtigung des gasförmigen Anteils; Hocquel, M.; Spliethoff, H.; Hein, K.R.G.; Universität Stuttgart
- IVD (Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart) 2000b: Untersuchungen zum Stand der Mitverbrennung von Klärschlamm, Hausmüll und Biomasse in Kohlekraftwerken; Schlussbericht, Stuttgart
- IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme) 2001: Fortschreibung der Saarländischen Abfallerhebung; Entsorgungsverband Saar (unveröffentlicht)
- IZES (Institut für Zukunftsenergiesysteme) 2002: Studie zur Weiterentwicklung der energetischen Verwertung von Biomasse im Saarland, Teil 1: Herleitung von Biomasse – Potenzialen in unterschiedlichen Betrachtungsebenen, Saarbrücken
- Kaimer, M./Schade, D. 2002: Zukunftsfähige Hausmüllentsorgung, Berlin
- Kaltschmitt, M./Fischer, J./Langnickel, U. - Hrsg. 2002: Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen; Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 47, Erich-Schmidt, Berlin
- Kaltschmitt, Martin 1993: Technisch nutzbare Biogaspotentiale der Nutztierhaltung in der Bundesrepublik Deutschland; in: KTBL, Kosten landwirtschaftlicher Biogaserzeugung, Darmstadt
- Kaltschmitt, Martin 1996: Nutzung biogener Brennstoffe - Stand und Perspektiven; Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 6: Biomasse als Festbrennstoff; Landwirtschaftsverlag; Münster. www.fnr.de/veroff/nrband6/teil01.pdf
- Kaltschmitt, Martin u.a. 2003a: Energiegewinnung aus Biomasse; Gutachten für den WBGU, Berlin/Heidelberg
- Kaltschmitt, Martin u.a. 2003b: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (3. Auflage)
- Kaltschmitt, Martin/Thrän, Daniela 2003: Biomasse für Strom, Wärme und Kraftstoffe. Was kann die Land- und Forstwirtschaft bereitstellen?; in: UFOP - Jahresbericht 2003, Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., Berlin
- Kern, M. 2000a: Kompostanlagen in der Bundesrepublik Deutschland, in: Müll – Handbuch, Erich Schmidt Verlag, MuA, Lfg. 2/00, Berlin
- Kern, M. 2000b: Vergärungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland, in: Müll – Handbuch, Erich Schmidt Verlag, MuA, Lfg. 2/00, Berlin
- Kern, M./Sprick, W. 2001: Abschätzung des Potenzials an regenerativen Energieträgern im Restmüll; in: Bio- und Restabfallbehandlung V, Witzenhausen - Institut, Kassel
- Klauß, M./Bidingmaier, W. 2002: Kompostierbare Verpackungen – Konsequenzen für die Bioabfallsammlung am Beispiel des BAW – Modellprojektes Kassel; in: Tagungsband 63. Informationsgespräch des ANS e.V., Berlin
- Kleinhanß, W. u.a. 2000: Folgenabschätzung alternativer Entsorgungsverfahren für Tierkörper und Schlachtabfälle bei einem Verwendungsverbot zur Futtermittelherstellung, Braunschweig
- Klinski, Stefan 2002: Rechtliche Rahmenbedingungen und Probleme der Stromerzeugung aus Biomasse, Juristische Handreichung zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Umweltbundesamts „Erneuerbare Energien – Rechtliche Fragen“, Berlin
- Knickel, K. 2001: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Die Zukunft dauerhaft umweltgerecht gestalten; Umweltbundesamt, Berlin

- Knox, K. 2002: State of the art of landfill within the EU, in: The Future of Waste Management in Europe, Strasbourg, October
- Kolloch 1990: Ökonomische Untersuchungen zur Ernte und zum Einsatz von Stroh und Schwachholz als Energieträger in Großfeuerungsanlagen (1 MW bis 10 MW); Dissertation an der Technischen Universität München, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
- KOM (Kommission der Europäischen Gemeinschaft) 2000: Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger; Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan; Mitteilung der Kommission, Brüssel
- Kranert, M. 2002: Grenzen der Grenzwerte bei Klärschlamm und Kompost, in: ANS 2002
- Kreikenbohm, I. 2002: Potenzialermittlung biogener Festbrennstoffe in der Region Hannover, Klimaschutzagentur Region Hannover gGmbH, Hannover
- Kreins, P. u.a. 2002: Auswirkungen der Vorschläge der EU-Kommission im Rahmen der Agenda 2000 Halbzeitbewertung auf Produktion, Faktoreinsatz und Einkommen der deutschen Landwirtschaft (Modellannahmen auf Grundlage des Agrarsektormodells RAUMIS); in: *Agra-Europe* 02(31)
- Kroschewski, A. 1973: Ergebnisse einer Untersuchung zu den Stroherträgen bei Getreide; in: Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 1973, Nr. 122, S. 137-143
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V) 2000: KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft, Darmstadt
- Kuhn E./Döhler, H. 1995: Kofermentation; KTBL, Darmstadt
- Landwirtschaftskammer Westfalen Lippe 2003: Richtsätze für die Bewertung von landwirtschaftlichen Kulturen 2003; Landwirtschaftskammer Westfalen Lippe, Referat 21 <http://www.lk-wl.de/beratung/pdf/richtsaetze.pdf>
- LBA 1997: Materialsammlung Futterwirtschaft, München
- LFA MV (Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern) 2001: Schnellwachsende Baumarten – Ergebnisse aus Mecklenburg-Vorpommern 1993-1999, Gülzow, <http://www.landwirtschaft-mv.de/nwe-baum.mv>
- LWF Bayern (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) 1996: Schnellwachsende Baumarten, ihr Anbau und Verwertung, Freising, <http://www.lwf.bayern.de/waldinfo/schn96/nr.8.htm>.
- Maier, J. 2002: Biomassebefeuerte Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen - energiewirtschaftliche Analyse und Optimierungsansätze am Beispiel einer Projektierung im Raum Stuttgart; Diplomarbeit, IER Universität Stuttgart
- Mantau u.a. 2002: Standorte der Holzwirtschaft; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg
- Martens, J. 2002: Nachsorge einer Modelldeponie mit dem System DepoGuard, in: WLB Wasser, Luft und Boden, 11-12/2002
- McMullan, J.T./Williams, B.C./McCahey, S. 2001: Strategic considerations for clean coal R&D, in: Energy Policy 29 (2001) S. 441-452
- Meyer, U. 2003: Restabfallbeseitigung ab 2005: Chancen für Verbundlösungen; Beratende Ingenieure, Ausgabe März 2003; MVA: Netto – Ergebnisse aktueller Ausschreibungen in Norddeutschland; MBA: incl. energetische Verwertung / Deponierung

- Möller, K. 2003: Systemwirkungen einer Biogaswirtschaft im ökologischen Landbau. Pflanzenbauliche Aspekte, Auswirkungen auf den N-Haushalt und auf die Spurengasemissionen; Zusammenfassung für das Forschungsvorhaben "Biogas im ökologischen Landbau", Universität Gießen (<http://www.uni-giessen.de/orglandbau/biogas-uebersicht>)
- NABU (Naturschutzbund Deutschland e. V.) 1999: Grünlandschutz und Agrarpolitik, Bonn
- Neis, Uwe 2001: Steigerung der Faulgasproduktion durch Ultraschallbehandlung, in: Energieta-ge „Biogas“ 31.05.-01.06.2001 in Essen; ATV-DVWK, S. 1-2
- Neis, Uwe/Nickel, Klaus 2001: Neue Trends bei Stabilisierung, Konditionierung, Eindickung und Entwässerung von Klärschlamm und ihre Kosten, in: ATV-DVWK 2001, S. 1
- Niemann, H. 2001: Fleischmehlindustrie verarbeitete mehr als 2,7 Mio. t Rohmaterial
- Niemann, H. 2002: Statistik der Fleischmehlindustrie mit Unterteilung nach Rohmaterial- und Verwendungsarten, in: *Die Fleischmehl-Industrie* 5/2002, Bonn
- Niemann, H. 2003: Bemühungen um höhere Wertschöpfung erfolgreich - Statistik der Fleischmehlindustrie 2002, in: *Die Fleischmehl-Industrie* 3/2003, Bonn
- Nottrodt, A. 2001: Technische Anforderungen und allgemeine Empfehlungen für die Entsorgung von Tiermehl und Tierfett in Verbrennungsanlagen, Hamburg/Berlin
- O'Keefe, L./Sturm, K. 2002: Clean Coal Technology Options - A Comparison of IGCC vs. Pulverized Coal Boilers, in: Gasification Technologies 2002 Conference; San Francisco
- Obenauf, U. 2003: pers. Gespräch 16.7.2003; Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) 2001: Environmental Indicators for Agriculture, Methods and Results, Paris www.oecd.org/agr/env/indicators.htm
- ÖKO (Öko-Institut) 2003a: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.2 - Datendokumentation zu den landwirtschaftlichen Prozessen, Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut) 2003b: Protokoll zum Agrarexpertenworkshop im Rahmen der "Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse" (unveröffentlicht)
- ÖKO (Öko-Institut) 2003c: Thesenpapier zum Expertenworkshop „Ex- und Importe von Lebens- und Futtermitteln: Bedeutung für die Nachhaltigkeit der Ernährung und der energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland“ im Rahmen der Projekte „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ und „Ernährungswende“ am 15.10.2003 in Frankfurt
- ÖKO (Öko-Institut)/TUM (TU München) 2003: Dokumentation des EDV-Teilmodells HEKTOR; K. Wiegmann/S. Simon, in: Anhangband zum Endbericht des Projekts „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“, gefördert vom BMU, Darmstadt (vgl. beigefügte CDROM)
- PEFC (Pan-European Forest Certification) 2000: Kriterien, Empfehlungen und Indikatoren für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung auf regionaler Ebene (Indikatorenliste) in Deutschland <http://www.pefc.de/system/indikatoren.htm>
- PEFC (Pan-European Forest Certification) 2003a: persönliches Gespräch am 12.08.2003
- PEFC (Pan-European Forest Certification) 2003b: Internetauftritt der PEFC unter <http://www.pefc.de>
- Probst, F.-W. 2001: Schlachtabfälle und Fleischverbrauch, in: FAL Jahresbericht 2000, Bericht aus dem Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik, Braunschweig

- Prognos/IER (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart)/WI (Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH) 2001: Szenarienerstellung, Zwischenbericht: Basisdaten für die Szenarienerstellung; 21. November 2001; Basel/Stuttgart/Wuppertal
- Ramesohl, S./Fischedick, M. 2003: Verfrühte Visionen ohne zwingende Notwendigkeit, in: VDI Nachrichten, 20. Juni 2003, Nr. 25, S. 23
- ReFuelNet - Hrsg. 2003: www.refuelnet.de
- Reimann, D. 2001: Zukunft der kommunalen Müllverbrennung, in: Müll und Abfall Nr. 7/2001
- Reimann, D. 2002: Mögliche Veränderungen der Abfallströme und MVA – Auslastungen nach Inkrafttreten der Gewerbeabfallverordnung; in: Müll und Abfall Nr. 9/2002
- Röhrich u.a. 2002: Entwicklung einer wirtschaftlichen Prozesskette zur energetischen Nutzung von halmgut- und holzartiger Biomasse im Freistaat Sachsen - Abschlussbericht 6//2001-12//2002. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden
<http://www.smul.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/fachinformationen/pflanzenproduktion/Nutzung/download/355.pdf>
- Sander, Kai 2001: Kostenentwicklung stationärer Brennstoffzellensysteme, in: BWK Bd.53 (2001) Nr.11, S. 42-49
- Schiefer 1984: Möglichkeiten der Aushagerung von nährstoffreichen Grünlandflächen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg* 57/58
- Schmid, W. u.a. 1989: Erträge und Ertragspotenzial von Magerwiesen; in: P. Thomet, W. Schmid and R. Daccord, Erhaltung von artenreichen Wiesen. Liebefeld-Bern
- Schmidt, E. 2001: Pressemitteilung vom 05.10.2001; SARIA-Bio-Industries
- Schneider, S./Kaltschmitt, M. 2002: Potenziale und Nutzung; in: Hartmann/Kaltschmitt 2002
- Sircar, R. u.a. 2003: Ganzheitliche Prognose von Siedlungsabfällen, in: Müll und Abfall Nr. 1/2003
- Solagro 1999: Umweltbewertungsverfahren für die Landwirtschaft für eine nachhaltige Landbewirtschaftung : drei Verfahren unter der Lupe, Toulouse
- Spitznagel, M. 2003: Strategie für eine zukünftige Klärschlamm Entsorgung in Bayern; Beitrag zum VDI-Wissensforum – Klärschlamm/Gülle/biogene Abfälle; 13.-14.02.2003 in Bamberg
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) 2002: Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes, Sondergutachten, Stuttgart
- Starflinger, J. 2003: Flugstromvergaser im IGCC-Prozess, in: BWK, Bd. 55 (2003), Nr. 6, S. 48 – 52
- StBA (Statistisches Bundesamt) 1998: Umweltstatistiken, Fachserie 19: Umwelt, Reihe 2.1 und 2.2, Wiesbaden
- StBA (Statistisches Bundesamt) 2003: Daten zum Abfallaufkommen, Wiesbaden
- Sundermann, D./Spoden, F./Dohr, R. 1999: Aufkommen und Verwertungswege für Altholz in Deutschland, in: Müll und Abfall 5/99, S. 269 ff
- Thamling, Nils 2003: Potenzial der energetischen Nutzung von Schwach- und Restholz aus nachhaltiger Forstwirtschaft in Deutschland, Diplomarbeit TU Berlin
- Thomet, P. u.a. (Hrsg.) 1989: Erhaltung von artenreichen Wiesen; Berichte des Nationalen Forschungsprogrammes "Nutzung des Bodens in der Schweiz", Liebefeld-Bern

Thrän, Daniela/Kaltschmitt, Martin 2004: Hemmnisse bei der Nutzung biogener Festbrennstoffe; in: Zeitschrift für Energiewirtschaft 28. Jg. Heft 1/2004, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden

TUB (Technische Universität Berlin) 2004: Integration naturschutzfachlicher Ziele in Szenarien und Modelle zur energetischen Nutzung von Biomasse. Kurzgutachten zum Umfang der Flächenrestriktionen der energetischen Biomassenutzung durch Naturschutz; J. Köppel/W. Peters/C. Schultze; im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

Twistel u.a. 2000: Erfassung des Potenzials an land- und forstwirtschaftlicher Biomasse zur stofflich energetischen Nutzung für unterschiedliche Verwaltungseinheiten des Freistaates Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 2, 5. Jahrgang 2000

UBA (Umweltbundesamt) 2001: Gesundes Wohnen mit umweltfreundlichen Möbeln, Berlin

UBA (Umweltbundesamt) 2002: Luftemissionen - Projektionen für Methan (CH₄), Stand Juli 2002 (www.umweltbundesamt.de)

UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie, Kommunikation) 2002: Aus für den Klärschlamm in der Düngung“, Bern (siehe <http://www.ambiente-svizzera.ch/buwal/de/medien/presse/artikel/20020513/00600/>)

VHI (Verband der deutschen Holzwerkstoffindustrien e.V.) 2002: Erfahrungsbericht zur BiomasseV. VHI-Stellungnahme zum EEG- Erfahrungsbericht; Dr. Udo Leukens und Hans Grabowski, Gießen

Vogt, R., u.a. 2002: Ökobilanz Bioabfallverwertung; Erich Schmidt Verlag, Berlin

WI (Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH)/DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) 2002: Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland; M. Fishedick/J. Nitsch u.a., im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 200 97 104, Wuppertal/Stuttgart

Wilfert, R. 2003: eigene Datenerhebungen im Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig

Wilfert, R./Schattauer, A. 2002: Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse - Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse - Zwischenbericht; Institut für Energetik und Umwelt, DBU-Projekt 15071 Leipzig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Hannover/Leipzig

Abkürzungsverzeichnis

A	Österreich
A1/2	Altholz der Kategorien 1 und 2
A1-4	Altholz der Kategorien 1 bis 4
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
atro	absolut trocken
aZWS	atmosphärische zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung
BASiS	B edürfnisfeldbezogene A nalyse von S toffströmen i n S zenarien
BBE	Bundesverband Bio-Energie
BEI	Bremer Energie-Institut
BFH	Bundesanstalt für Forst- und Holzforschung
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BHD	Brusthöhendurchmesser
BHKW	Block-Heizkraftwerk
BIO	Szenario BIOMASSE
BIO-SZEN	Biomasse-Szenario-Generator (EDV-Werkzeug des Projekts)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
Brik	Brikett
BrK	Braunkohle
BtL	Biomass-to-Liquids (synthetische Flüssigkraftstoffe aus Biomasse)
BuL-4000	Biomüll und Landschaftspflegeschnitt (Substratmix für Biogas-Anlage mit 4000 m ³ Fermentervolumen)
BZ	Brennstoffzelle
D	Deutschland
dena	Deutsche Energie Agentur
DepV	Deponieverordnung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DM	Dampfmotor
DT	Dampfturbine
DV	Dampfvergasung

DWR	Druckwasserreaktor
dZWS	druckaufgeladene zirkulierende Wirbelschicht-Vergasung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el	elektrisch
ETBE	Ethyl.- <i>tert.</i> -butylether
EtOH	Ethanol
EU	Europäische Union
EW	EinwohnerIn
F&E	Forschung und Entwicklung
FAA	Forschungsgesellschaft für Agrarpolitik und Agrarsoziologie e.V., Bonn
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig
FB	Festbett-Vergaser
FM	Frischmasse
FNR	Förderagentur Nachwachsende Rohstoffe
FSC	Forest Stewardship Council
FT	Fischer-Tropsch-Synthese
FZ	Forschungszentrum
GD	Gegendruck (-Heizkraftwerk)
GEMIS	<u>G</u> lobales <u>E</u> missions- <u>M</u> odell <u>I</u> ntegrierter <u>S</u> ysteme
GM	Gasmotor (-Blockheizkraftwerk)
GT	Gasturbine ((-Heizkraftwerk)
GuD	Gas- und Dampfturbinen (Kombi-) – Kraft- bzw. Heizkraftwerk
H ₂	Wasserstoff
HEKTOR	Hektar-Kalkulator (EDV-Werkzeug des Projekts)
HKW	Heizkraftwerk
HS	Hackschnitzel
HW	Heizwerk
H _{zg}	Heizung
IE	Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig
IEA	International Energy Agency, Paris
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg
IGCC	integrated gasification combined-cycle

IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken
KEV	Kumulierter Energie-Verbrauch
KEV _{NE}	nichternewerbarer Kumulierter Energie-Verbrauch
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt
Ko	(Stein)Kohle
KUP	Kurzumtriebs-Plantage (schnellwachsende Hölzer)
KW	Kraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Lkw	Lastkraftwagen
LRM	low risk material
MBA	mechanisch-biologische Müllbehandlung
MC	Molten Carbonate (Schmelzkarbonat)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MeOH	Methanol
MIV	motorisierter Individual-Verkehr
MTBE	Methyl.- <i>tert.</i> -butylether
MVA	Müll-Verbrennungs-Anlage
NABU	Deutscher Naturschutz-Bund
NH	Szenario NACHHALTIG
NL	Niederlande
NMVOC	non-methane volatice organic compounds
öko	aus ökologischem Landbau
ORC	Organic Rankine Cycle
org.	organisch
oTS	organische Trockensubstanz
OxKat	Oxidationskatalysator (für Gasmotoren)
P*km	Personen-Kilometer (Fahrleistung)
PEFC	Pan-European Forest Certification
PEM	Proton-Exchange Membrane – Brennstoffzelle
Pkw	Personenkraftwagen
PME	Pflanzenöl-Methylester
PTJ	Projektträger Jülich
R+S-300	Substratmix Rinder + Schweinegülle (für Biogas-Anlage mit 300 m ³ Fermentervolumen)

R+S-1500	Substratmix Rinder + Schweinegülle (für Biogas-Anlage mit 1500 m ³ Fermentervolumen)
RE	regenerative Energien
REF	Szenario REFERENZ
RME	Rapsöl-Methylester
RuM	Rindergülle und Mais
S	Schweden
SB	Sonnenblumen
SME	Sonnenblumen-Methylester
SNCR	selective non-catalytic reduction (Entstickungsverfahren)
SO	solid oxide (Festoxid)
SO	solid oxide fuel cell (Festoxid-Brennstoffzelle)
SRM	spezifiziertes Risikomaterial
SVA	Sondermüll-Verbrennungsanlage
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfälle
TBA	Tierkörperbeseitigungsanlagen
THG	Treibhausgase
TME	Tierfett-Methylester
TOPP	tropospheric ozone precursor potential
TS	Trockensubstanz
TSE	transmissible spongiforme Enzephalopathien
UBA	Umweltbundesamt
UMW	Szenario UMWELT
VDMA	Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt
WI	Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie
WS	Wirbelschicht
WSF	Wirbelschichtfeuerung
WWF	World Wide Fund for Nature
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V., Münchenberg
ZIP	Zukunfts-Investitions-Programm der Bundesregierung
ZR	Zuckerrüben (für Bioethanol-Herstellung)
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart
ZWS	zirkulierende Wirbelschicht

ANHANG (getrennter Berichtsband – siehe CDROM)

- A-1 Naturschutzfragen bei der Biomassenutzung – Bericht der TU Berlin
- A-2 Dokumentation zur Modell- und Werkzeugentwicklung
- A-3 Dokumentation der Technologiedatenbasis
- A-4 Dokumentation der Elementaranalysen biogener Brennstoffe
- A-5 Dokumentation der Daten zu Energiepreisen
- A-6 Dokumentation der Szenario-Daten und Detailergebnisse