Institut für Energetik und Umwelt
gemeinnützige GmbH

Institute for Energy and Environment

Endbericht

Schlüsseldaten Klimagasemissionen

Welchen Beitrag kann die Biomasse zum Klimaschutz leisten?

Geschäftsführung
Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Handelsregister
Amtsgericht Leipzig HRB 8071

Sitz und Gerichtsstand
Leipzig

Auftraggeber:

Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V.
Reinhardtstraße 18
10117 Berlin

Auftragnehmer: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Telefon: 03 41 – 24 34-4 12
Telefax: 03 41 – 24 34-4 33
Internet: www.ie-leipzig.de

Bearbeitung: Martin Kalies
Gerd Schröder

Mitarbeit: Werner Bohnenschäfer
Nicolle Fröhlich
Markus Müller
Matthias Reichmuth

Leipzig, April 2007

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

TEIL I - HINTERGRUNDINFORMATIONEN..……...…….……...….3

2 Energiesystem Deutschland 4

2.1 Verfügbarkeit von Primärenergieträgern 4

2.2 Primärenergieverbrauch 7

2.3 Endenergieverbrauch 9

3 Energie aus Biomasse 15

3.1 Biomasse - die nachwachsende Energiequelle 15

3.2 Biomassepotenziale 24

3.3 Gegenwärtige Biomassenutzung 32

TEIL II - KLIMAGASBILANZEN……...……36

4 Klimagasbilanzierung 37

4.1 Klimagase und deren Bedeutung 37

4.2 Methodik der Klimagasbilanzierung 39

4.3 Klimagasemissionen in Deutschland 41

5 Klimagasemissionen durch die energetische Nutzung von Biomasse 42

5.1 Definition der Bereitstellungsketten 42

5.2 Biomasseproduktion 45

5.3 Biomassebereitstellung und -aufbereitung 53

5.4 Biomassenutzung 77

6 Klimagasemissionen beim Einsatz substituierbarer fossiler Energieträger 98

6.1 Wärmebereitstellung 99

6.2 Strombereitstellung 103

6.3 Kraftstoffbereitstellung 106

7 Vergleich der Klimagasemissionen biogener und fossiler Energieträger 111

7.1 Wärmebereitstellung 111

7.2 Strombereitstellung 114

7.3 Kraftstoffbereitstellung 117

TEIL III - BEITRÄGE ZUM KLIMASCHUTZ……..…...……120

8 Minderung der Klimagasemissionen durch Biomassenutzung..... 121

8.1 Spezifischer Energieertrag der Pflanzenproduktion 121

8.2 Maximale Klimagasreduktion 122

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 127

ANHANG……..……...…….137

Literaturverzeichnis..... 138

Definition ausgewählter Energiebegriffe 144

Definition von Energiereserven und -ressourcen..... 146

Definition der Potenzialbegriffe..... 147

Glossar..... 148

Einheiten und Umrechnungsfaktoren..... 169

1 Einleitung

Der anthropogene **Treibhauseffekt** ist Gegenstand zum Teil sehr kontroverser umweltpolitischer Diskussionen auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene. Ursache für diesen vom Menschen verursachten Eingriff in das globale Klima sind unter anderem die durch Verbrennung **fossiler Energieträger** freigesetzten Klimagase[1].

Erneuerbare Energien – und darunter insbesondere die **Biomasse** – sind wichtige Optionen, dieser Klimaveränderung entgegen zu wirken. Ihre Nutzung ist im Vergleich zu fossilen Energieträgern mit geringeren Klimagasemissionen verbunden. Das bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte Kohlendioxid (CO_2) gilt als klimaneutral /IPCC 2001/.

Der mögliche Beitrag einer verstärkten energetischen Nutzung von Biomasse zur Verringerung der Klimagasemissionen wurde in der Vergangenheit in einer Vielzahl von Studien in Deutschland und auf europäischer Ebene untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien lassen sich aufgrund unterschiedlicher Annahmen nur eingeschränkt vergleichen. Auch werden in den Studien die Klimagasemissionen auf jeweils unterschiedliche Bezugsgrößen (z. B. ha, GJ, kWh) bezogen, so dass ohne entsprechende Umrechnungshilfen ein Vergleich der Ergebnisse dem Laien nicht möglich ist. Diese und weitere Aspekte erschweren eine adäquate Berücksichtigung der Studienergebnisse in den laufenden energie- und umweltpolitischen Diskussionen. Das **Ziel der vorliegenden Studie** ist die Aufarbeitung dieser Defizite und den möglichen Beitrag der Biomasse zur Verringerung der Klimagasemissionen in Deutschland darzustellen. Die Studie befasst sich daher mit folgenden Themen:

- Im **TEIL I** werden zunächst **HINTERGRUNDINFORMATIONEN** zur Einordnung der Thematik in das energiewirtschaftliche Umfeld und die Grundlagen zur energetischen Biomassenutzung dargestellt.
    - Als erstes wird das „**Energiesystem Deutschland**“ mit seinen wesentlichen Elementen beschrieben und bildet die Basis für mögliche künftige Veränderungen bei einem zunehmenden Einsatz von Biomasse (*Kapitel 2).*
    - Anschließend werden die grundsätzlichen Möglichkeiten der Bereitstel-

[1] Die Klima- oder auch Treibhausgase werden im Kapitel 4 näher beschrieben.

lung von „**Energie aus Biomasse“** erläutert sowie die Potenziale und aktuelle Nutzung dargestellt *(Kapitel 3)*.

- Der **TEIL II** der Studie befasst sich mit den **KLIMAGASBILANZEN** der biogenen und substituierbaren fossilen Energieträger.
  - Zur Einführung in die **„Klimagasbilanzierung**“ werden die Vorgehensweise und das methodische Grundgerüst kurz erläutert. Zur Bestimmung der Ausgangssituation werden darauf aufbauend die aktuellen Klimagasemissionen in Deutschland erläutert *(Kapitel 4)*.
  - Die **„Klimagasemissionen bei einer energetischen Nutzung von Biomasse“** beinhalten die detaillierte Darstellung der Biomasseketten von der Produktion über die Bereitstellung und Aufarbeitung bis hin zur Nutzung *(Kapitel 5)*.
  - Eine Darstellung der „**Klimagasemissionen beim Einsatz substituierbarer fossiler Energieträger“** beschreibt die Bereiche des konventionellen Energiesystems, in dem fossile Energieträger in nennenswerten Umfang durch Bioenergieträger ersetzt werden können. Außerdem wird ein Überblick über die technische Entwicklung der etablierten Systeme gegeben und der Einfluss auf die Klimagasemissionen dargestellt *(Kapitel 6)*.
  - Ein **„Vergleich der Klimagasemissionen“**, die mit der Nutzung biogener und fossiler Energieträger verbunden sind, zeigt die unterschiedlichen Reduktionspotenziale an Klimagasen auf *(Kapitel 7)*.
- Im **TEIL III** werden die **BEITRÄGE ZUM KLIMASCHUTZ,** die durch die energetische Biomassenutzung möglich sind, behandelt.
  - Unter Einbeziehung der in Deutschland verfügbaren Biomassepotenziale wird bilanziert, welche „**Minderung der Klimagasemissionen durch Biomassenutzung“** möglich ist *(Kapitel 8)*.
  - Abschließend erfolgt eine **Zusammenfassung** der Ergebnisse mit **Schlussfolgerungen** für die künftige energetische Nutzung von Biomasse *(Kapitel 9)*.

Ergänzende Informationen zu wichtigen Energiebegriffen und Energieeinheiten, ein Glossar sowie das Literaturverzeichnis finden sich im **ANHANG**.

Teil I

Hintergrundinformationen

2 Energiesystem Deutschland

Der Energieverbrauch in Deutschland hängt von vielen Einflussgrößen ab. Neben saisonalen und witterungsabhängigen Faktoren wird seine Höhe vor allem von der Einwohnerzahl und dem damit verbundenen Wohnungsbestand, der Anzahl an Kraftfahrzeugen und deren Fahrleistungen sowie der wirtschaftlichen Produktion beeinflusst. Aber auch der Grad der Energieeinsparung und die Effizienz des Energieeinsatzes spielen eine wesentliche Rolle. Zudem wird die Höhe des Energieverbrauchs durch die eingesetzten Energieträger und die damit verbundenen Nutzungstechnologien beeinflusst.

Nachfolgend wird die Verfügbarkeit fossiler Primärenergieträger vorgestellt und erläutert. Dem schließt sich die Darstellung der Entwicklung des Primär- und Endenergieverbrauchs in Form eines Rückblicks bis 1990, dem aktuellen Stand und eines Ausblicks bis 2010 an. Hiermit kann nur ein Kurzüberblick zum Energiesystem in Deutschland gegeben werden. Eine umfassendere Darstellung zu Vergangenheit und Zukunft der Energieversorgung in Deutschland findet sich zum Beispiel bei /EWI 2005/.

2.1 Verfügbarkeit von Primärenergieträgern

Hinsichtlich der Verfügbarkeit von fossilen Primärenergieträgern ist Deutschland ein rohstoffreiches wie auch ein rohstoffarmes Land. Die Reserven und Ressourcen[2] bei **Stein- und Braunkohlen** reichen – bezogen auf den inländischen Verbrauch – noch für mehrere Jahrhunderte. Die limitierenden Faktoren für die Nutzung dieser Primärenergieträger ergeben sich durch die hohen Förderkosten bei Steinkohle und die weitgehende Beschränkung der Braunkohlennutzung auf die Verstromung.

Die inländischen Reserven von **Erdöl und Erdgas** sind hingegen für die Energieversorgung völlig unzureichend. Bezogen auf den gegenwärtigen Primärenergieverbrauch würden die Reserven nur für etwa ½ Jahr beim Erdöl und etwa 3 Jahre beim Erdgas reichen /BGR 2004/. Entsprechend wird mit der heimischen Förderung nur etwa 3 % (Erdöl) bzw. 20 % (Erdgas) des Jahresverbrauchs dieser Energieträger abgedeckt. Bei einer Förderung auf dem heutigen Niveau wären die heimischen Erdöl- und Erdgasreserven in etwa 14 Jahren erschöpft /BGR 2004/.

---

[2] Im Anhang findet sich eine Definition für die Bedeutung von Reserven und Ressourcen.

Die Energieversorgung in Deutschland ist daher bereits heute zu über 60 % von **Energieimporten** abhängig (Abb. 2-1). Den größten Anteil an den Importen haben die Mineralöle vor allem wegen der fehlenden bzw. geringen heimischen Vorkommen. Aufgrund des Rückgangs der heimischen Steinkohlen- und Gasförderung sowie dem Anstieg beim Gasverbrauch werden diese weiter steigende Anteile an den Energieimporten erhalten. Der Importenergieanteil, wie auch die Importmengen, werden sich trotz sinkendem Primärenergieverbrauch weiter erhöhen und im Jahr 2030 wird die Energieversorgung in Deutschland voraussichtlich zu 76 % von Energieimporten abhängen /IE 2005/.

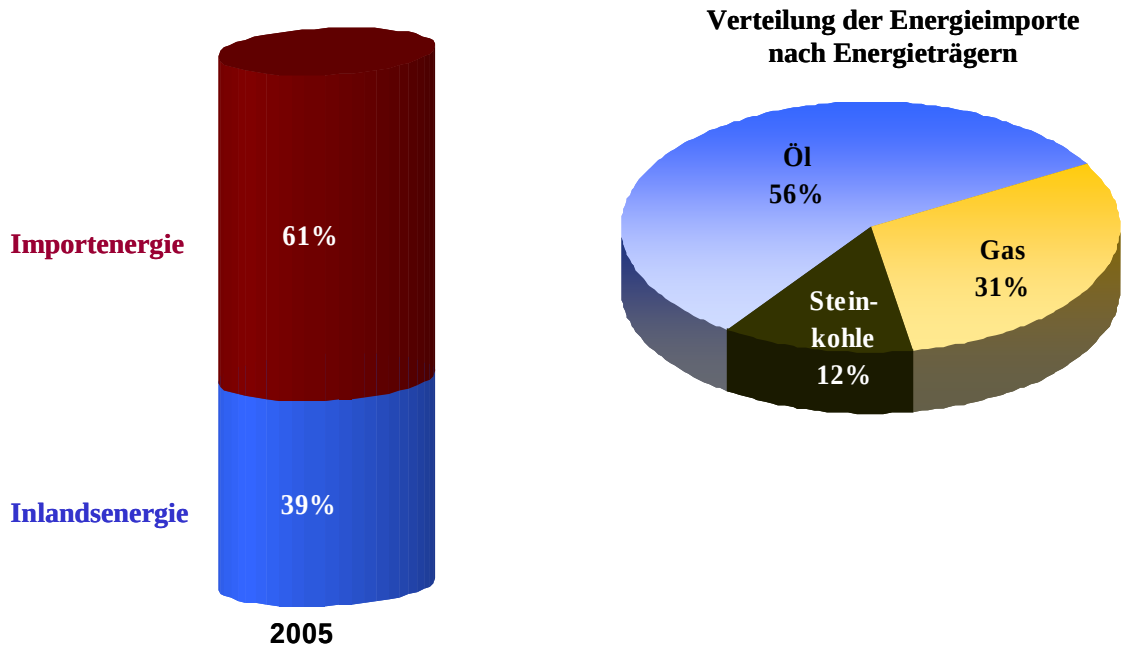


Abb. 2-1: Importabhängigkeit und Verteilung der Importenergie
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der Energiebilanzen/Auswertungstabellen; Anmerkung: Kernenergie als Inlandsenergie gewertet]

Von den politischen Unwägbarkeiten im Mittleren Osten ist die Energieversorgung in Deutschland zurzeit nur zu 6 % – bezogen auf die Importmengen – abhängig. Neben Energieimporten aus der Europäischen Union (EU) ist Russland mit einem Anteil von 30 % an den Importenergien mit Abstand das wichtigste Lieferland für die Energieversorgung /IE 2005/. Über die Verteilung der Lieferländer in den kommenden Jahren kann noch keine verlässliche Aussage getroffen werden. Aufgrund der Vorkommen in der EU ist aber sicher, dass die Importe hieraus zurückgehen. Die Ölreserven in der EU reichen nur für acht Verbrauchsjahre, wenn die Ölimporte in die Betrachtung nicht einbezogen werden. Unter Berücksichtigung der norwegischen Vorkommen und dem gegenwärtigen Fördervolumen sind die Erdöl- und Erdgasvorkommen in der Nordsee in etwa 25 Jahren erschöpft. Nur durch enorme Investitionsanstrengungen könnte noch eine weitere Streckung des Zeithorizontes erreicht werden /EU 2000/. Bei weiterhin steigendem Öl- und Gasverbrauch ist somit die EU auf zunehmend steigende Energieimporte angewiesen. Zwar könnte Russland durchaus mit zusätzlichen Energiemengen die fehlenden Importmengen ausgleichen, aber damit würde die Abhängigkeit von einem einzelnen Lieferland weiter zunehmen.

Da Deutschland also von Energieimporten besonders abhängig ist, ist die Verfügbarkeit von Energie ein sehr wichtiges Element der Versorgungssicherheit. Die in Deutschland und in der Welt zur Verfügung stehenden Energieressourcen lassen sich in Energievorräte (meist fossile Primärenergieträger) und Energiequellen (meist erneuerbare Energiequellen) einteilen. Die mit den fossilen Energieträgern verbunden Ressourcen werden nachfolgend dargestellt.

Als Orientierungswert für die Verfügbarkeit von Energierohstoffen wird die sogenannte **statische Reichweite** verwendet. Sie ist das Verhältnis aus den derzeit bekannten Reserven sowie der gegenwärtigen Förderung und gibt somit an, wann die Reserven bei gleich bleibender Förderung aufgebraucht sein werden. Da das Volumen der Reserven kontinuierlichen Schwankungen unterliegt, ist dieser Orientierungswert in den letzten Jahrzehnten für die fossilen Energieträger fast gleich geblieben.[3]

Der Blick auf die statischen Reichweiten der endlichen Energieträger zeigt, dass vor allem die Reserven von konventionellem Erdöl und Erdgas sowie Uran mit gut 40

[3] Weitere Erläuterungen zur Reichweite von Energieträgern finden sich im Anhang im Zusammenhang mit der Definition von Energiereserven und -ressourcen.

bzw. 60 Jahren nur noch begrenzte Zeit zur Verfügung stehen (Abb. 2-2). Diese kurzen Zeiträume erschließen sich auch dem menschlichen Zeitgefühl und lassen die genannten Energieträger – anders als bei Kohle – nur noch kurzfristig verfügbar erscheinen. Auch wenn die dargestellten Zeithorizonte nicht fix sind, ist jedoch für diese Energieträger gleichfalls aufgrund der Lagerstättenkonzentration in wenigen Ländern mit steigenden Energiepreisen zu rechnen.

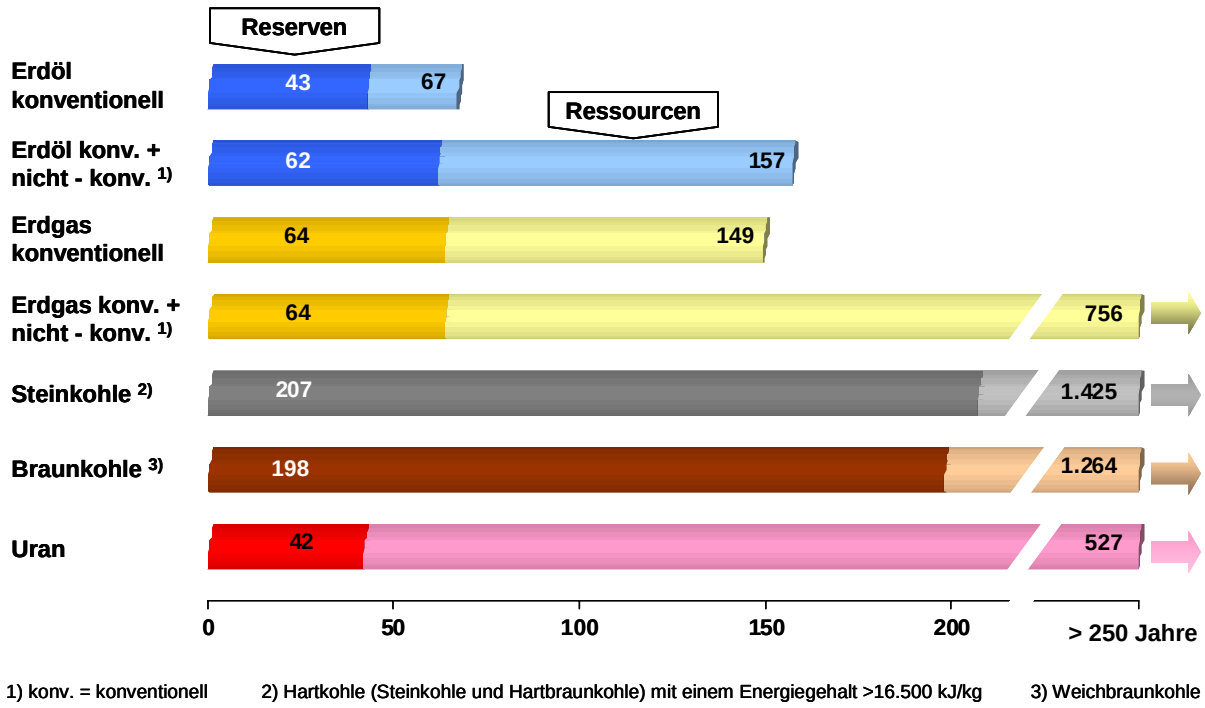


Abb. 2-2: Statische Reichweite für endliche Energieträger ab dem Jahr 2000 *[Quelle: BGR 2003]*

2.2 Primärenergieverbrauch

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland ist bisher geprägt durch die traditionelle Verwendung der inländischen Braun- und Steinkohle sowie der wesentlich auf Importe angewiesenen Energieträger Erdöl und Erdgas. Ergänzt wird dieser Energiemix durch Kernenergie und erneuerbare Energien. Letztere wurden bisher wesentlich durch die Wasserkraftnutzung zur Stromproduktion sowie durch Biomasse zur Wärmeversorgung bereitgestellt. Der Primärenergieverbrauch hat sich zwischen 1990 und 2005 leicht um etwa 5 % verringert (Abb. 2-3). Obwohl verbrauchssteigernde Faktoren wie zum Beispiel der PKW-Bestand oder die Wirtschaftsleistung zugenommen haben, hat u.a. die Verbesserung der Energieeffizienz zu dem sinkenden Primärenergieverbrauch geführt. Bezogen auf die Wirtschaftsleistung in Deutschland – gemes-

sen am Bruttoinlandsprodukt (BIP) – ist der spezifische Primärenergieverbrauch (PEV/BIP) in den zurückliegenden Jahren (seit 1990) um 23 % gesunken. Von 8,7 MJ/€ im Jahr 1990 auf 6,7 MJ/€ im Jahr 2005.[4] Dieser Trend ist vor allem auf den technologischen Fortschritt in der Energiewirtschaft einschließlich eines veränderten Energieträgereinsatzes, die sparsamere und rationellere Energienutzung sowie die Strukturveränderungen in der Industrie zurückzuführen.

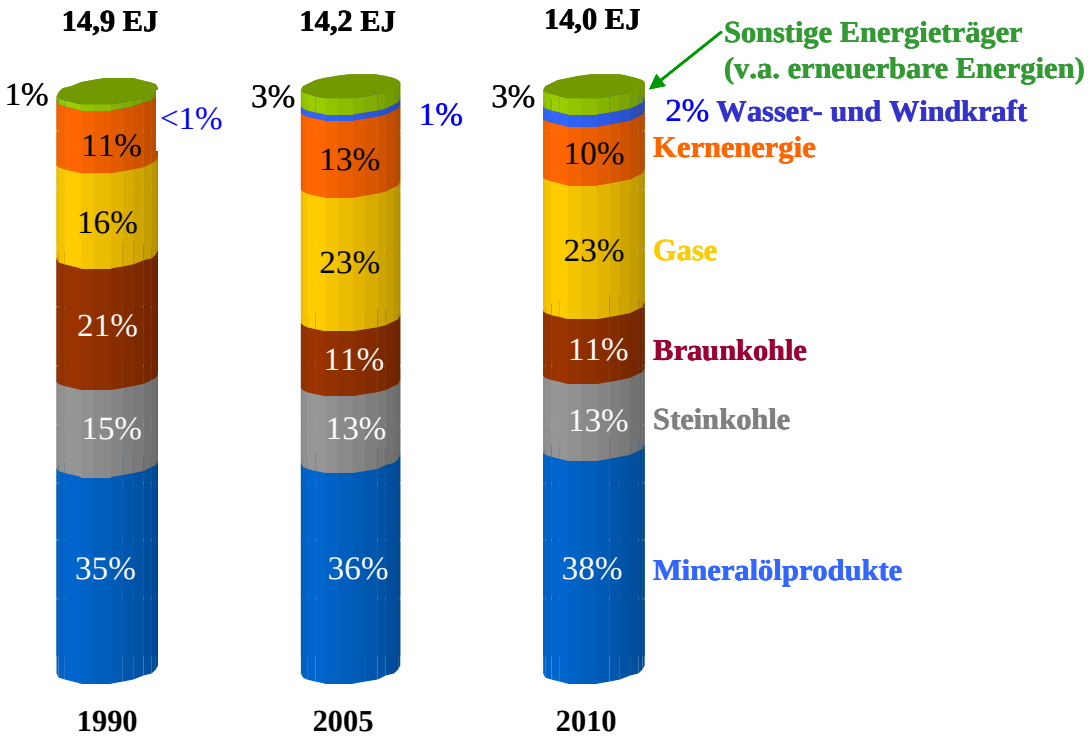


Abb. 2-3: Primärenergieverbrauch und Primärenergieträgerverteilung in Deutschland von 1990 bis 2010
[Quelle: AG Energiebilanzen, Prognos 2004]

Für die Primärenergieversorgung sind **Mineralöle** mit einem Anteil von gegenwärtig 36 % nach wie vor der **wichtigste Energierohstoff**. Zu fast 25 % wird der Primärenergieverbrauch durch **Braun- und Steinkohle** abgedeckt. Ihr Anteil hat sich nach den Umstrukturierungen in Ostdeutschland im Vergleich zum Beginn der 1990er-Jahre um zwölf Prozentpunkte verringert. Der **Erdgasanteil** hat sich kontinuierlich erhöht und erreicht beinahe die Bedeutung der Kohlenutzung. Die Kernenergie und sonstigen Energieträger haben mit 13 % bzw. 4 % einen nicht unerheb-

[4] Bezogen auf das reale Bruttoinlandsprodukt in Preisen von 2000 *[BMWi 2006]*.

lichen Anteil an der Deckung des Primärenergieverbrauchs. Besonders durch den Ausbau der Windenergienutzung hat sich der Anteil der erneuerbaren Energien in den 1990er-Jahren deutlich erhöht /Prognos 2004/.

Durch die weitere Verbesserung der Energieeffizienz bei der Energienutzung wird sich die **Tendenz des sinkenden Primärenergieverbrauchs** bis 2010 weiter fortsetzen. Im Vergleich zum Jahr 2005 wird der Primärenergieverbrauch um gut weitere 1 % sinken. Die Verteilung der Primärenergieträger wird sich bis 2010 nicht grundlegend ändern, da zum Beispiel Effekte wie der Ausstieg aus der Kernenergie erst nach diesem Zeitpunkt deutlicher wirksam werden. Der Anteil erneuerbarer Energien wird sich von gegenwärtig etwa 4 % auf dann 5 % erhöhen. Es wird somit nur ein kleiner Teil der möglichen Potenziale erneuerbarer Energien erschlossen, wenn die Entwicklung gemäß dieser Prognose erfolgen sollte. Die angestrebte Minderung der Klimagasemissionen um 21 % bis 2010 würde aber voraussichtlich erreicht /Prognos 2004/.

2.3 Endenergieverbrauch

Die Endenergie ist diejenige Energieform, die letztendlich vom Nutzer z.B. in Form von Strom, Wärme und Kraftstoffen zur Befriedigung seiner Bedürfnisse verbraucht wird. Der Endenergieverbrauch ist zwischen 1990 und 2005 nur geringfügig gesunken und beträgt gegenwärtig 9,2 EJ (Abb. 2-4). Dies entspricht nur etwa 2/3 der eingesetzten Primärenergie. Der Verlust von etwa 1/3 auf dem Weg von der Primär- zur Endenergie ist vor allem auf die Umwandlungsverluste in Raffinerien, Kraftwerken usw. zurückzuführen. Bis 2010 wird ein konstanter Endenergieverbrauch erwartet. Auch werden sich die Energieträgeranteile nicht wesentlich ändern.

Trotz eines konstanten Endenergieverbrauchs ist die Wirtschaftleistung aufgrund von Energieeffizienzsteigerungen - gemessen z. B. als Bruttoinlandsprodukt - gestiegen (vgl. Kap. 2.2).

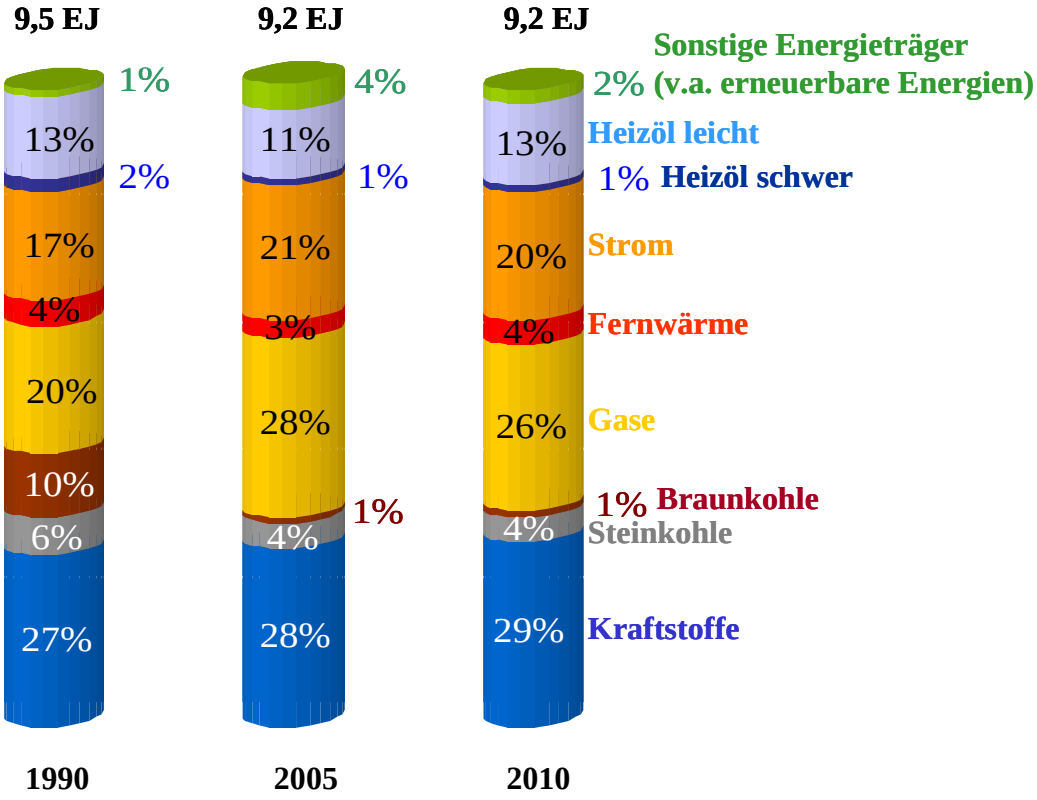


Abb. 2-4: Endenergieverbrauch und Endenergieträgerverteilung in Deutschland von 1990 bis 2010
[Quelle: AG Energiebilanzen, Prognos 2004]

Der Endenergieverbrauch ist zu 73 % durch die direkte Nutzung fossiler Energieträger gekennzeichnet. Während die Stromnutzung noch eine bedeutende Rolle besitzt, haben die übrigen Energieträger einschließlich der erneuerbaren Energien mit einem Anteil von zusammen etwa 7 % nur eine geringe Bedeutung. Bis 2010 werden sich die Energieträgeranteile nicht wesentlich verändern. Mineralöle (Heizöl und Kraftstoffe) bleiben mit einem Anteil von über 40 % insbesondere aufgrund des Einsatzes im Verkehrssektor mit Abstand die wichtigsten Energieträger.

Die Haushalte und der Verkehr sind mit gleichen Anteilen die größten Energieverbraucher in Deutschland (Abb. 2-5). Obwohl der Wandel von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft weiter voranschreitet, wird in der Industrie aufgrund der energieintensiveren Produktionsprozesse weiterhin insgesamt mehr Energie verbraucht als im Verbrauchssektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Bis

2010 wird sich an dieser Situation und Verteilung zwischen den einzelnen Verbrauchssektoren nicht wesentlich etwas ändern.

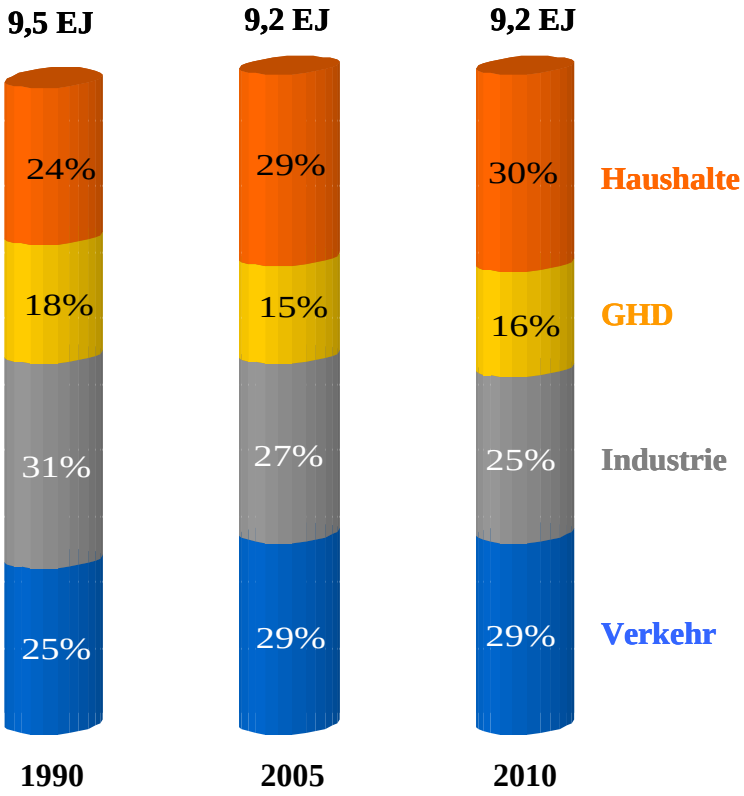


Abb. 2-5: Endenergieverbrauch nach Verbrauchssektoren in Deutschland von 1990 bis 2010
[Quelle: AG Energiebilanzen, Prognos 2004]

Der Verbrauch von Endenergie erfolgt hauptsächlich für die Bereitstellung von Nutzenergie in Form von Wärme für Heizung und Warmwasser (38 %), Prozesswärme (21 %) sowie mechanischer Energie (40 %). Der Energieeinsatz zu Beleuchtungszwecken verursacht nur einen Anteil von lediglich 2 % am Energieverbrauch und besitzt somit nur eine geringe Bedeutung (Abb. 2-6).

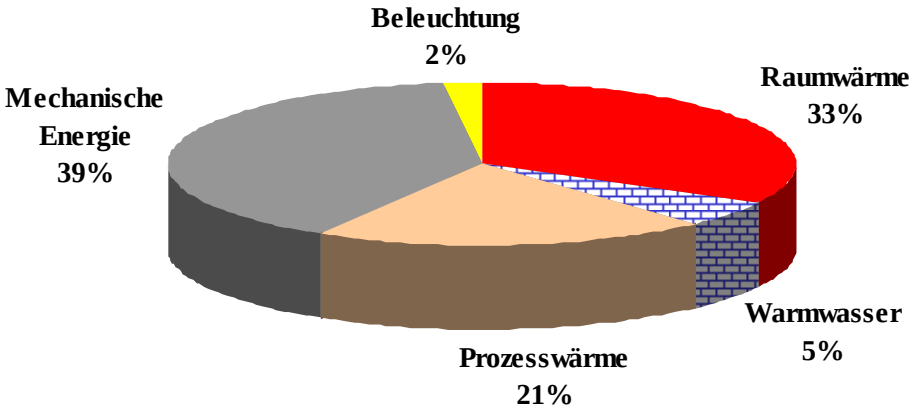


Abb. 2-6: Endenergieverbrauch nach Nutzungsarten in Deutschland im Jahr 2004
[Quelle: BMWi 2006, Prognos 2004]

Die eher mit der Endenergie Strom verbundenen Nutzungen (mechanische Energie) werden wie in der Vergangenheit auch künftig weiter steigen. Die Wärmenutzung wird aufgrund zunehmender Effizienzsteigerungen (z.B. Wärmedämmung) hingegen sinken. Fast die Hälfte des Wärmemarktes wird mit weiter steigender Tendenz von Gas abgedeckt. Mit Öl erfolgt immer noch mehr als 25 % der Wärmeerzeugung. Die übrigen Energieträger werden alle nur Anteile unterhalb von 10 % erreichen. Die erneuerbaren Energien werden vor allem in den Haushalten eingesetzt. Mit einem Anteil von 3 % am gesamten Wärmemarkt ist ihr Beitrag zur Bedarfsdeckung gegenwärtig und künftig bis 2010 aber noch gering (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Energieeinsatz für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme nach Energieträgern und Verbrauchssektoren
[Quelle: Prognos 2004 und eigene Berechnungen]

Energieträger	Haushalte		Gewerbe, Handel, Dienstleistungen		Industrie [1)]		SUMME	
	2000 [PJ]	2010 [PJ]	2000 [PJ]	2010 [PJ]	2000 [PJ]	2010 [PJ]	2000 [PJ]	2010 [PJ]
SUMME	**2.489**	**2.393**	**1.073**	**961**	**1.856**	**1.713**	**5.417**	**5.067**
- Fernwärme	*163*	*160*	*126*	*120*	*62*	*59*	*350*	*338*
- Öl	*939*	*827*	*352*	*269*	*203*	*202*	*1.495*	*1.298*
- Gas	*1.028*	*1.066*	*506*	*484*	*945*	*859*	*2.479*	*2.409*
- Kohle	*53*	*23*	*15*	*8*	*443*	*378*	*511*	*408*
- Strom	*169*	*164*	*72*	*75*	*198*	*210*	*438*	*448*
- Erneuerbare Energien	*137*	*154*	*4*	*6*	*4*	*6*	*145*	*166*
SUMME	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**
- Fernwärme	*7%*	*7%*	*12%*	*12%*	*3%*	*3%*	*6%*	*7%*
- Öl	*38%*	*35%*	*33%*	*28%*	*11%*	*12%*	*28%*	*26%*
- Gas	*41%*	*45%*	*47%*	*50%*	*51%*	*50%*	*46%*	*48%*
- Kohle	*2%*	*1%*	*1%*	*1%*	*24%*	*22%*	*9%*	*8%*
- Strom	*7%*	*7%*	*7%*	*8%*	*11%*	*12%*	*8%*	*9%*
- Erneuerbare Energien	*6%*	*6%*	*0%*	*1%*	*0%*	*0%*	*3%*	*3%*

1) Verteilung nach Bedarfsarten und Énergieträgern durch IE Leipzig auf der Basis von Prognos 2004 und BMWA 2005.

Neben der Nutzung erneuerbarer Energien als Endenergie direkt bei den Verbrauchern, ist die **Stromerzeugung** gleichfalls ein wichtiger Einsatzbereich. In den zurückliegenden Jahren konnte in diesem Bereich insbesondere durch den Ausbau der Windenergie und der Biomassenutzung eine deutliche Erweiterung der Erzeugungskapazitäten erzielt werden. Die Situation der Stromerzeugung in Bezug auf die Bedeutung der einzelnen Energieträger stellt sich wie folgt dar.

Die **Bruttostromerzeugung** hat sich von 550 TWh im Jahr 1990 um knapp 13 % auf 619 TWh bis 2005 erhöht. Ein leichter Rückgang der Erzeugung um 4 % auf 593 TWh wird bis 2010 erwartet. Hierbei wird allerdings unterstellt, dass Deutschland entgegen der derzeitigen Situation mit Stromexportüberschüssen im Jahr 2010 Nettostromimporteur in der Größenordnung von etwa 11 TWh sein wird. Der **Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung** wird sich hingegen zwischen 2005 und 2010 deutlicher als die Erzeugung um 6 % verringern (Abb. 2-7). Dies ist auf die Erneuerung des Kraftwerksparks mit verbesserten Wirkungsgraden zurückzuführen (von 40 % im Jahr 2003 auf 42 % im Jahr 2010) /Prognos 2004/. Ein Anteils- und Mengenzuwachs an der Stromerzeugung wird vor allem für die erneuerbaren Energien

(Windkraft, Biomasse) erwartet. Mit einem Anteil von etwa 10 % bezogen auf den Brennstoffeinsatz werden sie im Vergleich zu anderen Energieträgern aber auch im Jahr 2010 erst einen kleinen Teil zur Stromversorgung beitragen.

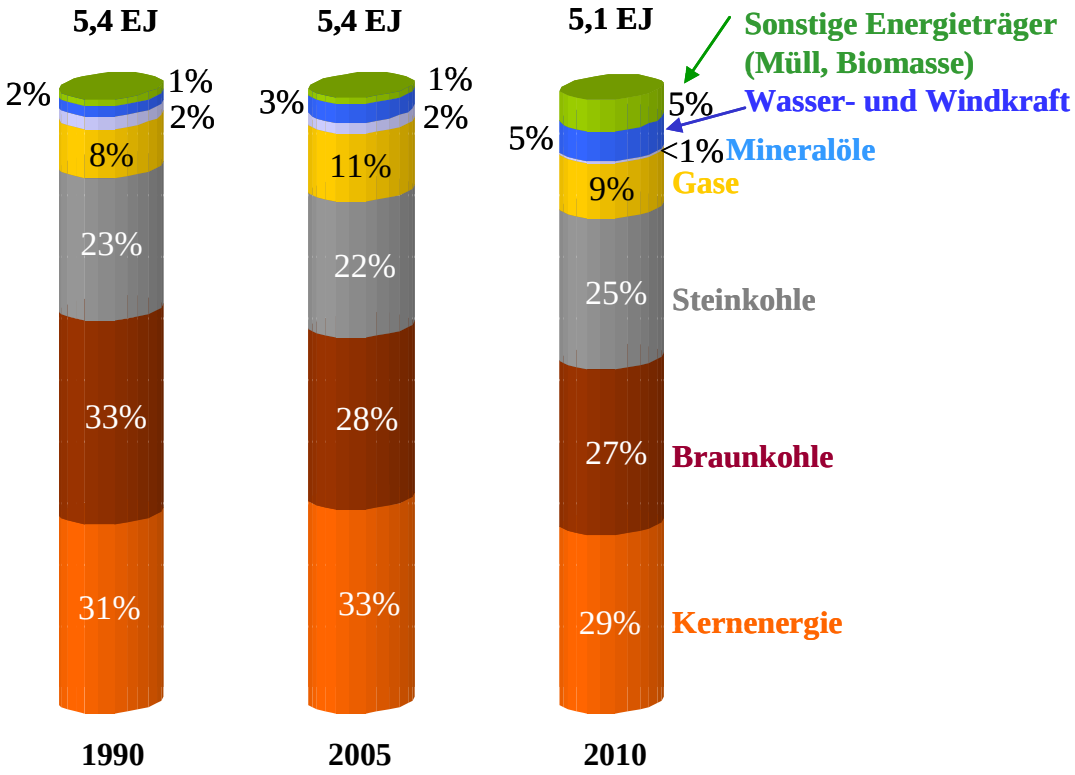


Abb. 2-7: Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010
[Quelle: AG Energiebilanzen, Prognos 2004]

3 Energie aus Biomasse

3.1 Biomasse - die nachwachsende Energiequelle

Unter Biomasse werden Stoffe organischer Herkunft verstanden, die zur Energiebereitstellung genutzt werden können. Biomasse beinhaltet damit die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere) und die daraus resultierenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (z. B. Exkremente, Stroh, Schlachthofabfälle) /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Biomasse wird i. Allg. unterteilt in Energiepflanzen, Ernterückstände, organische Nebenprodukte und organische Abfälle. Unter ersteren werden ausschließlich zur Energiegewinnung angebaute Pflanzen verstanden (z. B. Kurzumtriebspappeln, Chinaschilf, Energiegetreide). Ernterückstände fallen bei der land- und forstwirtschaftlichen Produktion in Koppelproduktion (z. B. Stroh, Waldrestholz) und organische Nebenprodukte bei der Weiterverarbeitung land- und forstwirtschaftlicher Produkte an (z. B. Gülle, Kappholz, Sägespäne).

Diese Biomassen müssen für eine energetische Nutzung zunächst verfügbar gemacht werden (Abb. 3-1). In den allermeisten Fällen ist dazu ein Ernte- und Sammelprozess, meistens zusätzlich ein Transportprozess notwendig. In vielen Fällen muss die Biomasse zusätzlich vor der energetischen Nutzung mechanisch aufbereitet werden (u. a. Zerkleinerung, Verdichtung).

Anschließend kann die Biomasse zur Wärme- und/oder Strombereitstellung bzw. zur Bereitstellung von Kraftstoffen genutzt werden. Dazu ist sie in einen entsprechenden festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträger zu überführen, der dann unter Energiefreisetzung verbrannt werden kann. Diese Bereitstellung der Bioenergieträger kann durch eine einfache mechanische Aufbereitung (z. B. von biogenen Festbrennstoffen als Hackschnitzel oder Pellets) oder durch eine aufwändigere thermo-, physikalisch- bzw. bio-chemische Umwandlung erfolgen. Bei der Umwandlung werden durch entsprechende Veredelungsprozesse die Eigenschaften der Bioenergieträger hinsichtlich der Energiedichte, der Handhabung, der Speicher- und Transporteigenschaften, der Umweltverträglichkeit und der energetischen Nutzung verändert. Diese Bioenergieträger können dann durch eine Verbrennung in entsprechenden Anlagen in die letztlich gewollte Wärme oder den gewünschten Strom umgewandelt werden (Abb. 3-1) /Hartmann und Kaltschmitt 2002/.

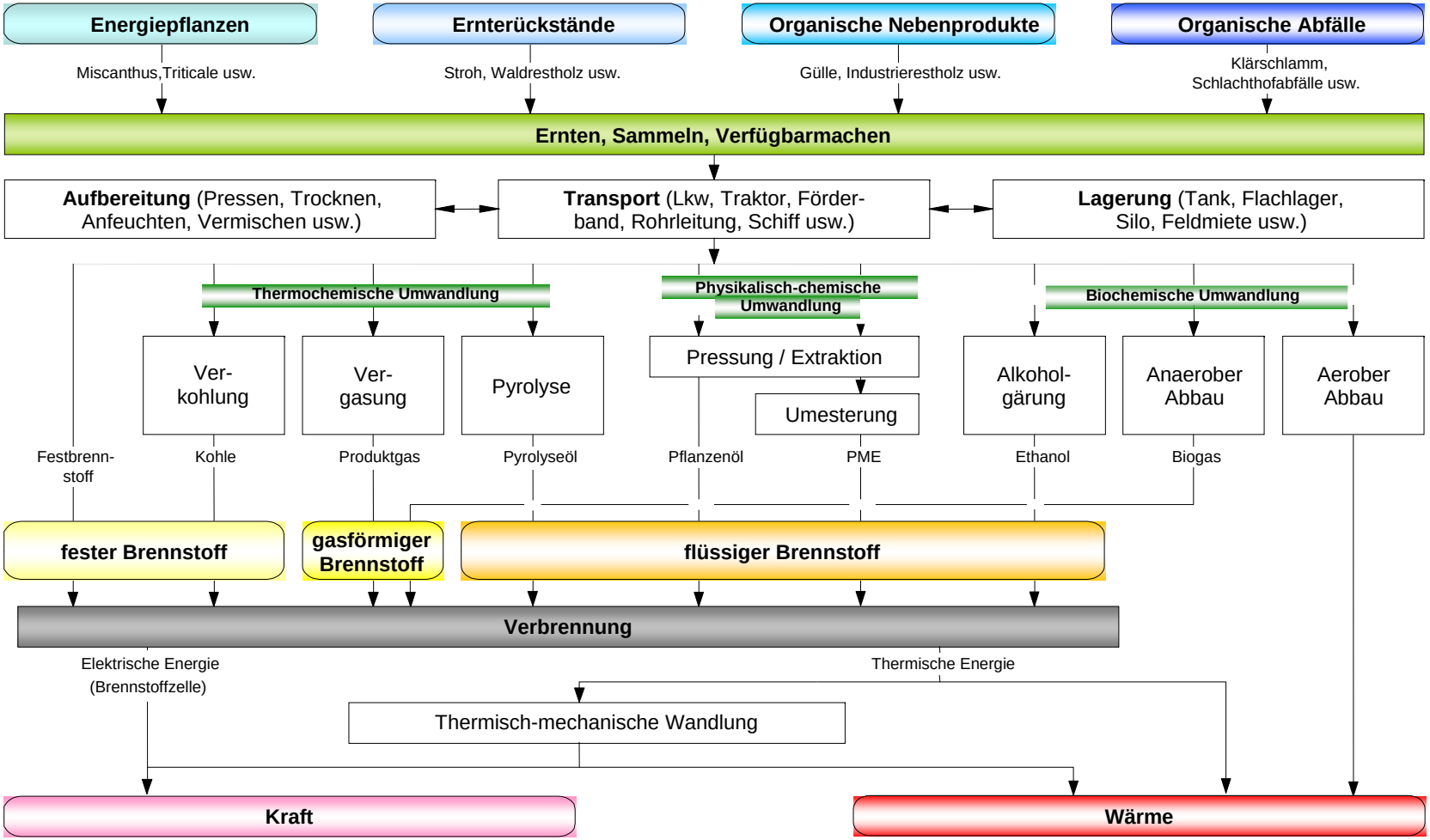


Abb. 3-1: Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse zur End- und Nutzenergiebereitstellung
[Quelle: Hartman und Kaltschmitt 2002]

Nachfolgend werden die verschiedenen Veredelungsverfahren jeweils mit der anschließenden Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie erläutert. Unabhängig davon kann der biogene Festbrennstoff auch direkt – nach einer vergleichsweise einfachen mechanischen Aufbereitung – durch eine Verbrennung genutzt werden; dies ist einer der "klassischen" Anwendungsfälle der energetischen Biomassenutzung. Diese verschiedenen Optionen werden nachfolgend dargestellt.

Ausschließliche Verbrennung von Biomasse

Bei der klassischen Verbrennung fester Biomasse in entsprechenden Feuerungsanlagen wird i. Allg. unterschieden zwischen dem Einsatz in Kleinst-, Klein- und Großanlagen zur Wärme- und/oder Strombereitstellung. Dabei ist die Wärmebereitstellung in allen Leistungsbereichen seit Jahrzehnten im praktischen Einsatz. Die ausschließliche Stromerzeugung oder gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung in Anlagen im großen Leistungsbereich (größer 1 MW) über konventionelle Dampfprozesse (Turbine) ist ebenfalls Stand der Technik und hat in Deutschland infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) erheblich an Bedeutung gewonnen. Demgegenüber ist die Stromerzeugung im kleinen Leistungsbereich (kleiner 1 MW) mit hohen Stromwirkungsgraden bisher kaum technisch durchführbar; alle derzeit diskutierten Optionen dieses Leistungsbereichs sind mit mehr oder weniger starken technischen und ökonomischen Problemen verbunden[5] (z. B. Holzgasverbrennung in Mikrogasturbinen oder in Kolbenmotoren, die Gasreinigung ist aufwendig und daher kostspielig; Holzgas (Methan) in Brennstoffzellen einzusetzen, diese Option ist technisch noch nicht ausgereift).

Insgesamt zeichnen sich aus gegenwärtiger Sicht folgende **Perspektiven für eine direkte Verbrennung** biogener Festbrennstoffe ab:

- Wärme wird auch weiterhin durch Feuerungsanlagen aller Leistungsbereiche bereitgestellt; dies manifestiert sich auch durch die deutliche Aufwärts-Entwicklung auf dem Pelletmarkt. Als „neuer“ Brennstoff könnten darüber hinaus Getreidekörner aus qualitativ ungenügenden Chargen v. a. in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen (Getreidekörner sind momentan noch nicht als Regelbrennstoff zugelassen. In Anpassung an die technische Entwicklung schlägt

[5] Soweit nicht andere Quelle angegeben, beruhen die weiteren Ausführungen dieses Kapitels auf der Quelle /Kaltschmitt und Vogel 2004/.

die FNR zur Einführung von Getreidekörnern oder Ganzpflanzen als Brennstoff einen Stufenplan vor, der die Emissionen schrittweise bis zum Jahr 2015 reduziert. In der ersten Stufe sollte kurzfristig die Getreideverbrennung unter Berücksichtigung der dem Stand der Technik entsprechenden Emissionsgrenzwerte und Betriebsweisen zugelassen werden. Die zweite Stufe soll an die bevorstehende Novellierung der 1. BImSchV angelehnt werden.)

- Die Stromerzeugung in Anlagen im großen Leistungsbereich wird weiter an Bedeutung gewinnen. Durch die infolge des EEG gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die dadurch entstandenen Märkte werden für die Anlagenhersteller entsprechende Entwicklungsanreize ausgelöst, so dass sich die Anlagentechnik und damit die Wirkungsgrade künftig moderat verbessern werden. Hierbei bestehen bei den halmgutartigen Brennstoffen noch größere Entwicklungsaufgaben. Hierzu gehören insbesondere niedrige Ascheerweichungs- und Sintertemperaturen der Brennstoffe und dadurch bedingte Rost- oder Heizflächenverschmutzungen, eine erhöhte Chlorkorrosion z. B. an Wärmeübertragern sowie generell Schwierigkeiten gesetzliche Emissionsgrenzwerte einzuhalten.
- Die Stromerzeugung im kleinen Leistungsbereich besitzt aufgrund des dezentralen Biomasseanfalls hohe Marktpotenziale, die aber bisher mangels verfügbarer Technik kaum erschlossen werden können; auch ist hier bisher kein signifikanter technischer Durchbruch erkennbar.

Thermo-chemische Umwandlung von Biomasse

Bei den thermo-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse primär unter dem Einfluss von Wärme, durch die aus biogenen Festbrennstoffen gasförmige, flüssige oder feste Sekundärenergieträger hergestellt werden können. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Vergasung, der Verkohlung und der Pyrolyse.

Bei der **Vergasung** wird Biomasse bei hohen Temperaturen möglichst vollständig in brennbare Gase umgewandelt. Dazu wird dem Prozess weniger Sauerstoff zugeführt, als zu einer vollständigen Verbrennung erforderlich wäre. Dieser Sauerstoff wird benötigt, um den in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff über diverse Zwischenstufen zu Kohlenstoffmonoxid (CO) zu vergasen. Dazu wird durch eine teilweise Verbrennung des Einsatzmaterials die erforderliche Prozesswärme bereitgestellt. Das produ-

zierte Brenngas kann anschließend in Motoren, Turbinen oder ggf. in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung eingesetzt werden (dies ist der gegenwärtig präferierte Umwandlungspfad) oder – und das ist in der letzten Zeit vermehrt in die Diskussion gekommen – zu flüssigen Bioenergieträgern umgewandelt werden (BTL = Biomass to Liquid Kraftstoffe: z. B. Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel, so genannte Sunfuels).

Eine großtechnische Stromerzeugung aus Biomasse über die Vergasung ist derzeit noch nicht verfügbar, obwohl insbesondere dies das Ziel einiger laufender Entwicklungsbemühungen ist (z. B. Anlagen in Güssing oder der Stadtwerke Aachen, letztere in Lizenz der Choren Industries gebaut). Ausgehend davon können aus gegenwärtiger Sicht folgende **Perspektiven für die Vergasung** abgeleitet werden:

- Die Vergasung erscheint aufgrund der grundsätzlich erreichbaren hohen Wirkungsgrade als eine wesentliche Zukunftsoption zur Stromerzeugung aus nahezu allen Fraktionen an biogenen Festbrennstoffen (hierzu zählen auch Anbaubiomasse wie KUP oder Silage). Dies gilt – mit bestimmten Einschränkungen – auch für die viel versprechende Option der Bereitstellung von flüssigen Bioenergieträgern. Für letztere sind insbesondere Konzepte in der Diskussion, welche eine dezentrale Vergasung der Biomasse und zentrale Weiterverarbeitung eines Zwischenproduktes (z. B. Pyrolyseöl) zum Inhalt haben. Damit könnten Transportaufwendungen reduziert (ein Produkt mit einem höheren Heizwert im Vergleich zur Biomasse wird transportiert) und die verfahrenstechnisch komplizierten Aufbereitungsschritte in größer dimensionierten Anlagen realisiert werden (dadurch werden Verfahrensschritte effizienter und kostengünstiger).
- Die teilweise sehr erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der letzten Jahre insbesondere in Schweden, Österreich und z. T. Deutschland lassen die Hoffnung zu, dass die Anlagentechnik zur Stromerzeugung in Form von Pilotanlagen mittelfristig verfügbar sein könnte. In der nahen Zukunft ist aber aufgrund erheblicher technischer und ökonomischer Defizite nicht zu erwarten, dass die Vergasung einen energiewirtschaftlich relevanten Beitrag zur Stromerzeugung leisten kann.
- Bezüglich der politisch gewollten Bereitstellung von flüssigen Bioenergieträgern für den Verkehrssektor erscheint die Vergasung viel versprechend; aber aufgrund der noch zu überwindenden technischen und ökonomischen Probleme wird die dafür benötigte Technologie mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mittelfristig noch nicht großtechnisch zur Verfügung stehen.

Mit der **Verkohlung** erfolgt eine Veredelung von fester Biomasse mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute an Festbrennstoff (Holzkohle). Das organische Material wird dabei thermisch zersetzt, wobei die erforderliche Prozesswärme häufig durch eine Teilverbrennung des Rohstoffs bereitgestellt wird. Die bei der Verkohlung ablaufenden thermo-chemischen Prozesse unterscheiden sich also nicht grundsätzlich von denen der Vergasung; sie laufen nur unter anderen Prozessbedingungen ab und führen deshalb zu einem teilweise anderen Endprodukt.

Die Verkohlung von Biomasse im großtechnischen Maßstab wird in Deutschland derzeit fast ausschließlich zur stofflichen Nutzung der produzierten Holzkohle (z. B. Aktivkohle) oder zum Einsatz als Grillholzkohle realisiert. Holzkohle als Energieträger wird dagegen in industrialisierten Ländern wie Deutschland kaum im industriellen Maßstab genutzt. Ein solcher Einsatz als Energieträger erscheint auch aus energetischen und ökologischen Gründen wenig sinnvoll; deshalb wird diese Option nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Bei der **Pyrolyse** wird feste Biomasse unmittelbar unter kurzfristiger Hitzeeinwirkung in einen gasförmigen, flüssigen und festen Sekundärenergieträger umgewandelt, indem die langkettigen organischen Moleküle unter Wärmeeinfluss aufgebrochen werden. Wird die flüssige Fraktion abgetrennt und anschließend aufbereitet, kann das dabei anfallende Bioöl u. U. in Motoren oder Turbinen zur Strom- und ggf. Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Ein Einsatz im Verkehrssektor ist grundsätzlich auch denkbar, ist jedoch bisher aufgrund der meist ungünstigen brennstofftechnischen Eigenschaften des Bioöls kaum eine ernstzunehmende Option.

Obwohl in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen in die Untersuchung der Pyrolyseölerzeugung geflossen sind, befinden sich derartige Verfahren nach wie vor im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Nicht nur aufgrund der instabilen Lagereigenschaften, sondern auch wegen der erforderlichen Weiterverarbeitung dieser Öle in einen Kraftstoff mit definierten Eigenschaften und geringen Schadstoffgehalten erscheint die Eignung für zukünftige Motorengenerationen – deren Anforderungen an Kraftstoffe künftig weiter steigen werden – nicht gegeben.

Physikalisch-chemische Umwandlung von Biomasse

Die Gewinnung von Pflanzenöl beispielsweise aus Raps- oder Sonnenblumensaat erfolgt durch Pressung oder Extraktion des in den organischen Stoffen enthaltenen

Öls. Beim Pressen der ölhaltigen Biomasse (d. h. der Saat) wird die flüssige Ölphase mechanisch von der festen Phase, dem so genannten Presskuchen, getrennt. Bei der Extraktion dagegen wird der ölhaltigen Saat der Ölinhalt mit Hilfe eines Lösemittels entzogen; als Feststoff bleibt das so genannte Extraktionsschrot zurück. Hierdurch können im Vergleich zur Pressung deutlich niedrigere Restölgehalte im Reststoff erzielt werden. Daher wird insbesondere bei der für Deutschland wichtigsten Ölsaat, dem Raps, häufig auch eine Kombination aus Pressung und nachgeschalteter Extraktion gewählt. Dieses Pflanzenöl kann grundsätzlich in Reinform in Motoren und Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. BHKW) als Brennstoff eingesetzt werden; problematisch sind jedoch die nur eingeschränkte Verfügbarkeit von pflanzenöltauglichen Motoren und die vor allem im Winter reduzierten Fließeigenschaften des Öls. Durch eine Umesterung des Öls zu Pflanzenölmethylester (PME = Biodiesel) können diese Nachteile reduziert werden. Das gewonnene Pflanzenöl wird dadurch u. a hinsichtlich Viskosität, Dichte und Zündeigenschaften an die Eigenschaften des konventionellen Dieselkraftstoffs angepasst. Damit können nahezu unveränderte Dieselmotoren für die Nutzung von PME eingesetzt werden. Der in Deutschland bekannteste Pflanzenölmethylester ist Rapsölmethylester (RME). Er wird durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol produziert und kann als Dieselersatz genutzt werden. Aus gegenwärtiger Sicht können folgende **Perspektiven für die Pflanzenöl- bzw. Biodiesel-Gewinnung und -Nutzung** abgeleitet werden:

- Heimisches Pflanzenöl als Brenn- und Treibstoff für stationäre Motoren oder in Blaubrennern eingesetzt, wird in Deutschland auch zukünftig wohl nur Nischenanwendungen finden. Für eine Vornorm mit Rapsölkraftstoff (E DIN V 51 605) wurde im Juli 2006 das Einspruchsverfahren abgeschlossen. Alle materialtechnischen Fragen sind im Prinzip lösbar. Dennoch bleibt abzuwarten, wie stark sich die Motorenhersteller in diesem Anwendungsbereich engagieren werden. Weitere mögliche Verschärfungen an Qualitätsansprüche des Kraftstoffs können insbesondere die Rapsölgewinnung in Kleinanlagen vor zusätzliche investive Herausforderungen (Ölaufbereitung) stellen.
- Biodiesel wird seine Marktpräsenz in den nächsten Jahren ausdehnen. Der Dieselkraftstoffmarkt zeichnet sich im Gegensatz zum Ottokraftstoffmarkt durch eine mittelfristig steigende Nachfrage aus. Die Neuregelung zum Energiesteuergesetz und zum Biokraftstoffquotengesetz verpflichtet die Mineralölwirtschaft bestimmte Mindestmengen an Bioethanol bzw. Biodiesel in den Verkehr bringen zu müssen. Gemessen an den Quotenverpflichtungen ergibt

sich ein entsprechender Mindestbedarf für Biodiesel bzw. Bioethanol. Die Biodieselproduktionskapazität wird in Deutschland im Jahr 2007 etwa 3,4 bis 3,7 Mio. t betragen. Der Rohstoffbedarf kann nicht mehr ausschließlich aus deutscher Produktion gedeckt werden. Rohstoffimporte werden bereits getätigt aus Mitgliedstaaten der EU, insbesondere Frankreich und Großbritannien sowie Kanada, USA, Südamerika und Asien.

Ein weiterer Impuls zum Ausbau der Biokraftstoffproduktion, aber auch zur Steigerung des Importdruckes von Rohstoffen wie auch Biokraftstoffen wird die von der Bundesregierung beabsichtigte Erhöhung des Beimischungsanteils von Biodiesel auf 10 % im Dieselkraftstoff nach sich ziehen. Die Bundesregierung hat die EU-Kommission aufgefordert, und diese wiederum bereits dem CEN ein Mandat erteilt, die europäische Norm für Dieselkraftstoff EN 590 dahingehend zu ändern, dass möglichst zeitnah Dieselkraftstoff statt bisher 5 %, 10 % Biodiesel zugemischt werden können. Einschränkend stellt sich jedoch die Frage, der Materialverträglichkeit (Elestomere, Dichtungen, additiv-gestützte Partikelfiltersysteme usw.) bei Altfahrzeugen. Diese Fragen befinden zurzeit in der Abstimmungsphase.

Im Falle der Umsetzung der Erhöhung des Zumischungsanteils stellt sich notwendigerweise die Frage nach dem Rohstoffpotenzial. Zwischen den EU-Mitgliedsstaaten, der EU-Kommission und den Wirtschaftsverbänden hat ein intensiver Dialog zur Schaffung eines Zertifizierungssystems für Rohstoff- bzw. Biokraftstoffimporte eingesetzt.

Bio-chemische Umwandlung von Biomasse

Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung von Biomasse in einfacher nutzbare Sekundärenergieträger mit Hilfe von Mikroorganismen.

Zucker-, stärke- und cellulosehaltige Biomasse kann durch eine **alkoholische Gärung** in Alkohol (Ethanol) überführt werden. Ethanol kann als Treib- und Brennstoff in Motoren oder Verbrennungsanlagen zur Bereitstellung von Kraft, Strom und Wärme eingesetzt werden. Obwohl die Erzeugung von Trinkalkohol etabliert ist, steht eine Alkoholherstellung als Energieträger in Deutschland – infolge der jüngst geänderten gesetzlichen Rahmenbedingungen – erst am Anfang des kommerziellen Einsatzes. Ausgehend davon können folgende **Perspektiven für die Alkohol-Gewinnung und energetische Nutzung** aus gegenwärtiger Sicht abgeleitet werden.

- Infolge der durchaus beachtlichen Potenziale und der relativ einfachen Zumischbarkeit von Alkohol zu konventionellem Otto-Kraftstoff erscheint eine Bioalkoholproduktion und –nutzung aus zucker- und stärkehaltigen Ausgangsstoffen grundsätzlich als viel versprechend; dies gilt auch aufgrund der Erfahrungen in einigen anderen Ländern (z. B. USA, Brasilien). Es hängt von der weiteren Ausgestaltung der Rahmenbedingungen ab (z. B. Beimischzwang oder Außenschutz gegenüber Ethanol aus Brasilien), inwieweit die Ethanolerzeugung in Deutschland weiter an Bedeutung gewinnen wird.
- Viel versprechend könnte unter bestimmten Bedingungen auch eine Alkoholgewinnung aus cellulosehaltiger Biomasse sein; hierzu ist in den nächsten Jahren noch verstärkte Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Ausgehend davon wird sich zeigen, inwieweit solche Verfahren unter den dann vorliegenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine Chance am Markt haben werden. Mittelfristig wird diese Technik noch nicht zur industriellen Produktion für den Markt zur Verfügung stehen.

Beim **anaeroben Abbau** organischer Stoffe, d. h. dem Abbau unter Sauerstoffabschluss, entsteht ein Mischgas (Biogas), das zu 55 bis 70 % aus Methan besteht. Es kann in Motoren zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung genutzt werden. Anlagen zur anaeroben Fermentation werden beispielsweise in Kläranlagen zur Klärschlammstabilisation bereits eingesetzt (Faultürme). Für die Vergärung von Gülle und die anschließende Gasnutzung in Motoren mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl von Anlagen errichtet. Die Gaserzeugung und -nutzung aus Gülle kann somit als Stand der Technik betrachtet werden.

Ausgehend davon können folgende **Perspektiven für die Biogas-Gewinnung und -Nutzung** aus gegenwärtiger Sicht abgeleitet werden.

- Aufgrund der durch das novellierte EEG geschaffenen Rahmenbedingungen wird eine Biogasgewinnung und -nutzung in den nächsten Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen; dies gilt primär für den landwirtschaftlichen Bereich.
- Die spezifische Gasausbeute wird aufgrund neu entwickelter, besserer und effizienterer Enzyme zunehmen.

- Die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz erscheint unter energetischen Aspekten potenziell viel versprechend. Die technisch sehr aufwändige Aufbereitung und die oft schwer zu realisierende Netzanbindung lassen nicht erwarten, dass diese Option in den kommenden Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen wird.

Beim **aerober Abbau** wird die Biomasse mit Luftsauerstoff unter Wärme- und CO_2-Freisetzung oxidiert (d. h. Kompostierung). Die frei werdende Wärme könnte z. B. mit Hilfe von Wärmepumpen gewonnen und in Form von Niedertemperaturwärme genutzt werden. Jedoch ist u. a. der Entzug der Wärme aus dem Kompost noch nicht zufriedenstellend gelöst. Auch sind die entsprechenden Potenziale gering. Deshalb wird diese Option hier nicht näher betrachtet.

3.2 Biomassepotenziale

Die Bioenergie ist bereits jetzt die mit Abstand wichtigste erneuerbare Energie und sie hat noch beträchtliche Potenziale. Die EU strebt im Rahmen eines Biomasseaktionsplans bis 2010 eine Verdoppelung des jetzigen Bioenergieanteils an der Primärenergieversorgung von vier auf rund acht Prozent an. Ein besonderer Vorzug der Bioenergie ist die stetige und planbare Bereitstellung. Die Bioenergie kann damit einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgungssicherheit, zu Beschäftigung und Wertschöpfung leisten. Voraussetzung dafür sind verlässliche Rahmenbedingungen in allen drei Bereichen der Bioenergienutzung (Wärme, Strom, Kraftstoffe).

Bei der Bestimmung der Ressourcen der regenerativen Energieträger und hier insbesondere der Bioenergieträger wird zwischen theoretischen, technischen, wirtschaftlichen und erschließbaren Potenzialen unterschieden.[6]

In dieser Studie werden die technisch einsetzbaren Potenziale der biogenen Ausgangsstoffe betrachtet, die entweder durch den Anbau von Energiepflanzen bereit gestellt werden könnten oder als Rückstände, Nebenprodukte bzw. Abfälle (zusammengefasst als Reststoffe bezeichnet) regelmäßig anfallen.

Um das Gesamtpotenzial zu bestimmen, können die betrachteten Reststoffe addieren werden, da diese unabhängig voneinander anfallen. Beim Anbau von Energiepflanzen kann das Potenzial jedoch jeweils nur als Alternative angegeben werden, da die für

[6] Eine genaue Erläuterung dieser Begriffe befindet sich im Anhang.

den Anbau von Energiepflanzen vorhandenen Ackerflächen nur für eine Energiepflanzenart zugleich nutzbar sind. Mischkulturen werden nicht betrachtet.

Potenziale durch den Anbau von Energiepflanzen

Bei der Bestimmung der Potenziale aus Energiepflanzen wird der Ansatz verfolgt, dass ein bestimmter Anteil der verfügbaren Ackerfläche nicht für die Nahrungsmittelerzeugung benötigt wird und daher für den Anbau von Energiepflanzen bereit steht. Dies entspricht auch der gegenwärtigen Agrarpolitik der Europäischen Union (EU), die eine Stilllegung von ca. 8 bis 9 % aller Ackerflächen zur Vermeidung von Überproduktion vorschreibt /BMVEL 2005/.

Gegenwärtig werden bevorzugt die jeweils unfruchtbarsten Flächen stillgelegt. Unter der Annahme, dass der Markt für Bioenergieträger wirtschaftlich gleich gute Erlöse wie der Markt für Nahrungsmittel erbringt, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Flächen in gewissem Umfang austauschbar sind. Damit können im Rahmen der Fruchtfolge alle Flächen zeitweise für Energiepflanzen und zeitweise für die Nahrungsmittelproduktion genutzt werden. Unter der Annahme, dass 15 bis 20 % der Flächen für den Energiepflanzenanbau genutzt werden können, ist es theoretisch möglich, diesen Flächenanteil durchweg mit den gleichen Energiepflanzen zu bebauen, da eine Fruchtfolge mit den übrigen Feldfrüchten erfolgt und der Energiepflanzenanbau somit jährlich auf einem anderen Acker erfolgt.

Es werden daher die Potenziale unter der Annahme errechnet, dass ca. 17 % aller Ackerflächen für Energiepflanzen genutzt werden könnten, dies entspricht in Deutschland rund 2 Mio. Hektar. Dauergrünland, Wald und andere Flächen werden nicht berücksichtigt.

Unter der hypothetischen Annahme, dass diese Fläche jeweils mit dem Anbau nur einer Energiepflanze genutzt wird, können – basierend auf den Ernteerträgen vergangener Jahre – auf dieser Fläche **Erträge zwischen 6,7 und 112 Mio. t Frischmasse**[7] erzielt werden (Tab. 3-1). Im Falle der Sonnenblumen wurde angenommen, dass sich nur ein kleiner Teil der deutschen Ackerflächen für deren Anbau eignet, so dass nur 80.000 ha für das technische Potenzial angesetzt wurden.

[7] Sonnenblumen nicht berücksichtigt.

Aus den verschiedenen Energiepflanzen lassen sich unterschiedliche **Energieträger** bereitstellen: Festbrennstoffe (Holz und Getreideganzpflanzen), flüssige Brennstoffe (Bioethanol auf der Basis stärke- und zuckerhaltiger Pflanzen sowie Pflanzenöl aus Ölsaaten) sowie für Biogas (aus nachwachsenden Rohstoffen, hier Maissilage). Der aus dem Anbau von Energiepflanzen auf dieser Fläche zu erwartende **Primärenergieertrag beträgt etwa 77 bis 340 PJ**[8] im Jahr.

Die höchsten Potenziale können durch den Anbau von Getreideganzpflanzen und Holz in Kurzumtriebsplantagen erreicht werden. Auch beim Anbau von Mais zur Biogaserzeugung oder Zuckerrüben zur Bioethanolherstellung lassen sich relativ hohe Energieerträge erzielen. Dagegen ist der Energieertrag von Ölpflanzen sowie Weizen, Roggen und Triticale[9] zur Ethanolherstellung bei gleicher Anbaufläche wesentlich niedriger. Die Ernte-Erträge der nicht genutzten Pflanzenteile sind in dieser Bilanz jedoch nicht berücksichtigt.

[8] Sonnenblume nicht berücksichtigt.

[9] Trtiticale ist eine Kreuzung aus Weizen und Roggen, die die jeweils positiven Eigenschaften der beiden Getreide-Sorten in sich vereinigt: Hoher Kornertrag bei gleichzeitig hoher Widerstandsfähigkeit der Pflanze.

Tab. 3-1: Brennstoffpotenzial aus dem Anbau von Energiepflanzen in Deutschland (hypothetische Anbaufläche: **2 Mio. ha** [1)])
[Quelle: KTBL, BMVEL, eigene Berechnungen]

Energiepflanze			Spezifischer Ertrag (t / ha)	Frischmasse-Ertrag (Mio. t_{FM} / Jahr)	Sekundärenergie-Ertrag[2] (PJ / Jahr)
Festbrennstoffe		Holz (Kurzumtriebsplantage	10,6	21,2	**333,0**
		Weizen (Ganzpflanzen)	13,2	26,5	**340,0**
		Roggen (Ganzpflanzen)	13,0	26,0	**333,8**
		Triticale (Ganzpflanzen)	11,3	22,6	**290,0**
Flüssige Brenn- /Kraftstoffe	zur Konversion zu Bioethanol	Triticale (Kornertrag)	5,9	11,9	**93,2**
		Weizen (Kornertrag)	7,3	14,7	**115,4**
		Roggen (Kornertrag)	5,4	10,8	**76,5**
		Zuckerrüben (Rübenertrag)	56,0	112,0	**249,9**
	zur Konversion zu Biodiesel	Raps (Kornertrag)	3,8	7,5	**110,4**
		Sonnenblumen [1)] (Kerne)	2,4	0,2	**2,9**
Biogas		Silomais (Ganzpflanzen)	44,2	88,3	**318,0**

1) Bei Sonnenblumen wurde nur eine max. mögliche Anbaufläche von 80.000 ha angenommen, da Sonnenblumen besonders hohe Ansprüche an die Sonnenscheindauer am Standort stellen.

2) Der Sekundärenergieertrag gibt den Energieinhalt des sekundären Energieträgers an, zu dem die Energiepflanze, welche auf der Fläche pro Jahr geerntet wurde, umgewandelt wird. Nicht verwendete Pflanzenteile sind in dieser Bilanz nicht berücksichtigt.

Anmerkungen:

- Die Potenziale können nicht addiert werden, da die Anbauflächen nur einmal genutzt werden können.
- Die Erntemengen beziehen sich jeweils auf ein Jahr. Bei den mehrjährigen Kulturen, die z. B. für die Holzgewinnung nötig sind, ist der durchschnittliche Ertrag pro Jahr berechnet worden.

Potenziale durch Nutzung anfallender biogener Reststoffe

Die biogenen Reststoffe umfassen Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle, die in der Landwirtschaft, der Holz- und Lebensmittelverarbeitung sowie am Ende der Nutzungskette anfallen. Es stehen die Biomassen zur Verfügung, die nicht zur stofflichen Nutzung (z. B. Möbelbau) vorgesehen sind oder aus dieser ausscheiden. Da für die folgende Untersuchung nur die in der Land- und Forstwirtschaft sowie der weiterverarbeitenden Holzindustrie anfallenden Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle relevant sind, bleiben alle übrigen Reststoffe unberücksichtigt.[10]

Im Folgenden werden die einzelnen anfallenden Reststofffraktionen mit der der Potenzialermittlung zugrunde liegende Quelle aufgeführt. Eine nähere Erläuterung der anfallenden Reststoffe erfolgt in Kap. 5.3.1.

Holzartige Reststoffe

Es wird für die einzelnen Fraktionen davon ausgegangen, dass jeweils 80 % der anfallenden Rinden energetisch genutzt werden können. Folgende drei Holzfraktionen sind für die energetische Nutzung von Bedeutung:

- **Industrierestholz**
  - Sägenebenprodukte
    Das Potenzial wird unter Berücksichtigung des spezifischen Restholzfaktors bzw. der Schnittholzausbeute abgeleitet. Der Potenzialableitung zugrunde liegt die Schnittholzproduktion im Jahr 2000 /UN 2004/.
  - Holzwerkstoffindustrie

[10] Dies sind anfallende Schwarzlauge (Black Liquor) aus der Zellstoffindustrie, Rückstände aus der Getränke- und Genussmittelherstellung sowie der Zuckerherstellung, Schlachtabfälle und Rückstände aus der Fleischverarbeitung, Abwässer, Klärschlamm und Deponiegas. Darüber hinaus bleiben Rübenblatt und Kartoffelkraut als Biogassubstrat unberücksichtigt, da bei Ihrer Abfuhr vom Feld ein starker Nährstoffentzug durch erhöhte Düngung ausgeglichen werden müsste /KTBL 2002/.

Für den spezifischen Restholzanfall wurden die für Deutschland im Rahmen einer Ökobilanzzierung ermittelten Ergebnisse angesetzt /Frühwald 2000/.

- Zellstoff- und Holzschliffindustrie

Es fallen nur Rinden als energetisch nutzbare Reststoffe an.

- **Altholz**
  Zum Altholzvorkommen bestehen keine detaillierten Statistiken. Daher wird nach /IE 2003/ von etwa 73 kg Altholz je Einwohner und Jahr ausgegangen, die für eine energetische Verwertung zur Verfügung stehen.
- **Gehölzschnitt** aus landwirtschaftlicher Produktion
  Für die einzelnen Gehölzschnittfraktionen wird unterstellt, dass rund 80 % des anfallenden Holzes energetisch genutzt werden kann.

Halmgutartige Reststoffe

Für das bei der Produktion von Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Körnermais, Raps, Sonnenblumen, Erbsen und Bohnen anfallende **Stroh** wird ein energetisch nutzbarer Anteil von 30 % angenommen. Der überwiegende Anteil des Strohaufkommens wird somit weiterhin zur Erhaltung der Bodengüte untergepflügt oder auch anderweitig zum Beispiel im Rahmen der Tierhaltung genutzt. Für die zur Verfügung stehende Strohmenge wird der Mittelwert aus den Jahren 1998 bis 2002 verwendet. /FAO 2000/.

Sonstige Reststoffe

Zur Bestimmung des energetisch nutzbaren Biogaspotenzials aus **Exkrementen** (Gülle) werden die Nutztierarten Rinder, Schweine und Hühner berücksichtigt. Das Aufkommen an Exkrementen wird aus dem Tierbestand ermittelt. Auf Grund einer überwiegenden Freilandhaltung bzw. eines ohnehin sehr geringen Anfalls von Exkrementen bleiben andere Nutztierarten wie Schafe, Ziegen, Pferde, Gänse und Enten bei der Potenzialbestimmung unberücksichtigt. Datenbasis für den Tierbestand ist /Wilfert, Schattauer 2002/.

Die technischen Potenziale der zuvor beschriebenen biogenen Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle (zusammengefasst als „Reststoffe“ bezeichnet) sind in Tab. 3-2

dargestellt. Je nach Reststofffraktion liegt der mögliche **Primärenergieertrag zwischen etwa 2 und fast 200 PJ** im Jahr. Die größten Einzelpotenziale ergeben sich für Stroh (Festbrennstoff) als Nebenprodukt aus der Landwirtschaft und für Gülle (zur Biogasgewinnung). Das Holzpotenzial in seiner Gesamtheit ist etwa so groß wie das Strohpotenzial. In Summe steht ein biogenes **Reststoffpotenzial von ca. 480 PJ** zur Verfügung.

Tab. 3-2: Brennstoffpotenzial aus biogenen Reststoffen in Deutschland
[Quelle: IE 2004]

Biogener Reststoff	Anfall als Trockenmasse (1.000 t_{TM} pro Jahr)	Primärenergie-Ertrag als Festbrennstoff oder Biogas (PJ / Jahr)
Schwach- und Waldrestholz	3.085	57,1
Industrierestholz	2.057	45,1
Gebrauchtholz	4.214	78,0
Gehölzschnitt	135	2,4
Stroh (von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Raps und Körnermais)	11.625	193,9
Gülle und Tierexkremente	4.718 [1)]	101,9
Summe		**478,4**

1) Angabe in Mio. m³ Biogas pro Jahr

Anmerkung:

Die Potenzialangaben für Deutschland beziehen sich auf die hier betrachteten Reststofffraktionen und berücksichtigen die in Fußnote 10 (Seite 28) genannten weiteren biogenen Reststoffe nicht.

Der zusammenfassende **Überblick** des durch Anbau von Energiepflanzen und biogene Reststoffe in Deutschland vorhandenen Biomassepotenzials ist in Abb. 3-2 dargestellt. Bezogen auf die Einzelpotenziale können mit Energiepflanzen die größten Erträge erzielt werden. Allerdings können diese Potenziale aus Energiepflanzen –

wie bereits erläutert – nicht addiert werden, sondern stehen nur als Nutzungsalternativen zur Verfügung. Die Summe der biogenen Reststoffe mit annähernd 500 PJ und das größte Potenzial der Energiepflanzen (Weizen als Ganzpflanze) führt zusammengenommen zu einem **Bioenergieträgerpotenzial von fast 820 PJ**.

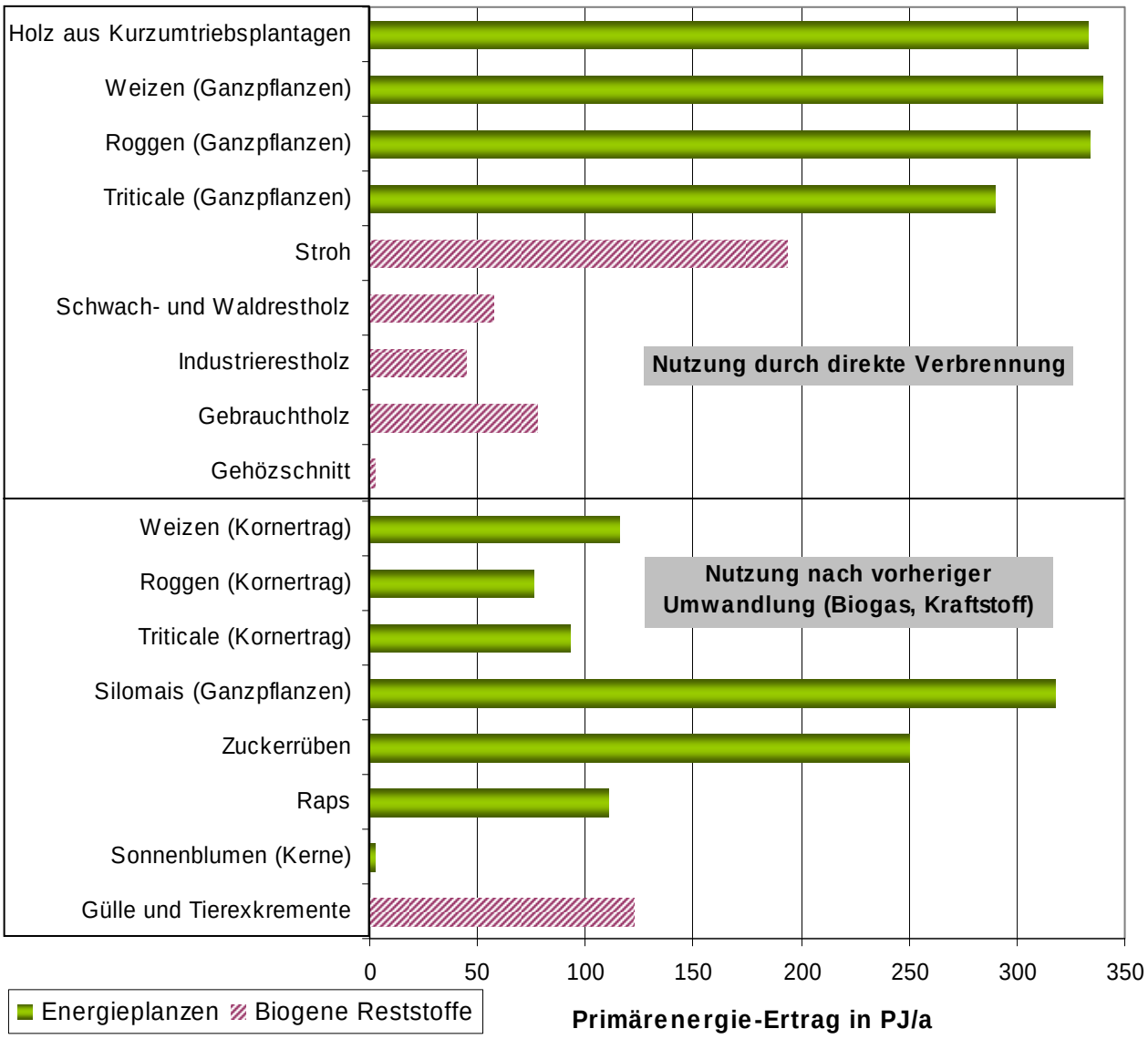


Abb: 3-2 Bioenergieträgerpotenzial in Deutschland
Energiepflanzen: Anbau auf jeweils 2 Mio ha, außer Sonnenblumen nur auf 80.000 ha angenommen, Potenziale alternativ
Reststoffe: Potenziale addierbar
[Quelle: IE 2004,FAO 2000]

3.3 Gegenwärtige Biomassenutzung

Die Biomassenutzung in Deutschland hat vor allem bei der Wärmeerzeugung eine lange Tradition. Aufgrund der günstigen Rahmenbedingungen ist in den letzten Jahren ein deutlicher Nutzungszuwachs eingetreten. Nachfolgend werden die wesentlichen Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit in einem Überblick dargestellt. Mit Blick auf die Endenergienutzung erfolgt die Darstellung nach festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern.[11]

Nutzung fester Bioenergieträger

Zum Ende des Jahres 2005 waren rund 140 **Biomasseheizkraftwerke** mit einer installierten elektrischen Leistung von etwa 1 010 MW am Netz (Abb. 3-3). Die potenzielle Stromerzeugung dieser Anlagen liegt bei ca. 7 TWh/a (brutto). Wegen der im Jahresverlauf und teilweise erst zum Jahresende erfolgten Inbetriebnahme einiger Anlagen wurden tatsächlich aber nur ca. 5 TWh erzeugt. Als Brennstoff diente vorwiegend Holz (6,7 Mio. t) und hier schwerpunktmäßig Altholz, wobei die Bedeutung von Waldrestholz und Landschaftspflegegehölz zunimmt.

Für 2005 wurde der Gesamteinsatz an fester Biomasse (fast ausschließlich Holz) zur ausschließlichen **Wärmebereitstellung** in Haushalten, GHD[12] und Industrie mit ca. 270 PJ abgeschätzt. Der Verbrauch an Holzpellets befindet sich – trotz hoher Zubauraten – auf einem insgesamt vergleichsweise niedrigen Niveau. Zum Jahresende 2005 waren knapp 40.000 Pelletheizungen, vor allem in Bayern und Baden-Württemberg, mit einem Brennstoffbedarf von rund 330.000 t/a in Betrieb. Die Pelletproduktions-Kapazität in Deutschland liegt bei etwa 385.000 t/a.

---

[11] Soweit nicht anders angegeben beziehen sich alle Angaben in diesem Kapitel 3.3 auf /Lenz und Kaltschmitt 2006/.

[12] GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.

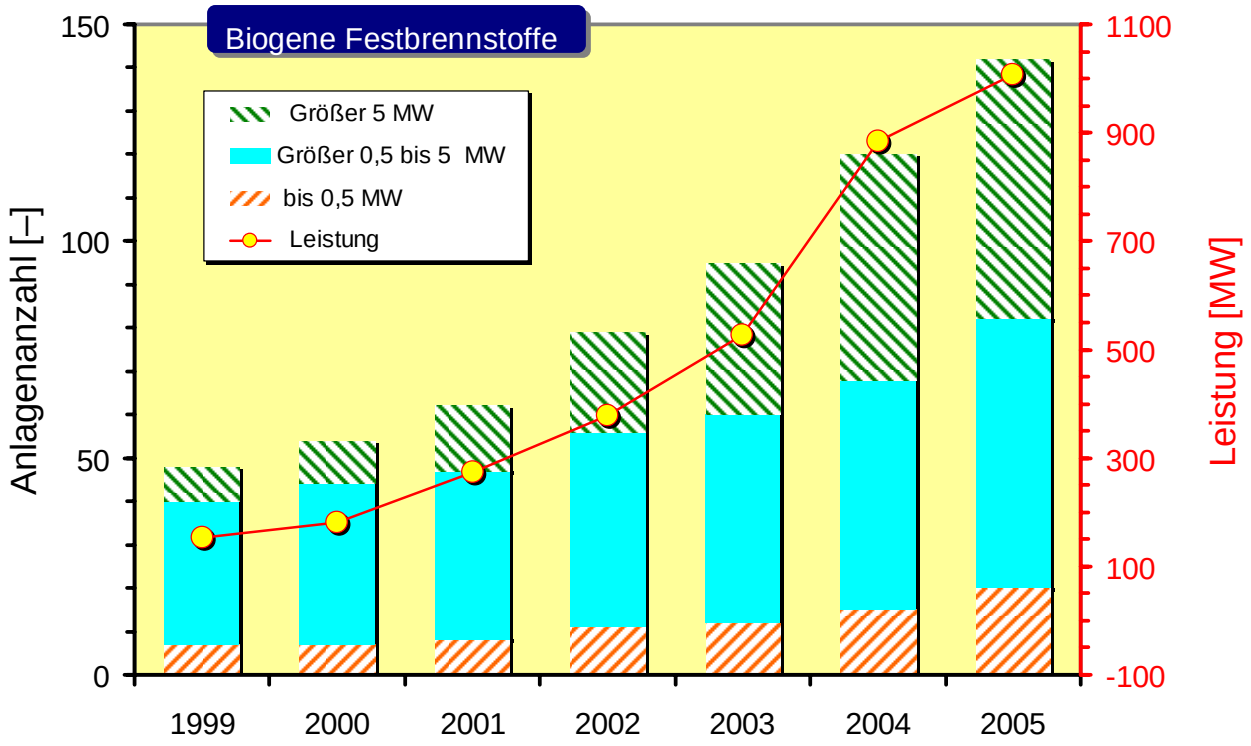


Abb. 3-3: (Heiz-)Kraftwerke auf Basis biogener Festbrennstoffe
[Quelle: Lenz und Kaltschmitt 2006]

Nutzung flüssiger Bioenergieträger

Als flüssige Bioenergieträger wurden 2005 im **Verkehrssektor** fast ausschließlich Biodiesel (Rapsmethylester, RME) als Reinkraftstoff oder als Zumischkomponente eingesetzt. Daneben wurde zu einem deutlich geringeren Anteil naturbelassenes Rapsöl, insbesondere in der Landwirtschaft (u. a. als Schlepperkraftstoff), genutzt. Zusätzlich stiegt der Einsatz von Bioethanol sowohl durch erste Beimischungen als auch insbesondere durch Substitution des Antiklopfmittels MTBE (Methyl-tertiär-buthyl-esther) durch ETBE (Ethyl-tertiär-buthyl-ether) an.

Obwohl Biogas zu den gasförmigen Bioenergieträgern gehört, sei hier im Zusammenhang mit der Kraftstoffnutzung erwähnt, dass Biogas in Deutschland bislang nur zu Demonstrations- und Forschungszwecken in einem sehr geringen Umfang eingesetzt wurde /Volkswagen AG/. Mehr Erfahrungen wurden in diesem Bereich in der Schweiz und in Schweden gesammelt, wo seit ca. 10 Jahren Biogas entsprechend aufbereitet und als Kraftstoff in Fahrzeugen eingesetzt wird. Im Mai 2006 erklärte der Bundesverband Gas u. Wasserwirtschaft (BGW) dem Erdgas, das als Kraftstoff genutzt wird, künftig regenerativ erzeugtes BioErdgas beizumischen - 10 Prozent bis zum Jahr 2010 und 20 Prozent bis 2020 /Presseportal 2006/.

Der Gesamtverbrauch biogener Kraftstoffe lag 2005 bei etwa 89 PJ, wobei der Biodiesel-Einsatz bei rund 1,8 Mio. t (67 PJ), der von naturbelassenem Rapsöl bis zu 0,4 Mio t (14 PJ) und der von Bioethanol bei etwa 8 PJ lag. Bezogen auf den gesamten Kraftstoffverbrauch des Jahres 2005 von etwa 2.330 PJ /Mineralölwirtschaftsverband 2006/ hatten biogene Kraftstoffe einen Anteil von etwa 3,8 %.

In einem sehr geringen Umfang wurde Biodiesel und vermehrt auch naturbelassene Pflanzenöle in stationären Anlagen (insbesondere in BHKW) eingesetzt. Zusammengenommen dürfte die Stromproduktion der gegenwärtig etwa 670 Pflanzenöl- und ca. 10 RME-BHKW mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt ca. 60 MW bei rund 430 GWh/a liegen.

Die Biodiesel-Produktionskapazität betrug Ende 2005 insgesamt rund 1,95 Mio. t (Abb 3-4). Dies reichte zur Deckung der Nachfrage in Deutschland nicht aus; weshalb zusätzlich Biodiesel importiert werden musste /Bockey 2005/, /Retzlaff 2005/.

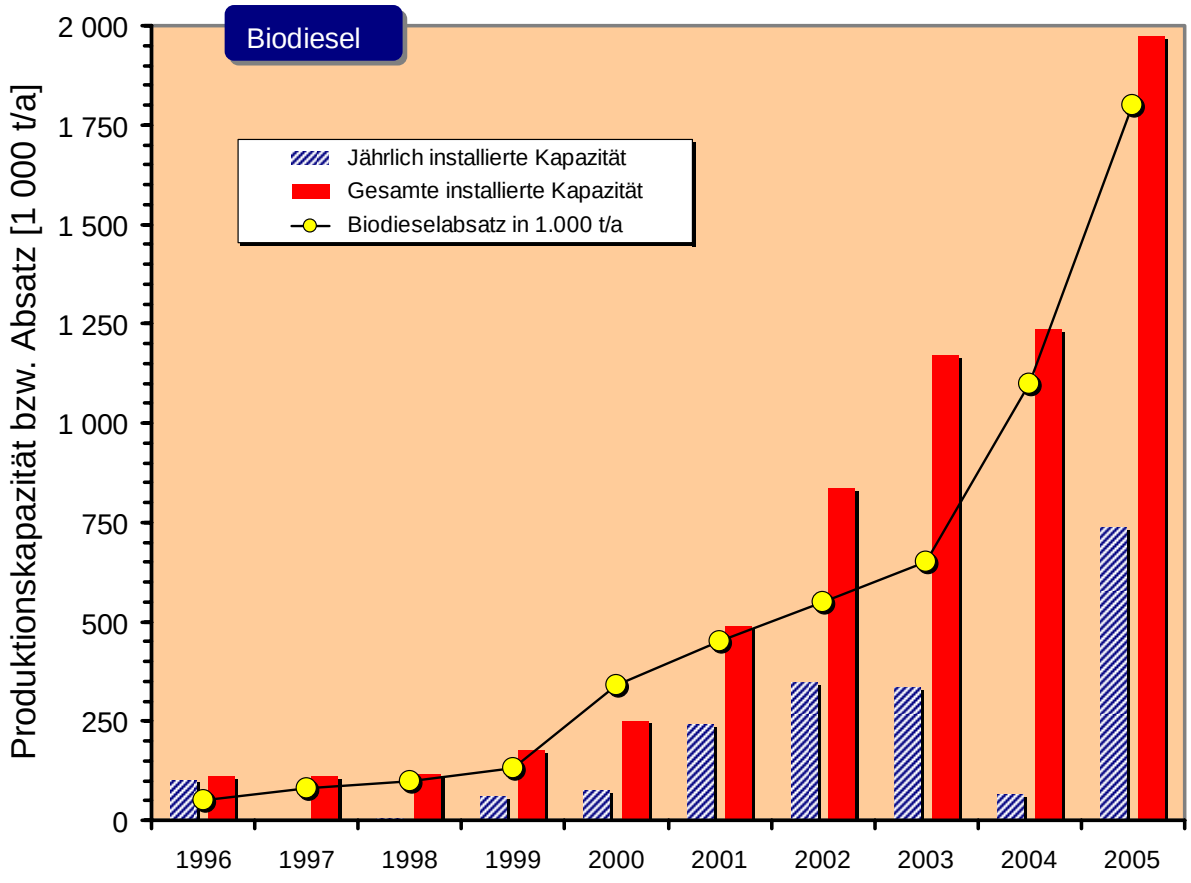


Abb. 3-4: Biodieselproduktionskapazitäten und Biodieselabsatz
[Quelle: /Lenz und Kaltschmitt 2006/

Ende des Jahres 2005 betrug die Produktionskapazität für Bioethanol wie im Vorjahr ca. 480.000 t /Weber 2004/. Der Bioethanolverbrauch lag u. a. aufgrund der Umstellung des Antiklopfmittels von MTBE auf ETBE und der kleinen Beimischungsmengen in 2005 in Deutschland bei bislang ca. 8 PJ. Zur Verbrauchsdeckung waren ebenfalls Importe notwendig /Ristau 2004/.

Nutzung gasförmiger Bioenergieträger

Aufgrund des EEG hat ein starker Zubau von **Biogasanlagen** stattgefunden (Abb. 3-5) Insgesamt waren Ende 2005 etwa 2.700 Biogasanlagen mit etwa 665 MW elektrischer Leistung und einer potenziellen Jahresstromerzeugung von ca. 4,3 TWh/a in Betrieb. Während sich seit 1999 die Anlagenanzahl mehr als verdreifacht hat, ist die installierte Leistung um mehr als den Faktor 13 angestiegen. Es ist somit ein Trend zu größeren Anlagen zu beobachten.

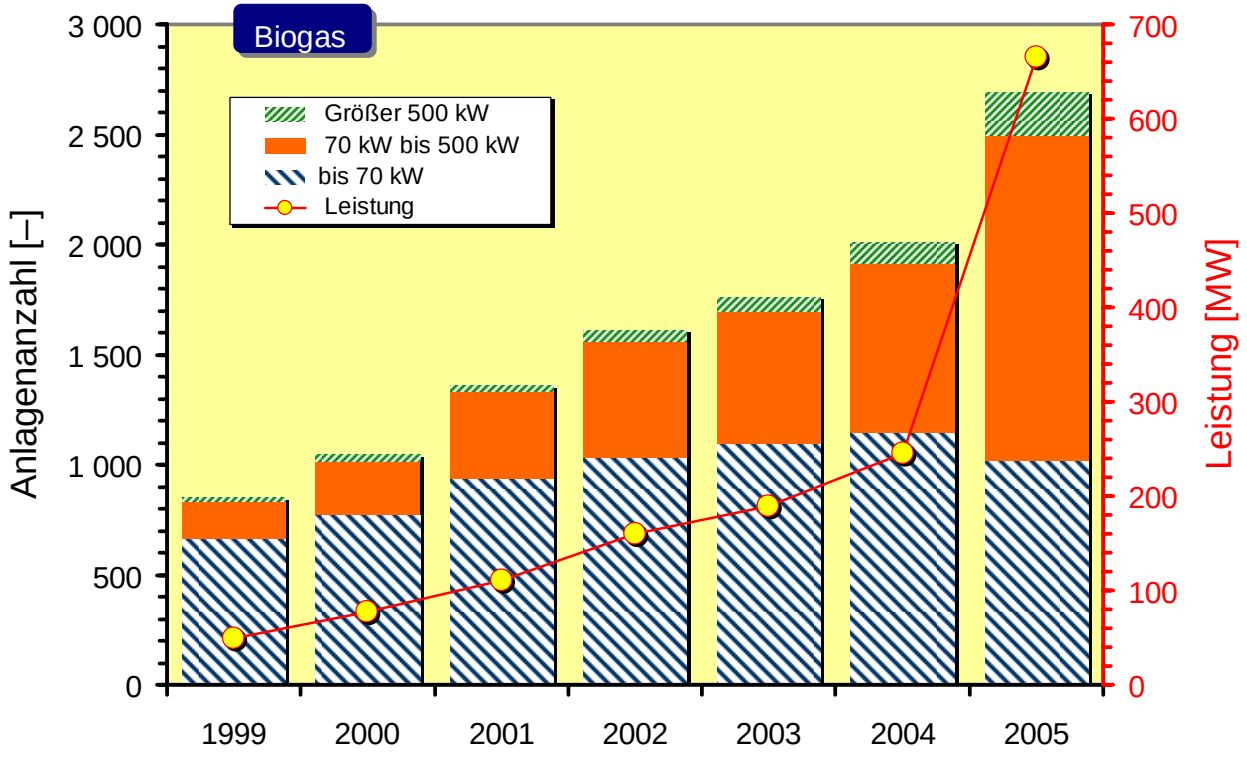


Abb. 3-5: Biogasanlagen in Deutschland
[Quelle: Lenz und Kaltschmitt 2006]

Teil II

Klimagasbilanzen

4 Klimagasbilanzierung

Energie, die in Materie enthalten ist, kann durch Verbrennung nutzbar gemacht werden. Als Verbrennungsprodukt entsteht dabei v. a. Asche, CO_2 und eine Vielzahl anderer Gase, die Auswirkungen auf das Ökosystem, die menschliche Gesundheit und das Klima haben /IPCC 2001/. Da in der vorliegenden Studie die mit der Energiebereitstellung verbundenen Klimagasemissionen untersucht werden, werden im Folgenden die wesentlichen Klimagase und ihre Wirkungsmechanismen beschrieben. Hieran schließt sich eine Erläuterung der in dieser Studie angewendeten Methode zur Bilanzierung der Klimagase an. Abschließend wird kurz die gegenwärtige Situation der Klimagasemissionen in Deutschland dargestellt.

4.1 Klimagase und deren Bedeutung

Die Temperatur auf der Erde hängt vom **natürlichen Treibhauseffekt** ab. Die kurzwellige Sonnenstrahlung kann die Erdatmosphäre vergleichsweise ungehindert durchdringen. Die Erdoberfläche absorbiert die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung und strahlt sie zum Teil als langwellige Wärmestrahlung in die Atmosphäre zurück. Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O = Distickstoffoxid) sowie andere Gase in der Erdatmosphäre nehmen diese Wärmestrahlung auf und strahlen einen großen Teil davon wieder auf die Erdoberfläche zurück. Erst Dank dieses natürlichen Treibhauseffekts konnte sich Leben auf der Erde entwickeln. Ohne diesen Effekt würde die globale Durchschnittstemperatur auf der Erde bei etwa -18°C liegen anstatt der zurzeit herrschenden durchschnittlichen +16°C /IPCC 2001/.

Vor allem durch die zunehmende Nutzung fossiler Energieträger kommt es zu einem Anstieg klimawirksamer Gase in der Atmosphäre. Da der Anstieg auf den Menschen zurückzuführen ist, wird auch vom zusätzlichen „**anthropogenen Treibhauseffekt**" gesprochen. Es gilt als gesichert, dass die in der Atmosphäre beobachtete Konzentrationserhöhung an Klimagasen zu einem regional unterschiedlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur führen wird. Allerdings unterlag in der Erdgeschichte die globale Durchschnittstemperatur ständig starken Schwankungen, so dass eine Veränderung in geologischen Zeiträumen nicht als außergewöhnlich anzusehen ist. Jedoch würden die durch diesen zusätzlichen anthropogenen Treibhauseffekt zu erwartenden Veränderungen innerhalb sehr kurzer Zeit zum Tragen kommen und Auswirkungen erwar-

ten lassen, die das menschliche Leben auf der Erde zumindest merklich erschweren könnten /IPCC 2001/.

Bei der energetischen Nutzung fossiler Energieträger wird der im Brennstoff gebundene Kohlenstoff unter Freisetzung von Energie verbrannt (d. h. oxidiert) und in gasförmiges Kohlendioxid umgewandelt, das an die Atmosphäre abgegeben wird. Darüber hinaus kommt es im Laufe der energetischen Nutzung zu Emissionen, die unter anderem durch einen unsachgemäßen Anlagenbetrieb oder Leckagen verursacht werden. Hierzu gehören z.B. Methanfreisetzungen aus undichten Gaspipelines /Wuppertal 2004/.

Klimawirksame Gase werden zudem nicht nur durch die energetische Nutzung fossiler Energieträger freigesetzt, sondern auch durch landwirtschaftliche Produktionsprozesse. Hier sind vor allem Methan und Lachgas von Bedeutung. Methan entsteht bei der Nutztierhaltung durch Verdauungsprozesse bei Wiederkäuern sowie als Emissionen aus der Gülle. Lachgas entsteht als Umwandlungsprodukt durch biologische Abbauprozesse (Nitrifizierung und Denitrifizierung) von stickstoffhaltigen Düngern oder Pflanzenresten im Boden /Freibauer und Kaltschmitt 1998, IPCC 2001/.

Bei der energetischen Nutzung von Biomasse wird ebenfalls Kohlendioxid freigesetzt. Allerdings wurde die dabei emittierte Menge an Kohlendioxid zuvor beim Pflanzenwachstum der Atmosphäre entzogen und in der organischen Masse chemisch gebunden. Wird folglich Biomasse nachhaltig produziert und damit im Mittel nur die Menge an organischer Masse genutzt, die wieder nachwächst, kann von einer weitgehenden CO_2-Neutralität einer Energiegewinnung aus Biomasse ausgegangen werden. Vollständig CO_2-neutral ist aber selbst eine derartige Biomassenutzung nicht, da für Anbau, Bereitstellung und Nutzung der organischen Masse fossile Energieträger indirekt verwendet werden. Fossile Energieträger werden zum Beispiel bei der Produktion der Düngemittel, beim Transport der Biomasse oder für den elektrischen Energiebedarf zur Regelung der Feuerungsanlage benötigt /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

4.2 Methodik der Klimagasbilanzierung

Klimagase werden nicht erst bei der Nutzung – wie der Verbrennung – von fossilen Energieträgern freigesetzt. Bereits im Vorfeld der Nutzung kommt es durch die Bereitstellung des Energieträgers oder beim Bau der Nutzungsanlage zu klimawirksamen Umweltbelastungen.

Für eine umfassende Analyse der ökologischen Auswirkungen von fossilen oder biogenen Energieträgern sind deshalb die Emissionen und der Energieverbrauch über den gesamten Lebensweg von der Energiegewinnung über den Energietransport bis hin zur Energienutzung zu betrachten. Zu berücksichtigen sind gleichfalls die Auswirkungen für die Errichtung und den Betrieb der notwendigen Anlagen (z. B. Kohlegrube, Kraftwerk, Stromnetz) und der Rückbau dieser Anlagen. Dies erfolgt mit Hilfe einer **Lebenszyklusanalyse** (Ökobilanz). In der Lebenszyklusanalyse wird der gesamte Lebensweg eines Produktes untersucht und die jeweiligen Umweltbelastungen der einzelnen Lebensabschnitte werden bis hin zur Nutzung und Entsorgung der Abfälle ermittelt. Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse kann der Lebensweg eines Produktes in einzelne **Prozessschritte** eingeteilt werden (Abb. 4-1). Die Gesamtheit der verschiedenen Prozessschritte wird auch als **Prozesskette** bezeichnet. Analog dazu werden bei der Ökobilanzierung die Umweltbelastungen, die im Laufe des Lebensweges eines Produktes auftreten, durch eine Prozesskettenanalyse ermittelt /Nill 2004/.

Als Ergebnis der Ökobilanzierung werden die ermittelten Umweltbelastungen zu unterschiedlichen Umweltindikatoren zusammengefasst. Übliche Indikatoren sind vor allem der Verbrauch von endlichen Energieressourcen (Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Uran) und luftgetragene Emissionen mit klimarelevanter, versauernder sowie human- und ökotoxischer Wirkung. Da sich die Ökobilanzierung hervorragend für die ganzheitliche Ermittlung des Ausstoßes klimawirksamer Gase eignet, wird dieses Instrument in dieser Untersuchung verwendet /ISO 14040 und ISO 14044/.

Die Summe der einzelnen klimawirksamen Emissionen wird zur Schaffung einer einheitlichen Vergleichsbasis zu einem Indikator – dem CO_2-Äquivalent – zusammenfasst. Anhand ihrer Klimawirksamkeit werden die verschiedenen Klimagase gewichtet und auf die Referenzsubstanz CO_2 bezogen. Die in dieser Studie untersuchten Klimagase und die zugehörigen CO_2-Äquivalente sind in Tab. 4-1 im nachfolgenden Kapitel aufgeführt. Die gleichfalls als Klimagase einzustufenden Gase wie z. B.

FCKW und sonstige Kohlenwasserstoffe werden nicht berücksichtigt, da sie im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung nicht von Bedeutung sind.

Wie aus den in Tab. 4-1 (im nachfolgenden Kapitel) dargestellten Klimagasemissionen erkennbar ist, besitzen die Klimagase Methan und Lachgas eine deutlich höhere Klimawirksamkeit als Kohlendioxid. Aufgrund der vom Menschen verursachten und somit nicht natürlichen Gasmengen ist allerdings Kohlendioxid mengenmäßig das wichtigste Klimagas.

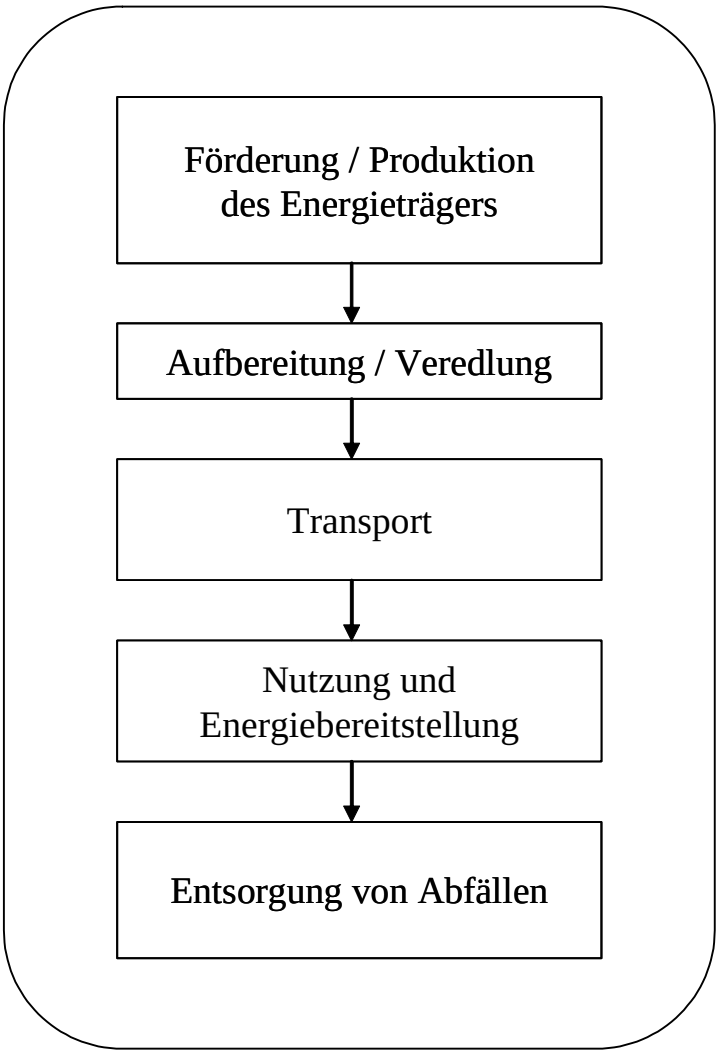


Abb. 4-1: Aufteilung des Lebensweges einer Energiebereitstellung in einzelne Prozessschritte

4.3 Klimagasemissionen in Deutschland

Bei der Betrachtung der in Deutschland anfallenden Klimagasemissionen (Tab. 4-1) wird deutlich, dass der anthropogene Treibhauseffekt zu knapp 90 % durch die Freisetzung von CO_2 verursacht wird. Diese entstehen durch die Nutzung fossiler Energieträger. Auf Methan und Lachgas entfallen knapp 7 % und 6 % der klimawirksamen Emissionen.

Methan wird größtenteils in der Landwirtschaft (Tierhaltung) und Abfallwirtschaft freigesetzt, zu ca. einem Drittel stammen die Methanemissionen aus Verlusten beim Erdgastransport und bei der Förderung von Kohle, Erdöl und Erdgas.

Die Lachgasemissionen werden hauptsächlich durch die Land- und Abfallwirtschaft verursacht, zu geringen Anteilen stammen sie aus dem Energie- und Verkehrssektor.

Die Klimagasemissionen in ihrer Gesamtheit sind also hauptsächlich mit der energetischen Nutzung von fossilen Energieträgern verbunden und stammen nur zu einem geringen Anteil aus der Landwirtschaft.

Gemäß Kyoto-Protokoll und einer Vereinbarung der EU-Umweltminister hat sich Deutschland verpflichtet, die durchschnittlichen CO_2-Emissionen für den Zeitraum 2008 bis 2012 um 21% gegenüber 1990 zu senken. Dies entspricht einem Rückgang von 989 Mio. t auf 781 Mio. t. Werden die aktuellen CO_2-Emission zugrunde gelegt, wird gegenwärtig in Deutschland ein Rückgang der CO_2-Emissionen von gut 13 %, durch einen effizienteren Energieeinsatz und den Einsatz von erneuerbaren Energien, erreicht.

Tab. 4-1: Klimagase, Klimagasfaktoren bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren und gegenwärtige Klimagasemissionen in Deutschland
[Quelle: IPCC 2001, Bundesamt für Statistik 2004]

Klimagas	**Emissionen [t]**	**Klimagasfaktoren als CO_2-Äquivalent**	**Emissionen [t CO_2 -Äquivalent]**	**Anteil**
Kohlendioxid (CO_2)	858.000.000	1	858.000.000	87,4 %
Methan (CH_4)	2.885.000	23	66.335.000	6,8 %
Lachgas (N_2O)	194.000	296	57.424.000	5,8 %
Summe CO_2-Äquivalente			**981.779.000**	

5 Klimagasemissionen durch die energetische Nutzung von Biomasse

Bevor in diesem Kapitel die Ermittlung der Klimagasemissionen aus der energetischen Nutzung von Biomasse erfolgt, werden zunächst die untersuchten Bereitstellungsketten definiert. Im Anschluss daran werden die einzelnen Schritte, unterteilt in Biomasseproduktion, Biomasseaufbereitung und -bereitstellung sowie Biomassenutzung, detailliert erläutert.

Die bilanzierten Klimagasemissionen werden analog zu den Bereitstellungsketten schrittweise und aufeinander aufbauend im Anschluss an die einzelnen Prozessketabschnitte dargestellt.

- Zuerst erfolgt eine detaillierte Aufführung der mit dem Biomasseanbau verbundenen Klimagasemissionen je ha Anbaufläche und je t Frucht frei Acker.
- Im nächsten Schritt, der Biomassebereitstellung und -aufbereitung, werden die aus dem Anbau resultierenden Emissionen aggregiert als „Rohstoff“ dargestellt. Da für die energetische Nutzung nicht das Gewicht, sondern der Energiegehalt relevant ist, werden die Klimagasemissionen sowohl je t (analog zur Biomasseproduktion) und je GJ (als relevante Größe für die energetische Nutzung) angegeben.
- Die abschließende Darstellung der mit der Nutzung von Biomasse verbundenen Klimagasemissionen erfolgt je GJ Wärme, je MWh Strom und, im Falle der Kraftstoffe, je Fahrzeugkilometer.

5.1 Definition der Bereitstellungsketten

Den verschiedenen Möglichkeiten der Endenergiegewinnung aus Biomasse (Kap. 3.1) werden die Biomassepotenziale in Deutschland (Kap. 3.2) gegenübergestellt. So lassen sich, ausgehend von den verschiedenen Biomassefraktionen, diejenigen Bereitstellungsketten identifizieren, die zur Endenergiegewinnung eingesetzt werden können. Darüber hinaus können sich durch technische Weiterentwicklungen (z: B. Landbau, Nutzungstechnik) in naher Zukunft (2010) einzelne Glieder der Bereitstellungskette verändern oder auch neue Pfade hinzukommen.

Der prognostizierten Entwicklung bis 2010 liegen folgende Annahmen zugrunde:

Biomasseproduktion

- Bei holz- und halmgutartigen Brennstoffen wird keine Veränderung unterstellt.
- Im Falle von Getreide wird von einer Optimierung des Energiepflanzenanbaus ausgegangen. Dadurch kann die Stickstoffdüngung verringert werden.

Biomasseaufbereitung

- Um den angestrebten Anteil von 5,75 % Biokraftstoffen am Kraftstoffmarkt zu erreichen, wird die Ethanolproduktion aus Zuckerrüben (oder ZR-Dicksaft) im erforderlichen Maß gesteigert.

Nutzungstechnik

- Technische Probleme bei der Verbrennung von Stroh, Getreidekörnern und Getreideganzpflanzen sind behoben (z. B. Abgasproblematik, Schlackebildung der Asche). Die Brennstoffe werden somit technisch nutzbar sein.
- Biogas wird in das Erdgasnetz eingespeist und eine räumlich von der Biogasanlage getrennte Nutzung ist möglich.

In Tab. 5-1 sind die in dieser Studie untersuchten Bereitstellungsketten für Endenergie aus Biomasse für 2005 und 2010 im Überblick dargestellt.

Tab. 5-1: Untersuchte Bereitstellungsketten für Endenergie aus Biomasse für die Jahre 2005 und 2010

Bereitstellungsketten im Jahr 2005		
Biomasse	**Aufbereitung, Nutzungstechnik**	**Endenergie**
Holz- und halmgutartige Biomasse:		
Schwach-, Waldrest-, Industrierest-, Gebraucht- und Landschaftspflegeholz	Häckseln, Pelletierung	Wärme, Strom
Stärkehaltige Biomasse:		
Getreide	Vergärung	Kraftstoff (Ethanol)
Mais	Biogasprozess	Wärme, Strom
Zuckerhaltige Biomasse:		
Zuckerrübe	Vergärung	Kraftstoff (Ethanol)
Ölhaltige Biomasse:		
Raps, Sonnenblumen	Pressen, Umesterung	Kraftstoff (Biodiesel)
Reststoffe aus Biomasse:		
Tierische Exkremente	Biogasprozess	Wärme, Strom

Zusätzliche Bereitstellungsketten im Jahr 2010		
Biomasse	**Aufbereitung, Nutzungstechnik**	**Endenergie**
Holz- und halmgutartige Biomasse:		
Stroh und Getreideganzpflanzen	Ballenpressen, Pelletierung	Wärme, Strom
Getreidekörner	keine Aufbereitung notwendig	Wärme, Strom
Stärkehaltige Biomasse:		
Mais	Biogasprozess	Wärme, Strom nach Biogaseinspeisung

5.2 Biomasseproduktion

Die Biomasseproduktion umfasst die Aussaat, Kultivierung und Ernte von Energiepflanzen. Diese werden unterteilt in holzhaltige und halmgutartige Pflanzen, bei denen meist die vollständigen Pflanzen (Ganzpflanzen) direkt als Festbrennstoff genutzt werden, sowie in Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen, deren Energie erst nach der technischen Gewinnung des Öls bzw. Ethanols aus der Frucht nutzbar wird /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Im Folgenden werden wichtige Pflanzen, die zu diesen Kategorien zählen und in Mitteleuropa gedeihen, vorgestellt. Dabei wird kurz auf die Eigenschaften eingegangen, die für die Nutzung als Energieträger wichtig sind.

5.2.1 Holz- und halmgutartige Energiepflanzen

Holz aus Kurzumtriebsplantagen

In Kurzumtriebsplantagen werden schnellwachsende Baumarten angebaut. Hierzu werden im Frühjahr ca. 20 cm lange Stecklinge gesetzt, die im Winter von einjährigen Trieben gewonnen wurden. Im ersten Jahr wird der Bestand ca. 1,5 m hoch, bis zum vierten Jahr werden die Pflanzen ca. 7 m hoch. Die Ernte der aufgewachsenen Biomasse durch einen Erntehäcksler kann alle drei bis vier Jahre im Januar oder Februar erfolgen, wenn der Boden gefroren ist. Im Folgejahr treiben die Stöcke erneut aus und an gleicher Stelle kann nach weiteren drei bis vier Jahren wieder geerntet werden. Typische Baumarten, die in Mitteleuropa in Kurzumtriebsplantagen kultiviert werden können, sind die Pappel und die Weide.

Holz enthält unabhängig vom Erntezeitpunkt mindestens 50 % Wasser. Durch die Ernte mit einem Erntehäcksler steht Holz aus Kurzumtriebsplantagen bereits ab Feldrand in Form von Holzhackschnitzeln zur Verfügung und kann somit theoretisch ohne weitere Aufbereitungsschritte energetisch genutzt werden. Meistens werden die Holzhackschnitzel aber gelagert und dabei getrocknet. Dadurch verringert sich die Masse und die Energiedichte nimmt zu /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Das Ertragsniveau der schnellwachsenden Baumarten (Tab. 5-2) wird sich in den kommenden Jahren nicht wesentlich ändern. Eine steigende Nachfrage nach Holzhackschnitzeln kann den Anbau in Kurzumtriebsplantagen lukrativer machen und damit zu einer Zunahme der Anbauflächen führen. Wobei hinsichtlich der Anbauflächen eher verbrauchsnahe Anbaustandorte und somit kostengünstige

Transportentfernungen für das Marktsegmente der Haushalte und sonstigen Kleinabnehmer in Betracht kommen. Bei Großabnehmern (z.B. Heizkraftwerke, Industrie) können auch größere Entfernungen zwischen Anbaustandort und Abnehmer wirtschaftlich sein, wenn über kostengünstige Schiffs- oder Bahntransporte große Mengen direkt zwischen Start- und Zielpunkt transportiert werden.

Tab. 5-2: Jährlicher Trockenmassezuwachs von Weiden und Pappeln in Abhängigkeit vom Ertragsniveau nach der ersten Ernte (Beginn des zweiten Aufwuchses)

Ertragsniveau	niedrig	mittel	hoch	In dieser Studie verwendeter Wert
Weiden	4 t / ha	6 – 9 t / ha	10 - 18 t / ha	10 t
Pappeln	6 t / ha	7 – 9 t / ha	10 - 18 t / ha	10 t

Getreideganzpflanzen

Auch Getreide kann als Ganzpflanze inklusive Stroh und Fruchtstand verbrannt werden. Aufgrund der Anbaueigenschaften und des Hektarertrages eignen sich die Getreidearten Weizen, Roggen und Triticale besonders zur Ganzpflanzennutzung /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Das Getreide wird dabei mit den in der deutschen Landwirtschaft üblichen Verfahren und Methoden angebaut und zum Erntezeitpunkt als Ganzpflanze in Ballenform geerntet. Lebensmittel- und Energiegetreide unterscheiden sich allerdings hinsichtlich der Stickstoff-Düngung: Während bei der Brot- und Futtergetreideproduktion ein hoher Protein- und damit Stickstoffgehalt des Korns angestrebt wird, soll Energiegetreide möglichst wenig Stickstoff enthalten. Daher wird beim Energiegetreideanbau weniger Stickstoffdünger eingesetzt als beim Anbau von Lebensmittelgetreide.

Der Aufwand der eingesetzten Produktionsmittel zur Getreideproduktion ist höher als zur Produktion von Holz aus Kurzumtriebsplantagen.

Es ist heute nur schwer einzuschätzen, wie sich der Anbau von Getreideganzpflanzen als Energiepflanzen weiter entwickeln wird. Mit qualitativ hochwertigem Getreide als Lebensmittel können normalerweise größere Einnahmen erzielt werden, der

Produktionsaufwand liegt aber in einer ähnlichen Größenordnung. Mit steigenden Ölpreisen tritt die Nutzung von Getreide als Energiepflanze aus ökonomischer Sicht in Konkurrenz zur Nutzung im Lebensmittelbereich.

Stroh

Stroh fällt als Nebenprodukt der Landwirtschaft jedes Jahr bei der Ernte in großen Mengen an. Es kann daher nicht gezielt angebaut werden. Bei einer Abfuhr des Strohs vom Feld erhöht sich allerdings auch der Nährstoffentzug des Bodens, so dass im nächsten Jahr ein erhöhter Düngerbedarf besteht. Dieser Düngerbedarf und die damit verbundenen Klimagasemissionen sind dem Stroh bei der Klimagasbilanzierung zuzurechen /Kaske 2000/.

Es kann allerdings nicht das gesamte Strohaufkommen energetisch genutzt werden, da ein Teil des Strohs zur Erhaltung des Bodengefüges (Humusbilanz) auf dem Acker verbleibt und ein weiterer Teil häufig als Einstreu in der Tierhaltung genutzt wird. Unter diesen Rahmenbedingungen könnten gegenwärtig ca. 30 % des anfallenden Strohs zur Energiegewinnung genutzt werden. Dieser Anteil wird sich bis 2010 nicht verändern.

5.2.2 Stärkehaltige Energiepflanzen

Neben der Nutzung als Ganzpflanzen kann bei Getreide auch das reine Korn energetisch genutzt werden. Getreidekörner können entweder direkt ohne Aufbereitung in geeigneten Feuerungsanlagen verbrannt werden (wird noch nicht praktiziert) oder zu Ethanol oder Methan vergoren werden. Hierbei wird der Umstand genutzt, dass Stärke von Bakterien abgebaut wird. Zwei verschiedene Stärke-Abbauprodukte können der Energiegewinnung dienen: Durch alkoholische Gärung entsteht Ethanol, durch anaerober Gärung Methan (vgl. Kap. 3.1).

Als Rohstoffe für die alkoholische Gärung werden aufgrund der Rohstoffeigenschaften (hoher Stärkegehalt von mehr als 65 % bei gleichzeitig hohem Kornertrag) in Deutschland vor allem **Weizen** und **Roggen** eingesetzt. **Triticale**, das für die alkoholische Gärung ebenso gut geeignet ist wie Weizen oder Roggen, wird zurzeit in Deutschland hauptsächlich für die Tierernährung angebaut. Sie steht bei Bedarf in Abhängigkeit von der Fruchtfolge für die Ethanolproduktion zur Verfügung, wenn ein entsprechender Erlös erzielt werden kann. Andere Getreidesorten, die einen

geringeren Stärkegehalt aufweisen, wie z. B. Gerste, können rein technisch gesehen auch zur Ethanolerzeugung eingesetzt werden, kommen aber aus wirtschaftlichen Gründen eher weniger zum Einsatz /Schmitz 2003/.

Da der Proteingehalt auch bei dieser Form der energetischen Nutzung z. T. zweitrangig ist, kann beim Getreideanbau in einigen Fällen eine geringere Menge an Stickstoffdünger ausgebracht werden, sofern beim Anbau schon feststeht, dass das Getreide für die Ethanolproduktion bestimmt ist und der Futterwert des DDGS (Nebenprodukt der Ethanolerzeugung) nicht besonderen Ansprüchen genügen muss.

Auch **Kartoffeln** eignen sich aufgrund ihres Stärkegehaltes sehr gut zur alkoholischen Gärung, was vor allem in der Genussmittelindustrie genutzt wird (Wodka). Zur Gewinnung von Ethanol als Energieträger ist die Kartoffel als Rohstoff im Vergleich zu den anderen Pflanzen aufgrund des hohen Wasseranteils allerdings zu teuer /Schmitz 2003/.

Mais hat ausgereift einen ähnlich hohen Stärkegehalt wie Weizen, Roggen oder Triticale, teilweise ist er sogar höher. Da in Deutschland die klimatischen Bedingungen für ein vollständiges Ausreifen der Frucht nur in Süddeutschland und im Rheintal erfüllt werden, ist die Anbaufläche für Körnermais begrenzt. Mais wird daher in Deutschland zur Ethanolgewinnung nicht eingesetzt /Schmitz 2003/. Stärke und andere Inhaltsstoffe können aber in Biogasanlagen durch eine anaerobe Vergärung der ganzen Pflanze größtenteils in Methan umgewandelt werden. Der Mais wird als Silage kontinuierlich der Biogasanlage zugeführt. Auch Getreide als Ganzpflanzensilage kann in Biogasanlagen energetisch genutzt werden. Für eine Nutzung der Silage in Biogasanlagen ist Maissilage jedoch besser geeignet als Getreide-Ganzpflanzensilage, da Mais als Ganzpflanze einen höheren Masseertrag sowie Methanertrag je ha aufweist (Mais: ca. 45 t/ha, Getreide: ca. 13 t/ha, Methanertrag: 5780 bzw. 2960 m³/ha) /Oechsner 2003/. Diese Feststellung trifft allerdings nicht für alle Standorte zu, da Mais auf bestimmten Standorten z. B. weniger geeignet ist als Roggen und an diesem Standort einen geringen Ertrag erreichen würde.

Zukünftige Entwicklung des Anbaus stärkehaltiger Pflanzen

Getreide kann auf einen hohen Proteingehalt für Lebensmittel- und Futterzwecke optimiert sein. Ebenso wird Getreide aber auch auf einen hohen Stärkegehalt für energetische Zwecke zur Extensivierung der Anbauverfahren optimiert. Für **2010** wird davon ausgegangen, dass bei Getreide als Energiepflanze durch eine verringerte

Stickstoffdüngung der Proteingehalt sinkt und der Stärkegehalt ansteigen wird. Weiterhin ist davon auszugehen, dass langfristig im Bereich der Pflanzenzüchtung eine weitere Optimierung des Saatguts in Richtung Energiegetreide mit höherem Stärkegehalt stattfinden wird.

5.2.3 Zuckerhaltige Energiepflanzen, Zuckerrübe

Neben Stärke kann auch Zucker zu Ethanol vergoren werden. Der landwirtschaftliche Ausgangstoff hierfür ist die Zuckerrübe mit ca. 17 bis 18 % Zuckergehalt bezogen auf die Frischmasse, oder 70 bis 80 % bezogen auf die Trockensubstanz. Zuckerrüben haben hohe Ansprüche an die Bodengüte und können daher nur auf tiefgründigen, guten Böden angebaut werden. Dafür stehen die konventionellen Produktionstechniken zur Verfügung. Geerntet wird in der Regel nur die Rübe, das Blatt bleibt als organischer Dünger auf dem Feld zurück /Pflanzliche Erzeugung/.

Da sowohl der Anbau als auch das Saatgut schon auf einen hohen Zuckerertrag optimiert sind, ist bis zum Jahr 2010 keine Ertragssteigerung durch optimierte Landbautechnik oder Saatgut zu erwarten.
Die Zuckerproduktion und damit der Zuckerrübenanbau wurde durch europäische Quoten reguliert (EU-Zuckermarktordnung). Diese Regelung ist 2006 ausgelaufen und die Form der Nachfolgeregelung liegt noch nicht im Detail vor. Es kann aber wohl davon ausgegangen werden, dass zusätzliche Anbauflächen zur Ethanolproduktion aus Zuckerrüben oder anderen Pflanzen zur Verfügung stehen werden.

5.2.4 Ölhaltige Energiepflanzen

Pflanzenöl zu energetischen Zwecken wird in Deutschland hauptsächlich aus **Raps** gewonnen. Der Ölertrag hängt dabei von der Höhe des Samenertrages je Hektar und vom Ölgehalt der Samen ab. Ähnlich wie bei den stärkehaltigen Energiepflanzen ist der Ölgehalt höher, je geringer der Proteingehalt des Rapses ist. Der Ölgehalt der Rapskörner liegt durchschnittlich bei 40 bis 45 %

Das Kornertragspotenzial von **Raps** liegt zwischen 2,8 und 5 t/ha (ca. 1.100 bis 2.000 kg Öl/ha). Neben der Bodengüte wird der Ölgehalt und -ertrag von Raps vor allem von einer kühl-feuchten Sommerwitterung in der Ausreifezeit positiv beein-

flusst. Unter den pflanzenbaulichen Maßnahmen wirken sich besonders die bedarfsgerechte Stickstoffdüngung ertragsfördernd aus /Pflanzliche Erzeugung, DSV 2005/.

Sowohl der Rapsanbau als auch das Saatgut werden weiterhin für die energetische Nutzung optimiert, bis zum Jahr 2010 werden Ertragssteigerungen von ca. 10% - 20% erwartet. Diese Steigerung resultiert nicht nur aus einem größeren Kornertrag sondern auch aus einem höheren Ölgehalt der neuen Sorten /DSV 2005/.

Das Kornertragspotenzial von **Sonnenblumen** liegt mit 2,4 bis 4,0 t/ha (d. h. 850 bis 2.000 kg Öl/ha) etwas unterhalb von Raps. Ein hoher Ölertrag (45 bis 48 % Ölgehalt) wird nur bei ausreichend hohen Temperaturen während der Vegetationsperiode sowie guter Wasserversorgung während der Blüte erreicht /Pflanzliche Erzeugung/.

5.2.5 Klimagasbilanzen

Die Biomasseproduktion wird anhand der erforderlichen Aufwendungen je ha Ackerfläche (für die Beurteilung der flächenbezogenen Emissionen) und je t Frucht (für die Beurteilung der ertragsbezogenen Emissionen) untersucht. In beiden Fällen wird noch keine Bewertung des späteren Verwendungszwecks der Biomasse vorgenommen. Als Grundlage für die Berechnungen gelten der Anbau nach /KTBL 2002/ sowie die Erträge gemäß Kap. 3.2. Obwohl mit dem Getreideanbau bezogen auf die jeweilige Art (d. h. Weizen, Roggen, Triticale) unterschiedliche Anbaubedingungen und auch Düngemengen verbunden sind, ergeben sich jedoch auf eine Tonne geerntetes Getreide bezogen fast gleich große Emissionen, so dass nachfolgend stellvertretend für alle Getreidearten die spezifischen Emissionen für Weizen dargestellt sind.

In Abb. 5-1 und Abb. 5-2 sind die mit dem Anbau der in diesem Kapitel beschriebenen Ackerfrüchte in den Vergleichsgrößen „t CO_2-Äquivalente je ha“ sowie in „kg CO_2-Äquivalenten je t Frucht“ dargestellt. Die Klimagasemissionen ergeben sich durch die Emissionen aus Düngung, Saatgut, Pestizideinsatz und Maschineneinsatz sowie aus den direkten Bodenemissionen aufgrund der Stickstoffdüngung.

Die **flächenbezogenen Klimagasemissionen** (CO_2-Äqu./ha, Abb. 5-1) schwanken je nach Biomasseanbau zwischen 0,6 t/ha für Holz und 2,8 t/ha für den Anbau von Maisganzpflanzen. Obwohl Stroh kein direktes Anbauprodukt ist, entstehen durch die notwendige Ausgleichsdüngung aufgrund der Strohentnahme auch hier Klimagasemissionen (siehe Kap 5.2.1, Stroh). Die mit der Bereitstellung von Stroh

verbunden Klimagasemissionen betragen 0,46 t CO_2 –Äquivalente je ha /eigene Berechnungen/.

Die Stickstoffdüngung (ohne die Bodenemissionen) hat mit etwa 40 % die größte Bedeutung an den Emissionen.

Ein großer Anteil der Emissionen (30 bis 40 %) wird durch die direkten Bodenemissionen verursacht. Diese sind auch auf die Stickstoff-Düngung zurückzuführen, bei der durch Abbauprozesse im Boden aus einem Teil des Stickstoffs Lachgas (N_2O) entsteht. Aufgrund der sehr viel höheren Klimawirksamkeit von Lachgas im Vergleich zu Kohlendioxid ergibt sich dieser hohe Anteil an den Klimagasemissionen.

Einen etwas geringeren Anteil an den verursachten Klimagasemissionen hat mit 15 bis 25 % der Maschineneinsatz auf dem Acker.

Die Phosphordüngung trägt mit bis zu 4 % der Emissionen bei den anspruchsvollen Pflanzen Getreide, Raps und Sonnenblumen relativ wenig zu den Klimagasemissionen bei.

Auch die Kalium- bzw. die Kalkdüngung sind mit max. 1,6 % bzw. 0,7 % eher unbedeutend.

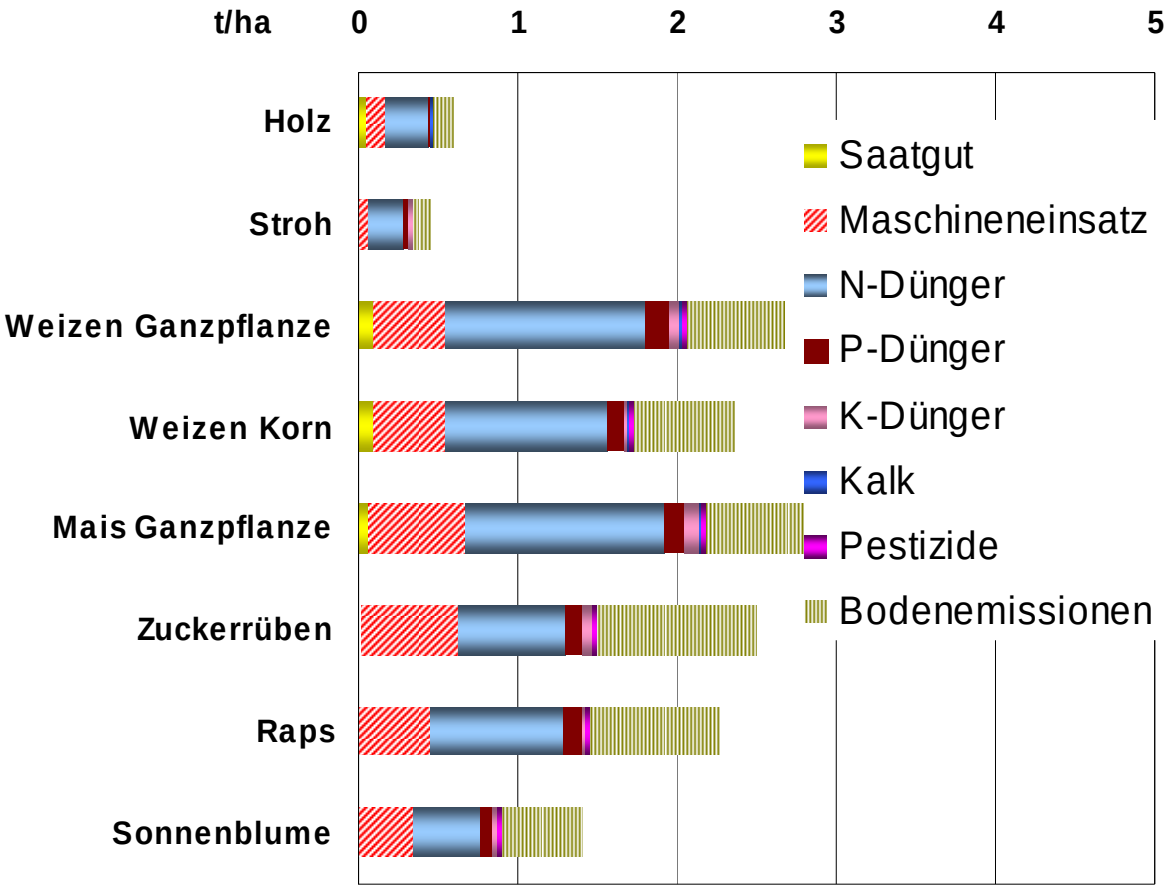


Abb. 5-1: Klimagasemissionen in t je ha Anbaufläche
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von KTBL 2002]

Bei der Betrachtung der **ertragsbezogenen Klimagasemissionen** je t Frucht (Abb. 5-2) bleiben die Anteile an den Gesamtemissionen gleich. Was sich verändert ist die Höhe der Emissionen der unterschiedlichen Ackerfrüchte im Vergleich. Hier macht sich der unterschiedliche Ernteertrag je ha bemerkbar. Besonders auffällig ist dieser Effekt bei Maissilage und Zuckerrüben im Gegensatz z. B. zu Weizen, da hier der Ertrag je ha 44 t bzw. 56 t Frischmasse beträgt und bei Weizen der Kornertrag nur 7,3 t.

Wird z. B. der optimierte Getreideanbau bis 2010 berücksichtigt, ergibt sich bei verringerter Stickstoff-Düngung und erhöhtem Stärkegehalt eine Verringerung der Klimagasemissionen um ca. 20 % je t Weizen.

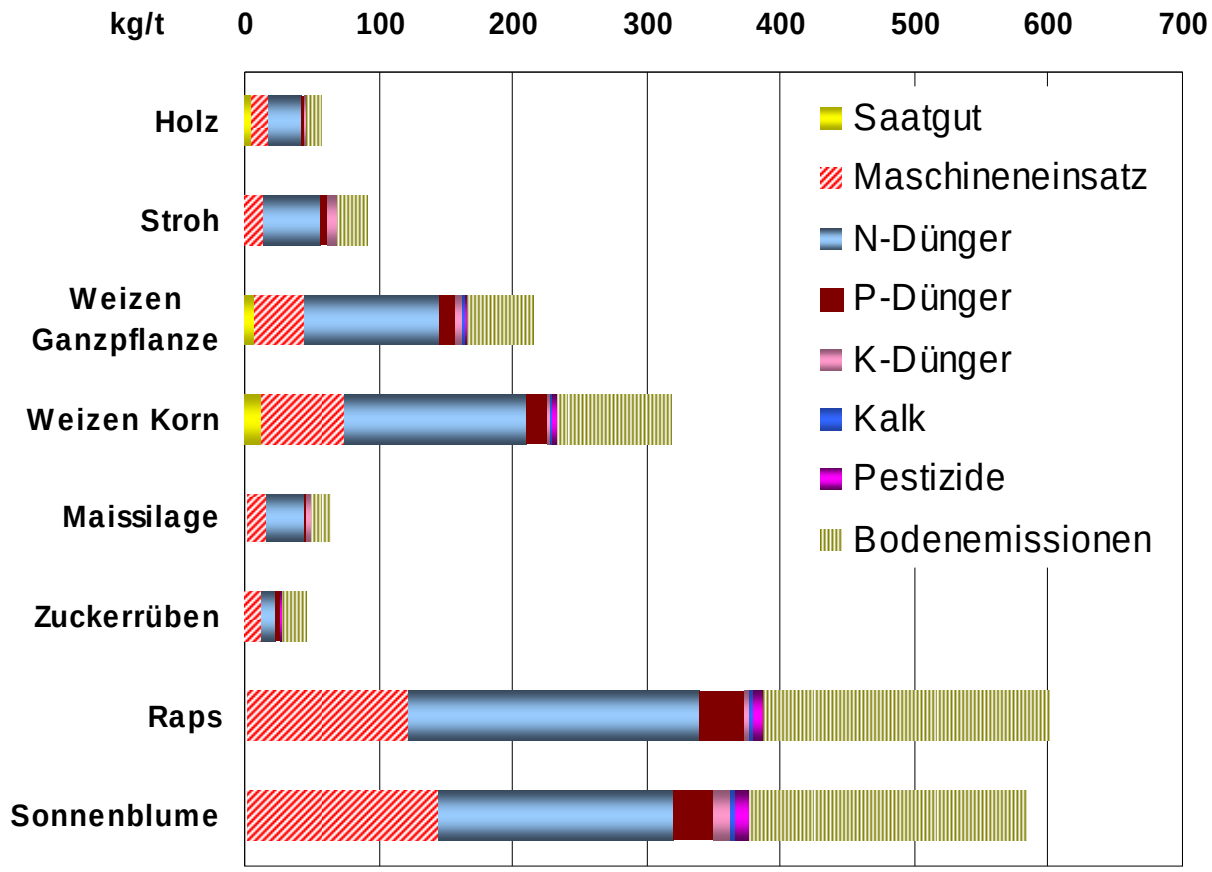


Abb. 5-2: Klimagasemissionen in kg je t Frucht frei Acker

[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von KTBL 2002, FAO 2002]

5.3 Biomassebereitstellung und -aufbereitung

5.3.1 Bereitstellung von biogenen Reststoffen

Bei den biogenen Rohstoffen für die energetische Nutzung wird im Wesentlichen zwischen holz- und halmgutartigen Brennstoffen unterschieden, die auch als Reststoffe anfallen können (d. h. als Rückstand, Nebenprodukt oder Abfall). Darüber hinaus werden landwirtschaftliche und industrielle Nebenprodukte und Abfälle als Ausgangsprodukte zur Biogaserzeugung eingesetzt (z. B. Rückstände aus Brauereien, oder Schlachthöfen, Ernterückstände). Holz- und halmgutartige Brennstoffe fallen entweder als Rückstände bei forstwirtschaftlichen oder industriellen Verarbeitungsschritten an oder werden speziell als Energiepflanzen angebaut. Nachfolgend werden

die relevanten Bereitstellungs- und Aufbereitungspfade für biogene Reststoffe kurz erläutert.

Schwach- und Waldrestholz

Bei der Produktion von möglichst hochwertigem Stammholz für die holzverarbeitende Industrie fallen schon bei der Holzernte im Wald minderwertiges Holz und Rückstände an, die unter anderem als Brennstoff genutzt werden können.

Schwachholz fällt bei Durchforstungsmaßnahmen an, die in Zyklen von mindestens 10 Jahren wiederkehrend durchgeführt werden. Dabei werden konkurrierende, kranke oder minderwertige Bäume entfernt. Da es sich um Bäume mit einer geringen Dicke zwischen ca. 7 und rund 20 cm handelt, erzielen sie nur geringe Erlöse als Industrieholz, so dass alternativ auch die Aufarbeitung als Brennholz in Frage kommt. Dazu wird dann der ganze Baum entweder zu Hackschnitzeln oder zu Stückholz verarbeitet.

Der Teil des Baumes, der nach der Holzernte, d. h. der Entnahme des industriell oder anderweitig nutzbaren Holzes, im Wald verbleibt, wird als Waldrestholz oder auch Schlagabraum bezeichnet. Dies sind in erster Linie das Kronenmaterial oder die kurzen Stammabschnitte, die zu Hackschnitzeln oder Scheitholz aufgearbeitet werden; das Reisholz (dünne Äste und Ästchen inkl. Nadeln) und die eventuell anfallende Rinde (bei Waldentrindung) verbleibt hingegen meist im Wald.

Zusammen mit dem Schwachholz erreicht der jährliche Holzbrennstoffertrag aus dem Wald selten mehr als 1 t/ha /Hartmann und Kaltschmitt 2002/. Die Waldflächen in Deutschland und der spezifische Holzbrennstoffertrag werden sich bis 2010 nicht verändern.

Industrierestholz

Industrieresthölzer sind Nebenprodukte, die bei der industriellen Holzbe- und -verarbeitung anfallen und nicht als Abfälle eingestuft werden /Altholzverordnung 2002/. Unter Industrierestholz werden demzufolge Sägenebenprodukte, die in der Sägerei bei der Produktion von Schnittholz anfallen (z. B. Schwarten, Spreißel, Hackschnitzel, Kappscheiben, Säge- und Hobelspäne, Sägemehl) und die in der Holzwerkstoffindustrie anfallenden Reste (Verschnitt, Abschnitte und Späne) von

naturbelassenem Vollholz, Holzwerkstoffen und sonstigem behandeltem Holz (ohne schädliche Verunreinigungen) verstanden.

Der überwiegende Teil der Sägewerksreste – mit Ausnahme von Rinde – dient der Papier- und Holzwerkstoffindustrie als Rohmaterial. Bei den Hackschnitzeln wird unterschieden zwischen jenen ohne Rinde (weiße Hackschnitzel) und anderen mit anhaftender Rinde (schwarze Hackschnitzel). Weiße Hackschnitzel, die bei der Bearbeitung von vorentrindetem Stammholz anfallen, werden von der Papierindustrie bevorzugt und erzielen dort einen relativ hohen Preis. Schwarze Hackschnitzel aus Schwarten und Spreißeln werden zur Spanplattenherstellung verwendet oder als Brennstoff genutzt. Die als technisches Potenzial angegebenen Mengen berücksichtigen bereits die genannten stofflichen Nutzungen und beziehen sich ausschließlich auf das energetisch nutzbare Potenzial (Kap. 3.2). Als energetisch nutzbar werden 47 % der anfallenden Menge in den Sägewerken und 58 % der anfallenden Menge in der Holzwerkstoffindustrie eingestuft.

Den Anforderungen der Abnehmer (z. B. aus der Papierindustrie) entsprechend werden Sägewerksprodukte nach vorgegebenen Qualitätskriterien produziert. Zukünftig wird sich deshalb die verfügbare Menge an energetisch nutzbarem, preiswertem Industrierestholz verringern /Hartmann und Kaltschmitt 2002/.

Gebrauchtholz

Gebrauchtholz ist behandeltes oder unbehandeltes Holz, das nach seiner stofflichen Nutzung zurückbleibt. Unter Gebrauchtholz wird folglich Holz verstanden, welches aus dem Nutzungsprozess ausscheidet. Solche Gebrauchthölzer lassen sich nach der Herkunft in Bau- und Abbruchholz, Verpackungsholz sowie Möbel und sonstige Holzwaren unterteilen. Es findet sich in Bauabfällen, im Gewerbemüll, im Sperrmüll sowie auch im Hausmüll. Starke Schwankungen ergeben sich in Abhängigkeit von der Baukonjunktur, weil wesentliche Teile des Altholzaufkommens aus dem Gebäudeabbruch stammen.

Bis 2010 wird keine nennenswerte Veränderung des Gebrauchtholzaufkommens erwartet /IE 2004/.

Landschaftspflegeholz

Unter dem Begriff „Landschaftspflegeholz“ wird das Holz zusammengefasst, das bei der Pflege von Landschaftsteilen mit Gehölzbewuchs (d.h. Sträucher, Hecken, Bäume) wie z. B. Feldränder, Grünanlagen, Parks, Friedhöfen, Privatgärten, Naturdenkmäler, Naturschutzgebiete aber auch Gewässer-, Straßen- und Bahnbegleitflächen anfällt.

Die Aufwendungen bzw. Kosten, die erforderlich sind, um das meistens verteilt und in geringen Mengen anfallende Landschaftspflegeholz zu sammeln, aufzubereiten und zu transportieren, sind relativ hoch und können im Einzelfall sogar die eigentlichen Kosten des Holzschnittes übersteigen. Deshalb werden in der Regel nur geringe Holzmengen (meist handelt es sich dabei um größere Stämme) zu zentralen Sammel-/Häckselplätzen gebracht oder an Privatabholer als Brennholz verkauft. Beim überwiegenden Teil des Landschaftspflegematerials handelt es sich dagegen um heterogenes und minderwertiges holziges Material, das, sofern das Pflegeziel und -konzept dies zulassen, mit mobilen Häckslern zerkleinert und auf die Flächen zurückgeblasen oder direkt vor Ort verbrannt. Das an Häckselplätzen gesammelte Material (z. B. aus öffentlichen Grünanlagen, Privatgärten) wird üblicherweise als Strukturmaterial zur Kompostierung eingesetzt. Eine gezielte energetische Nutzung von Landschaftspflegeholz wird bisher nur selten praktiziert. Das Aufkommen an Landschaftspflegeholz wird sich bis 2010 nicht verändern /Hartmann und Kaltschmitt 2002/.

Gülle

Gülle und Exkremente von Nutztieren und Mist (sowie Ernterückstände) fallen in der Landwirtschaft an. Sie sind aus technischer Sicht relativ einfach zu vergären. Trotzdem werden derartige Stoffe bisher erst wenig genutzt, da landwirtschaftliche Substrate – anders als kommunale oder industrielle Abfälle und Abwässer – nicht gezwungenermaßen behandelt werden müssen und damit auch ohne eine anaerobe Zusatzbehandlung (d. h. nach einfacher Zwischenlagerung und folglich ohne Zusatzkosten) als Düngung auf die Felder ausgebracht werden können. Da sich die Vergärung dieser Reststoffe in Bezug auf die Düngungseigenschaften eher positiv (höhere Nährstoffausnutzung und Pflanzenverfügbarkeit) als negativ auswirkt und zusätzlich Strom und Wärme durch die Nutzung des Biogases bereitgestellt werden können, stehen diese Stoffe nahezu uneingeschränkt zur Verfügung. Im Bereich der Biogas-

anlagen in landwirtschaftlichen Betrieben ist daher – und aufgrund der Einspeiseregelungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes – in den kommenden Jahren mit einem deutlichen Zuwachs zu rechnen.

5.3.2 Aufbereitung fester Biomasse

Unter der Aufbereitung wird bei Holz oder Stroh vor allem die Zerkleinerung und gegebenenfalls die Herstellung von Presslingen aus Sägespänen und Mahlgut verstanden. Im Falle landwirtschaftlicher Produkte wird z. B. Getreide oder Mais als Ganzpflanze siliert. Die wichtigsten Aufbereitungsverfahren werden nachfolgend kurz dargestellt.

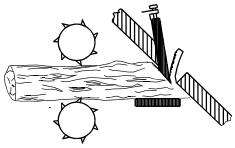
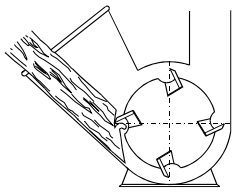
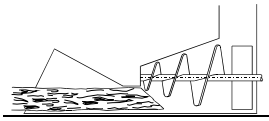
Zerkleinerung von Festbrennstoffen

Zur Zerkleinerung der Biomasse werden Holzspalter, Hacker oder Mühlen verwendet. Zur Auflösung von Strohballen werden maschinelle Ballenauflöser eingesetzt. Die unterschiedlichen Techniken werden nachfolgend beschrieben.

Spalter werden zur Produktion von Stück- oder Scheitholz eingesetzt. Neben den manuellen Verfahren zur Scheitholzbereitung, wie Axt oder Hammer und Keil, ermöglichen diese mechanischen Verfahren zur Holzspaltung eine „Massenproduktion“.

Bei der Herstellung von Holzhackschnitzeln können schnelllaufende **Hacker** und **Schredder** oder langsamlaufende **Zerspaner** eingesetzt werden. Bei den Hackern werden in der Regel ganze Bäume, Baumteile oder Äste mit Hilfe eines Schneiders zerteilt. Schredder und Zerspaner erlauben dagegen auch eine Verarbeitung von Holzresten. Die unterschiedlichen Hackertechniken werden in Tab. 5-3 dargestellt. Bei Schreddern erfolgt die Zerkleinerung nicht – wie bei Hackern – durch schneidende Werkzeuge, sondern durch eine Prallzerkleinerung. Zerspaner sind dagegen langsamlaufende Zerkleinerer, die u. a. zum Brechen sperriger Abfallhölzer (z. B. Palettenholz, Fensterrahmen, Altmöbel) und von grobem Müll aller Art verwendet werden. Dabei kann meist ein hoher Anteil an Störmaterialien (z. B. Metalle) toleriert werden.

Tab. 5-3: Bauarten von Holzhackern und ihre technischen Merkmale
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Bauart	Schneidwerkzeug	max. Holzstärke in mm	Hacklänge in mm	Kraftbedarf in kW	max. Leistung in m³/h
Scheibenhacker 	1 – 4 Messer	100 – 300	4 – 80 (meist einstellbar)	8 – 105	2 – 60
Trommelhacker 	2 – 8 durchgehende oder 3 – 20 Einzelmesser	180 – 450	5 – 80 (meist einstellbar)	45 – 325	15 – 100
Schneckenhacker 	Schneckenwindung	160 – 270	20 – 80 je nach Schnecke	30 – 130	5 – 40

Wird eine stärkere Zerkleinerung angestrebt (z. B. für eine anschließende Pelletierung von Holz oder Stroh) werden **Schneidmühlen** und **Prallzerkleinerungsmühlen** verwendet. Sie sind stets mit auswechselbaren Siebeinsätzen bestückt, durch die gewährleistet wird, dass eine bestimmte maximale Partikelgröße nicht überschritten wird. Der Durchmesser der Sieblöcher kann je nach gewünschter Feinheit angepasst werden.

Das Auflösen von Halmgutballen mittels **Ballenauflösern** hat die Aufgabe, den Zusammenhalt des Materials und die ursprünglich hohe Pressdichte für den Transport rückgängig zu machen, um den Brennstoff in eine dosierfähige Form zu bringen. Für die Auflösung von Quaderballen sind vollautomatische Zerkleinerungsstraßen möglich, während Rundballen in der Regel einzeln zugeführt werden müssen.

Verdichten von Festbrennstoffen

Das nach der Getreideernte auf dem Feld abgelegte Stroh kann aufgesammelt und durch Pressen zum leichteren Transport und zur Lagerung verdichtet werden. Hierzu werden vor allem Quaderballenpressen und Rundballenpressen eingesetzt.

Quaderballen: In Abhängigkeit vom Presskanalquerschnitt und der Ballenlänge ergeben sich unterschiedliche Ballengrößen. Häufig liegen die Presskanalbreiten zwischen 0,8 und 0,9 m oder bei ca. 1,2 m. Die Höhe der Ballen liegt meist bei 0,7 bis 0,9 m. Eine Ausnahme bilden die sogenannten "Hesston-Ballen", die eine Stirnfläche von 1,2 auf 1,3 m besitzen. Bei einer Presslingsdichte von 150 kg/m³ und einer Ballenlänge von 2,5 m beträgt das Gewicht eines solchen Strohballens bis zu 600 kg. Bei Heu- oder Getreideganzpflanzen wird dieser Wert aufgrund der höheren Materialdichte noch deutlich überschritten (700 bis 1.000 kg). Quaderballenpressen erreichen unter den Aufsammelpressen mit zum Teil mehr als 30 t/h die höchsten Durchsatzleistungen bei der Strohernte.

Rundballen: Im Gegensatz zu den Quaderballenpressen wird bei den Rundballenpressen das aufgenommene Material ähnlich wie ein Teppich aufgerollt und verdichtet. Die Durchsatzleistung gegenüber der Quaderballenpresse ist deutlich geringer; sie liegt bei ca. 8 bis 15 t/h.

Zum **Pelletieren** werden Hochverdichtungspressen eingesetzt, mit denen eine besonders hohe Veredelungsstufe des Brennstoffs erreicht wird (Pellets). Die Vorteile dieser Aufbereitungsformen sind u. a.:

- hoher Energieinhalt bei geringerem Volumen und die damit verbundenen logistischen Vorteile (so kann z. B. ein Lkw einen größeren Energieinhalt transportieren),
- günstige Schütt- und Dosiereigenschaften,
- Feuchteverminderung durch den Pelletiervorgang,
- Möglichkeit zur Verwendung von Zuschlagstoffen zur Veränderung der Brennstoffeigenschaften,
- geringe Staubentwicklung bei den Umschlagprozessen und
- hohe Lagerstabilität (kein biologischer Abbau).

Diesen Vorteilen steht vor allem der Nachteil erheblich höherer Produktionskosten gegenüber. Pelletieranlagen werden z. B. zur Aufbereitung von Holzresten aus Sägewerken oder bei holzverarbeitenden Betrieben eingesetzt (u. a. Sägemehl, Späne, Holzstaub). Die Pelletierung wird auch bei der Futtermittelproduktion eingesetzt und ist somit Stand der Technik.

Zur Pelletierung von Biomasse kommen hauptsächlich Kollergangpressen mit Ringmatrizen zum Einsatz. Bei diesem Verfahren sind 2 bis 5 Rollen ("Koller") an einer bzw. an mehreren gekreuzten Achsen angebracht, die in ihrer Mitte eine gemeinsame

Drehachse besitzen (Abb. 5-3). Die Kollerachsen verharren dabei in starrer Position, während die Matrize angetrieben wird. Dadurch wird die zu pelletierende Masse (z. B. Sägespäne) in die Bohrungen der Matrize hineingepresst und dort verdichtet. Die am Ende der Bohrungen austretenden Presslinge können auf der anderen Seite der Matrize auf die jeweils gewünschte Länge abgeschnitten werden.

Bei der Pelletierung werden Presslinge mit unterschiedlichen Abmessungen hergestellt. Deren Qualitätsmerkmale wie Rohdichte, Schüttdichte, Abriebfestigkeit oder Feinanteil lassen sich innerhalb einer bestimmten Bandbreite beeinflussen. Die Anforderungen an die Pelletqualität regelt eine DIN-Norm.

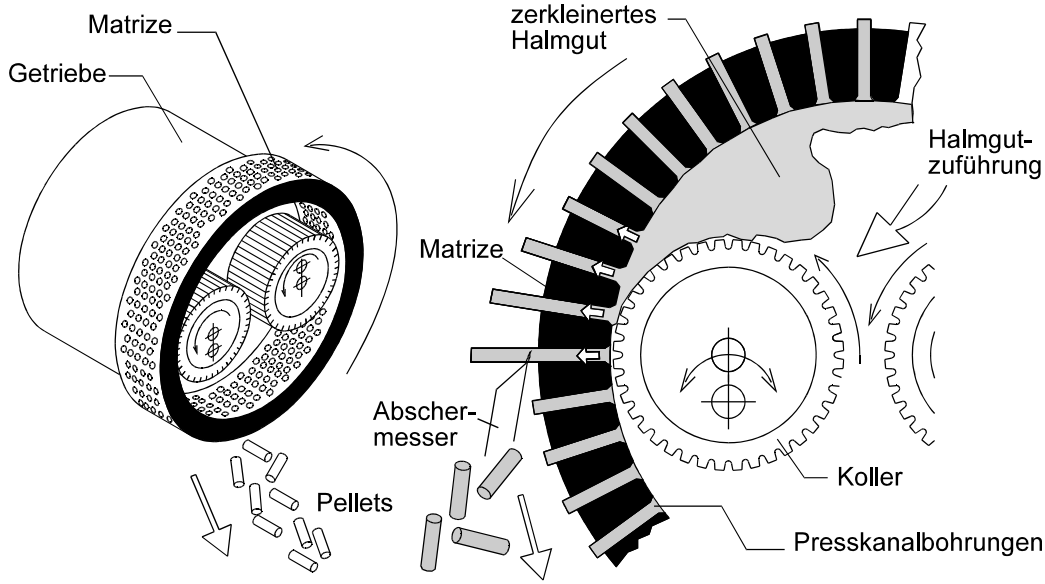


Abb. 5-3: Arbeitsweise einer Kollergangpresse mit Ringmatrize
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Silieren von Biomasse

Die zu silierende Pflanze wird als Ganzpflanze geerntet, bei der Ernte gehäckselt und luftdicht in Silos eingelagert. Die Zuckeranteile der Pflanze werden durch Milchsäurebakterien vergoren. Durch das so entstandene sauere Milieu wird das Wachstum von Fäulnisbakterien unterdrückt. Nach dem Abbau des Zuckers kommt der Gärungsprozess zum Stillstand und die silierte Frucht ist für lange Zeit haltbar /Nitzschke und Barth 2004/.

5.3.3 Bereitstellung biogener Kraftstoffe

Die Untersuchung zur Bereitstellung biogener Kraftstoffe erfolgt unter Berücksichtigung eines Zeithorizonts bis 2010 für Bioethanol, Biodiesel und Biogas. Nachfolgend werden für diese drei Bioenergieträger die wichtigsten Herstellungsabläufe dargestellt.

Bereitstellung von Bioethanol

Zur Herstellung von Bioethanol werden in Deutschland zuckerhaltige Pflanzen wie Zuckerrüben und stärkehaltige Pflanzen wie Getreide und Kartoffeln eingesetzt. Es folgt ein kurzer Überblick über die Rohstoffeigenschaften der Ausgangsstoffe sowie die technische Herstellung des Ethanols. Der mögliche Einsatz cellulosehaltiger Rohstoffe für die Ethanolherstellung wird in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da es bis 2010 zu keiner nennenswerten Produktion aus dieser Quelle kommen wird.

Stärkehaltige Rohstoffe: Weizen und Roggen sind die wichtigsten Rohstoffe in deutschen, französischen, spanischen und osteuropäischen Getreidebrennereien. Die zurzeit weltweit wichtigste stärkehaltige Ressource für die Ethanolproduktion stellt der Mais dar. Seine Eignung für die Ethanolherstellung wird dabei durch den hohen Stärkegehalt bestimmt, wodurch sich eine relativ hohe Ausbeute je t Frucht ergibt (Tab. 5-4). In Deutschland stellt Mais aus anbautechnischen Gründen allerdings keine Option für die Produktion größerer Mengen Ethanols dar (vgl. Kap. 5.2.2).

Zuckerhaltige Rohstoffe: Die weltweit wichtigste Ressource zur Ethanolproduktion ist das Zuckerrohr, welches ähnlich wie Mais aus anbautechnischen Gründen in Deutschland aber keine Option darstellt.
Aus den 1980-er Jahren liegen bereits umfangreiche Erfahrungen mit Zuckerrüben als Rohstoffpflanzen für die Ethanolgewinnung vor. Die Erzeugungskosten für Ethanol aus Zuckerrüben liegen über den Erzeugungskosten für Ethanol aus Getreide. Zudem lassen sich derzeit in Verbindung mit der ausgelaufenen Zuckermarktordnung höhere Erlöse durch die Produktion von Kristallzucker erwirtschaften. So lange der europäische Zuckermarkt feste Preise gewährleistet, ist es somit wirtschaftlicher, Ethanol aus Getreide zu erzeugen. Daher wird die Weiterverarbeitung von Zuckerrüben zu Biotreibstoffen derzeit in Deutschland nicht betrieben oder weiterentwickelt (abgesehen von der Verarbeitung kleiner Mengen von Melasse, einem Nebenprodukt der Zuckerindustrie).

Die Saftgewinnung aus Zuckerrüben erfolgt durch mechanisches Pressen oder durch Diffusionsverfahren. Im Gegensatz zur Herstellung von Kristallzucker aus zuckerhaltigen Lösungen kann im Verfahren der Ethanolherstellung prinzipiell auf eine intensive Reinigung des Zuckersaftes (Saftklärung) verzichtet werden. In jedem Fall muss der Saft jedoch pasteurisiert werden, um die Zahl störender Fremdkeime zu begrenzen. Wird der gewonnene Zuckersaft nicht sofort verarbeitet, kann er durch Eindampfung haltbar gemacht ("Dicksaft", Ethanolproduktion in Zeitz) und nach einer entsprechenden Lagerung zu Alkohol vergoren werden /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Tab. 5-4: Ethanolerträge in Deutschland je Frucht und ha
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001, Schmitz 2005]

	Rohstoff je l Ethanol	Rohstoffertrag je ha	Ethanolertrag je ha
Weizen	2,7 kg	7,3 t	2 700 l
Triticale	2,7 kg	5,9 t	2 200 l
Roggen	3,0 kg	5,5 t	1 800 l
Mais	2,5 kg	--	--
Zuckerrübe	9,5 kg	56 t	5 900 l

Ethanolherstellung: Grundsätzlich kann nur Zucker durch die alkoholische Gärung in Ethanol und Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgewandelt werden. Wird jedoch ein entsprechender Zwischenprozess vor der eigentlichen Fermentation vorschaltet, können grundsätzlich auch stärke- und cellulosehaltige organische Stoffe zur Alkoholgewinnung eingesetzt werden.

Um die Stärke für eine Vergärung durch Hefe zugänglich zu machen, muss sie nicht nur wie beim Zucker aus dem Zellmaterial freigesetzt, sondern zusätzlich auch in besonderen Verfahrensschritten vor der Fermentation (Verzuckerung) in vergärbaren Zucker (Glucose oder Maltose) umgewandelt werden. Dazu werden stärkeabbauende Enzyme verwendet, die zunächst die Stärke verflüssigen und anschließend verzuckern.

Die aus den unterschiedlichen Rohstoffen gewonnenen Ausgangslösungen werden in der Regel durch Zusatz von Hefen vergoren. Wie bei den meisten biotechnischen Verfahren kommt es dabei auf die Einstellung optimaler Lebensbedingungen für die Mikroorganismen an (pH-Wert für Hefen: 4-6, Temperatur: 25-40 °C). Der Gärprozess verläuft zu Beginn sehr schnell und nimmt gegen Ende des Prozesses ab, weil der produzierte Alkohol die weitere Hefeneubildung unterbindet. Sobald eine Verlängerung der Gärzeiten die wirtschaftlich interessante Ausbeute nicht mehr steigert, wird der Gärprozess beendet.

Unter den für Hefen günstigen Lebensbedingungen ist auch das Wachstum anderer Mikroorganismen möglich. Insbesondere die säurebildenden Bakterien (Milch-, Butter- oder Essigsäurebakterien) sind als schädlich anzusehen. Sie verbrauchen für ihre Vermehrung wertvollen Zucker oder Alkohol und senken dadurch die Gärleistung. Solche Nebengärungen werden durch das Einstellen einer hohen Hefekonzentration und hohen Hefewachstumsrate zu Beginn der Gärung vermieden.

Nach Abschluss des Gärprozesses erfolgt die Alkoholanreicherung aus der vergorenen Maische. Das geschieht in einem meist mehrstufigen Prozess. Als Produkt der letzten Stufe (Rektifikation) entsteht der ca. 96 %-ige Alkohol. Eine weitere Konzentrationserhöhung ist unter atmosphärischen Bedingungen nicht möglich. Für eine Ethanolbeimischung zu fossilen Treibstoffen ist jedoch eine weitere Erhöhung der Ethanolkonzentration (Absolutierung) aus steuerrechtlichen Gründen erforderlich.

In Deutschland gibt es derzeit Anlagenkapazitäten zur Erzeugung von 500.000 t Ethanol (ca. 13,5 PJ). Bis zum Jahr 2010 wird davon ausgegangen, das sich die Kapazitäten zur Ethanolerzeugung aus Getreide in Deutschland auf 1,3 Mio. t (ca. 35,1 PJ) erhöhen werden /Weber 2004/. Zur Erfüllung der Vorgabe eines fast sechsprozentigen Biokraftstoffanteils am Kraftstoffverbrauch bis 2010 gemäß EU-Kraftstoffdirektive /98/70/EG/ und /Richtlinie 2003/30/EG/ sind allerdings 2,1 Mio. t Ethanol erforderlich. Dieser Bedarf wird entweder durch Importe oder durch die erhöhte Produktion von Ethanol aus Zucker (bei geänderter EU-Zuckermarktordnung) gedeckt werden müssen.

Bereitstellung von Biodiesel

In Mitteleuropa kommen hauptsächlich **Raps und Sonnenblumen** als Ölsaaten für die Produktion von Kraftstoffen auf Pflanzenölbasis in Frage.

Rapssaat als der in Deutschland mit Abstand gebräuchlichste Rohstoff für die Bio-Treibstoffgewinnung, enthält im lagerfähigen Zustand etwa 43 % Öl, 40 % Rohprotein und Extraktstoffe, 7 % Wasser, 5 % Rohfaser und 5 % Asche.

Grundsätzlich unterscheidet sich die Gewinnung von Pflanzenölen für eine spätere energetische Nutzung nicht von den Verarbeitungstechniken in der Nahrungsmittelindustrie. Es bestehen lediglich unter Umständen veränderte Anforderungen an die Qualität der Öle.

Pflanzenöle können entweder durch eine ausschließliche Auspressung (d. h. Fertigpressen), durch eine ausschließliche Extraktion (d. h. Direktextraktion) oder durch eine Kombination beider Verfahren (d. h. Pressung/Extraktion) gewonnen werden. Bei kombinierten Verfahren wird im Anschluss an die Pressung der Ölsaat die im Presskuchen verbleibende Ölmenge mit einem Lösemittel extrahiert. Derartige kombinierte Anlagen stellen den derzeitigen Stand der Technik großer Ölmühlen dar; die Ölausbeute liegt hier bei etwa 99 %.

Der Ablauf lässt sich grob in die Vorbehandlung der Ölsaat (u. a. Reinigung, Vorwärmung), die Pressung, die Extraktion und die Aufarbeitung der Extraktionsfraktionen unterteilen. Als Produkte fallen das Pflanzenöl und das Extraktionsschrot an, welches ein gebräuchliches Eiweißfuttermittel darstellt.

Das gewonnene Pflanzenöl kann durch chemische Veränderungen wie die Umesterung und die Zugabe von Additiven so verändert werden, dass dessen kraftstofftechnische Eigenschaften dem konventionellen Dieselkraftstoff ähnlich sind. Weiterhin besteht auch die Möglichkeit, das chemisch unveränderte Pflanzenöl zu nutzen. Da dies ohne Veränderung der Motoren, welche bis jetzt nur bei einem geringen Teil der Fahrzeuge vorgenommen worden sind (Landwirtschaft, Transportgewerbe), nicht möglich ist, wird diese Möglichkeit hier nicht weiter verfolgt.

Das verbreiteste Verfahren zur Anpassung des Pflanzenöls an konventionelle Dieselmotoren ist die **Umesterung von Pflanzenölen** zu Pflanzenölmethylester (PME). Speziell für die Produktion von RME (d. h. Rapsölmethylester = Biodiesel) gibt es in Deutschland – neben den Anlagen der Oleochemie – Verarbeitungskapazitäten für insgesamt ca. 2 Mio. t RME im Jahr 2005.

Bei der Umesterung wird das relativ hoch-molekulare Triglycerid in drei niedrigmolekulare Verbindungen (Monoglyceride) gespalten, die dem herkömmlichen Dieselkraftstoff in Bezug auf die Fließfähigkeit (Viskosität) in etwa entsprechen. Der dreiwertige Alkohol des Pflanzenöls (Glycerol) wird dabei durch drei einwertige

Alkohole aus der Esterbindung verdrängt. Da die ursprüngliche Bindungsform (d. h. die Esterbindung) erhalten bleibt, bezeichnet man diesen Vorgang als Umesterung. Als einwertiger Alkohol, der für diesen Prozess nötig ist, wird hauptsächlich Methanol eingesetzt. Glycerin fällt als Nebenprodukt an.

Der entstandene Kraftstoff wird – beim Einsatz von Methanol zur Umesterung – chemisch exakt als Pflanzenölfettsäuremethylester bzw. Rapsölfettsäuremethylester oder kurz als Pflanzenölmethylester bzw. Rapsölmethylester (RME, landläufig "Biodiesel") bezeichnet. Die Mindestanforderungen für diesen Kraftstoff sind in der Europäischen Norm DIN EN 14 214 festgelegt.

Bis zum Jahr 2007 wird davon ausgegangen, dass die Kapazitäten zur Biodieselerzeugung auf ca. 3,4 bis 3,6 Mio t je Jahr ansteigen werden, /UFOP 2006/ bis 2010 noch darüber. Die Anbauflächen zur Produktion von Ölsaaten, um den erforderlichen Rohstoffbedarf dieser Anlagen zu decken, werden allerdings in Deutschland nicht ausreichen und daher wird ein Teil der Rohstoffe importiert werden müssen.

Bereitstellung von Biogas

Die Vergärung oder Methanisierung ist ein anaerober Abbauprozess, bei dem durch anaerobe Bakterien das Biogas entsteht. An diesem Prozess sind drei Gruppen von Bakterien beteiligt, welche das Ausgangsmaterial (in feuchtem bis wässrigem Milieu) in aufeinander folgenden Schritten zunächst zu einfacheren organischen Verbindungen (Säurebildung), dann zu niederen organischen Fettsäuren (Acetatbildung) und schließlich zu Biogas (Methanbildung) abbauen. Dieses auf biologischem Wege entstandene Biogas besteht zu rund zwei Dritteln aus Methan (CH_4), zu rund einem Drittel aus Kohlenstoffdioxid (CO_2) sowie aus diversen Spurengasen.

Aus technischen Gründen oder unter Umweltaspekten ist es meist erforderlich, dass dem Biogas unerwünschte Komponenten entzogen werden. Hierzu zählt unter anderem das Wasser. Es erhöht die Korrosionsgefahr und schafft Probleme überall dort, wo das Gas gekühlt oder komprimiert wird. Mit dem Kondenswasser wird auch ein Teil des Schwefelgehaltes abgeführt.

Zur weiteren Entschwefelung hat sich heute die kostengünstige biotechnische Entschwefelung durch gezieltes Einblasen geringer Außenluftmengen in den Gasraum des Gärbehälters durchgesetzt. Durch die Tätigkeit von Schwefelbakterien wird der Schwefelwasserstoff unter Luftzufuhr in elementaren Schwefel umgewandelt. Der

elementare Schwefel bildet einen gelblichen Belag auf der Gülle, er dient nach der Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen als Pflanzennährstoff /Kaltschmitt und Hartmann 2001/.

Für die Beheizung des Substrats während des Gärprozesses wird in den gemäßigten Klimazonen ca. 10 bis 20 % des erzeugten Biogases verbraucht /FNR 2004/. Außerdem wird der Abbau durch eine gute Durchmischung des Gärgutes gefördert (z. B. durch Rührwerke). Um die Wärmeverluste zu minimieren, ist der Gärbehälter wärmeisoliert.

Durch die Methangärung kann – im Gegensatz beispielsweise zur Alkoholgärung – ein sehr weites Spektrum von Verbindungen abgebaut werden: Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette und verschiedenste, auch komplexe organische Verbindungen. Anaerobe Abbauwege sind daher speziell für die Verwertung von heterogen zusammengesetzten, feuchten Abfällen organischer Herkunft und mit organischen Stoffen belasteten Abwässern geeignet. Der Holzbestandteil Lignin wird anaerob allerdings nicht abgebaut. Solches Material mit einem hohen Ligninanteil stört zwar den Gärprozess nicht, beansprucht aber bei der technischen Umsetzung in einer Biogasanlage unnötig Platz. Es kann technisch daher sinnvoller thermisch oder stofflich genutzt werden.

Die anaerobe Gärung wurde zuerst in der kommunalen Abwasserreinigungstechnik eingesetzt. Allerdings stand dabei nicht die Nutzung von erneuerbarer Energie im Vordergrund. Vielmehr sollte der Klärschlamm bei möglichst geringem Schlammvolumen stabilisiert werden. Heute sind allerdings die Faultürme der Klärwerke zum größten Teil mit Blockheizkraftwerken (BHKW) nachgerüstet worden, die den Energieinhalt des Biogases ausnutzen und wesentlich zur Energieversorgung des Klärwerks beitragen.

Nachfolgend werden die Substrate kurz erläutert, die hauptsächlich zur Biogaserzeugung eingesetzt werden: Gülle und Festmist aus der Tierhaltung sowie speziell angebaute Energiepflanzen. Auch eine Kombination der Substrate ist möglich.

Als **landwirtschaftliche Reststoffe** sind Gülle und Exkremente von Nutztieren, Ernterückstände und Mist die typischen Einsatzstoffe für die Biogasgewinnung in der Landwirtschaft. Das Erzeugen von Biogas aus Gülle dient nicht nur der Gewinnung von Energie, sondern bringt noch eine Reihe weiterer wertvoller Nebeneffekte mit sich. Hierzu zählen die Vermeidung von Emissionen, die durch biologische Abbauprozesse hervorgerufen werden, die Verringerung der Geruchsbelastung, die Verbesserung der Fließfähigkeit und Homogenität der Gülle, die Vermeidung von Nähr-

stoffverlusten, die Verbesserung der Pflanzenverträglichkeit der Gülle und die Verringerung von Krankheitskeimen und Unkrautsamen. Aus diesem Grund spricht man auch von anaerober Güllebehandlung. Als Orientierung für die Biogasgewinnung aus Gülle gilt, dass aus pro Tag etwa 1 m³ Biogas mit einem Methananteil von ca. 60 % (ca. 21,6 MJ) je Großvieheinheit (1 GV=500 kg Lebendgewicht) zu gewinnen ist. Der mögliche Gasertrag hängt vom Viehbestand ab, kann im Einzelfall jedoch abweichen. Dabei sind Gärzeiten von etwa 3 Wochen bei Gärtemperaturen von ca. 28 bis 37 °C praxisüblich /FNR 2004/.

Neben Gülle können auch **Energiepflanzen** in einer Biogasanlage zu Methan umgewandelt werden. Hierzu wird in Deutschland wegen der relativ großen Flächenerträge meistens Mais eingesetzt. Je Tonne Maissilage (Frischmasse) sind etwa 130 bis 180 m³ Biogas mit einem Methananteil von 53% (ca. 14 bis 19 MJ/m³) möglich. In Deutschland beträgt der Ganzpflanzenertrag von Silomais rund 44 t/ha. Je ha Ackerfläche lassen sich somit pro Jahr rund 5.000 bis 8.000 m³ Biogas gewinnen.

Biogaserträge unterschiedlicher landwirtschaftlicher Rohstoffe sind in Tabelle 5-4 dargestellt.

Die Gärzeiten z. B. der Silagen sind wegen des schwierigeren Aufschlusses der festen Biomasse mit etwa 40 bis 60 Tagen mehr als doppelt so lang wie die von Gülle. Da der Wasseranteil von Maissilage (oder auch anderer Energiepflanzen) viel geringer als der von Gülle ist, sind die spezifischen Massenströme in einer Biogasanlage, die derartige Rohstoffe vergärt, viel geringer als bei einer Anlage für Gülle. Bei gleicher Biogasproduktion kann der Fermenter z. B. kleiner dimensioniert sein /FNR 2004/.

Tab. 5-4: Methanerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Rohstoffe
[Quelle: /Vetter/]

Rohstoff	Methanertrag in m^3/t_{oTS}	Methanertrag in m^3/ha/a
Futterrübe + Blatt	456	5.800
Kartoffel	405	3.360
Silomais	410	5.780
Weizen	390	2.960
Gerste	360	2.030
Raps	340	1.190
Weidelgras	410	4.060
Luzerne	410	3.965
Klee	350	2.530
Marktstammkohl	255	1.680
Methanertrag in Kubikmeter Biogas (m^3), oTS: organische Trockensubstanz, ha: Hektar, a: Jahr		

In jüngerer Zeit gewinnt das **Konzept der Co-Vergärung** mit unterschiedlichen Substraten an Bedeutung. Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass viele Anlagen zur anaeroben Vergärung flüssiger Substrate ohne große Umbauten auch größere Mengen an zusätzlicher fester organischer Substanz verarbeiten können. So werden beispielsweise in Landwirtschaftsanlagen und kommunalen Faultürmen oft so genannte Co-Substrate von außerhalb des eigentlichen Betriebs zugeführt. Mit der dadurch vergrößerten Gasausbeute – und den so erzielbaren Erlösen – kann eine bessere Wirtschaftlichkeit der Anlage erreicht werden. Oft bewirkt das Co-Substrat auch ein ausgewogeneres Nährstoffverhältnis, was den Gärprozess positiv beeinflusst. Als Co-Substrate eignen sich nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) mit einem hohen Anteil an organischer Substanz (z. B. Stärke), aber auch Futter- (d. h. Ganzpflanzensilage) und Gemüsereste oder Fette /FNR 2004/. Der Einsatz von NaWaRo in Biogasanlagen wird durch das EEG mit einem zusätzlichen Vergütungsbonus (NaWaRo-Bonus) unterstützt.

Bis 2010 wird der Anteil der Anlagen die nach dem Konzept der Co-Vergärung (auf Basis NaWaRo) betrieben werden zunehmen. Laufende Untersuchungen des IE

Leipzig im Rahmen verschiedener Monitoring-Berichte bestätigen einen deutlichen Anstieg beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Biogasgewinnung. Zudem haben sich die Leistungen der Einzelanlagen von wenigen 100 kW_{el} in 2003 auf bis zu mehreren MW_{el} in 2005 erhöht. Über die weitere Entwicklung zur künftigen Anlagenanzahl liegen zurzeit allerdings noch keine verlässlichen Prognosen vor. Zusätzlich unterstützt wird der weiter wachsende Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Biogasgewinnung durch Züchtungserfolge die zu größeren Ernteerträgen beim Energiepflanzenanbau und damit zu einem größeren Ertrag an Biogas je ha führen. Da auf dem Gebiet Züchtungsoptimierung noch keine genauen Angaben zur Steigerung der Methanausbeute vorliegen, wird diese Steigerung im Verlauf dieser Studie nicht berücksichtigt.

5.3.4 Klimagasbilanzen

Die verschiedenen Bioenergieträger weisen einen unterschiedlichen Wassergehalt auf. Da durch den Wassergehalt die Brennstoffeigenschaften und damit der Heizwert beeinflusst werden, erfolgt neben der Darstellung der Klimagasemissionen der beschriebenen Bereitstellungs- und Aufbereitungsverfahren je t Biomasse auch eine Darstellung, die sich auf den Energiegehalt der unterschiedlichen Bioenergieträger bezieht.

Aufgrund der Vielzahl der Bioenergieträger und Aufbereitungsverfahren werden die Ergebnisse für zwei Gruppen dargestellt:

- Zuerst werden in Abb. 5-4 und Abb. 5-5 die holz- und halmgutartigen Energieträger aufgeführt.
- Anschließend erfolgt eine Gesamtdarstellung aller biogener Energieträger in Abb. 5-6 und Abb. 5-7. Die holz- und halmgutartigen Energieträger sind zur besseren Einordnung der Ergebnisse noch einmal in der Gesamtansicht aufgeführt.

Klimagasemissionen holz- und halmgutartiger Energieträger

Die geringsten Klimagasemissionen (4 bis 25 kg je t) werden durch die Bereitstellung holzartiger Reststoffe mit geringer Aufbereitung verursacht (Abb. 5-4). Da Waldrestholz, Industrierestholz, Gehölzschnitt, Stückholz und Holzpellets als Abfallprodukt nicht angebaut werden müssen, sind die Klimagasemissionen einzig auf den Einsatz von Hilfsenergie zur Brennstoff-Aufbereitung zurückzuführen. Brennstoffe, deren Aufbereitung aufwändiger (Pellets) ist oder die extra angebaut werden müssen (Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Getreideganzpflanzen, Körner), sind mit Klimagasemissionen in Höhe von 150 bis zu mehr als 300 kg je t Biomasse verbunden.

Bei der Betrachtung der Emissionen, die je GJ Bioenergieträger entstehen (Abb. 5-5), ist im Vergleich zur vorangegangenen Betrachtung vor allem die Erhöhung der Emissionen von Holz aus Kurzumtriebsplantagen auffällig. Der Wassergehalt von Holz aus Kurzumtriebsplantagen ist mit 50 % bei der Ernte relativ hoch, wodurch sich ein geringerer auf die Masse bezogener Energiegehalt ergibt.

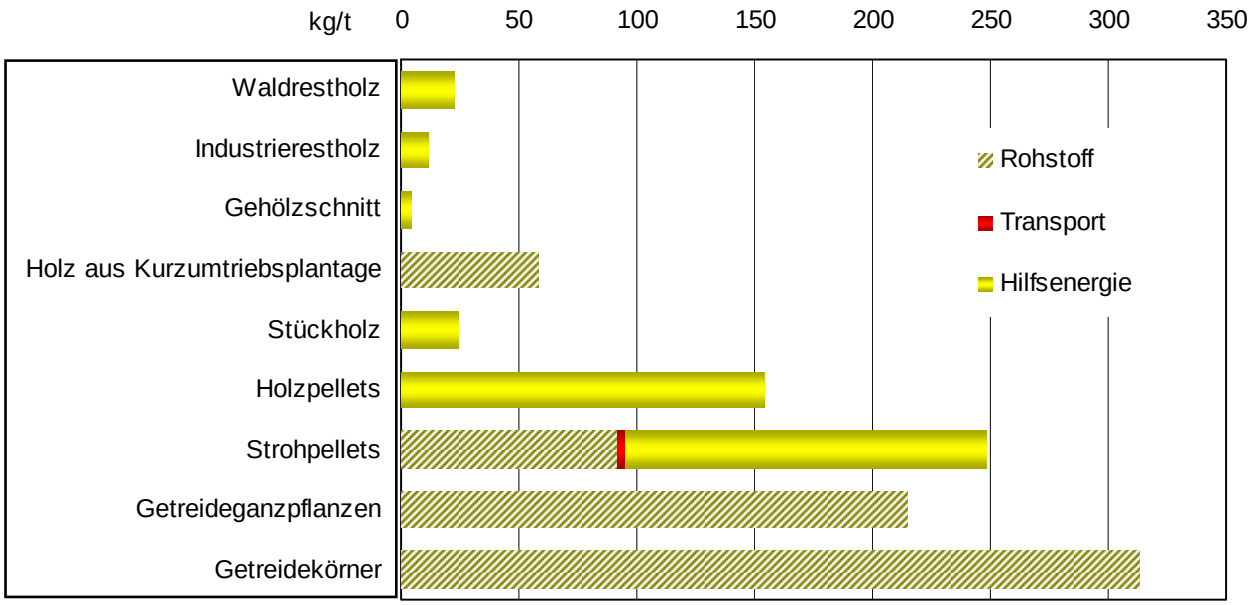


Abb. 5-4: Klimagasemissionen holz- und halmgutartiger Biomasse in kg je t
[Quelle: Eigene Berechnungen, TLL 2005]

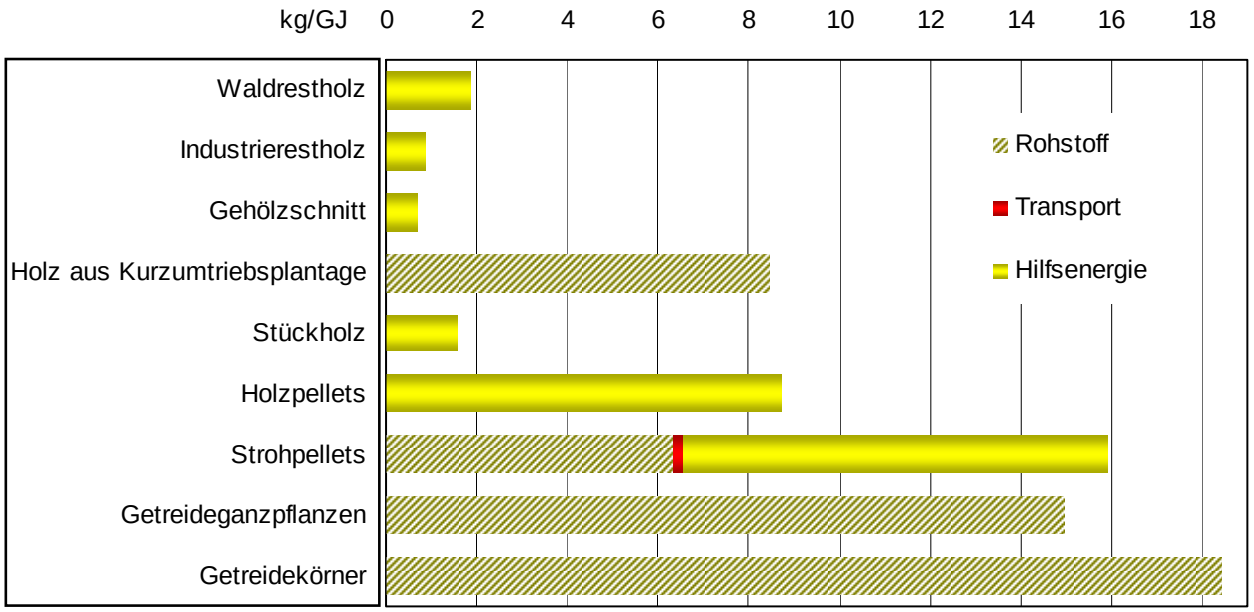


Abb. 5-5: Klimagasemissionen holz- und halmgutartiger Biomasse in kg je GJ
[Quelle: Eigene Berechnungen, TLL 2005]

Klimagasemissionen aller biogenen Sekundärenergieträger

Die biogenen Sekundärenergieträger, die durch aufwändige Wandlungsprozesse bereitgestellt werden, dies sind Biodiesel, Bioethanol und Biogas, sind mit Klimagasemissionen verbunden, die um ein vielfaches über denen der holz- und halmgutartigen Bioenergieträger liegen (Abb. 5-6). Dies liegt zum einen daran, dass die Rohstoffe schon aufwändiger produziert werden müssen (zu erkennen in der Abb. 5-6 an dem grün schraffierten Balken (Rohstoff) für die Klimagasemissionen der Rohstoffproduktion), zum anderen an dem komplexen Verfahrensablauf und der dadurch benötigten Hilfsenergie zur Produktion der Sekundärenergieträger.

Ein nennenswerter Anteil an Klimagasemissionen entfällt bei der Biodieselproduktion auf das zur Umesterung erforderliche Methanol.

Einen Sonderfall stellt die Biogasbereitstellung dar. Zum einen wird bei der Biogasbereitstellung durch Gülle eine sehr große Menge an Methanemissionen vermieden, da die Gülle nicht mehr offen gelagert und anschließend ausgebracht wird. Sobald die Gülle in der Tierhaltung anfällt, gelangt sie als Rohstoff in den Biogasprozess und die Methanemissionen gelangen nicht mehr in die Umwelt. Zum anderen entsteht am Ende des Biogasprozesses ein Gärrest, der als Dünger verwendet werden kann und somit konventionellen Dünger ersetzt. Hierfür wurde eine Dünger-Gutschrift vergeben, die als vermiedene Emissionen ausgewiesen ist.

Beim Vergleich des Biogases aus Gülle und Maissilage ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Auswirkungen der vermiedenen Emissionen sehr viel größer sind als die Auswirkungen aufgrund des zu ersetzenden Düngers.

In Abb. 5-7 sind die **Gesamtbilanz der Klimagasemissionen** dargestellt, die sich aus der Summe der vermiedenen und zusätzlichen Emissionen ergibt. Die Klimagasemissionen liegen für die Biokraftstoffe Ethanol und Biodiesel zwischen 1,1 t Ethanol aus Zucker und 1,8 t Ethanol aus Stärke. Der Grund für die geringeren Klimagasemissionen der Ethanolherstellung aus Zucker gegenüber Stärke liegt an den geringeren Umweltbelastungen in der Rohstoffbereitstellung gegenüber der Weizenproduktion. Durch die vermiedenen Emissionen der Güllelagerung beim Biogasprozess ergibt sich bei der Biogasbereitstellung aus Gülle eine erhebliche Entlastung der Umwelt, d. h. durch die Produktion von Biogas wird eine sehr große Menge an Klimagasemissionen eingespart (etwa. 1,5 t je t Biogas). Aber auch die Bereitstellung von Biogas aus Maissilage ist mit relativ geringen Klimagasemissionen verbunden, sie liegt knapp über den Strohpellets.

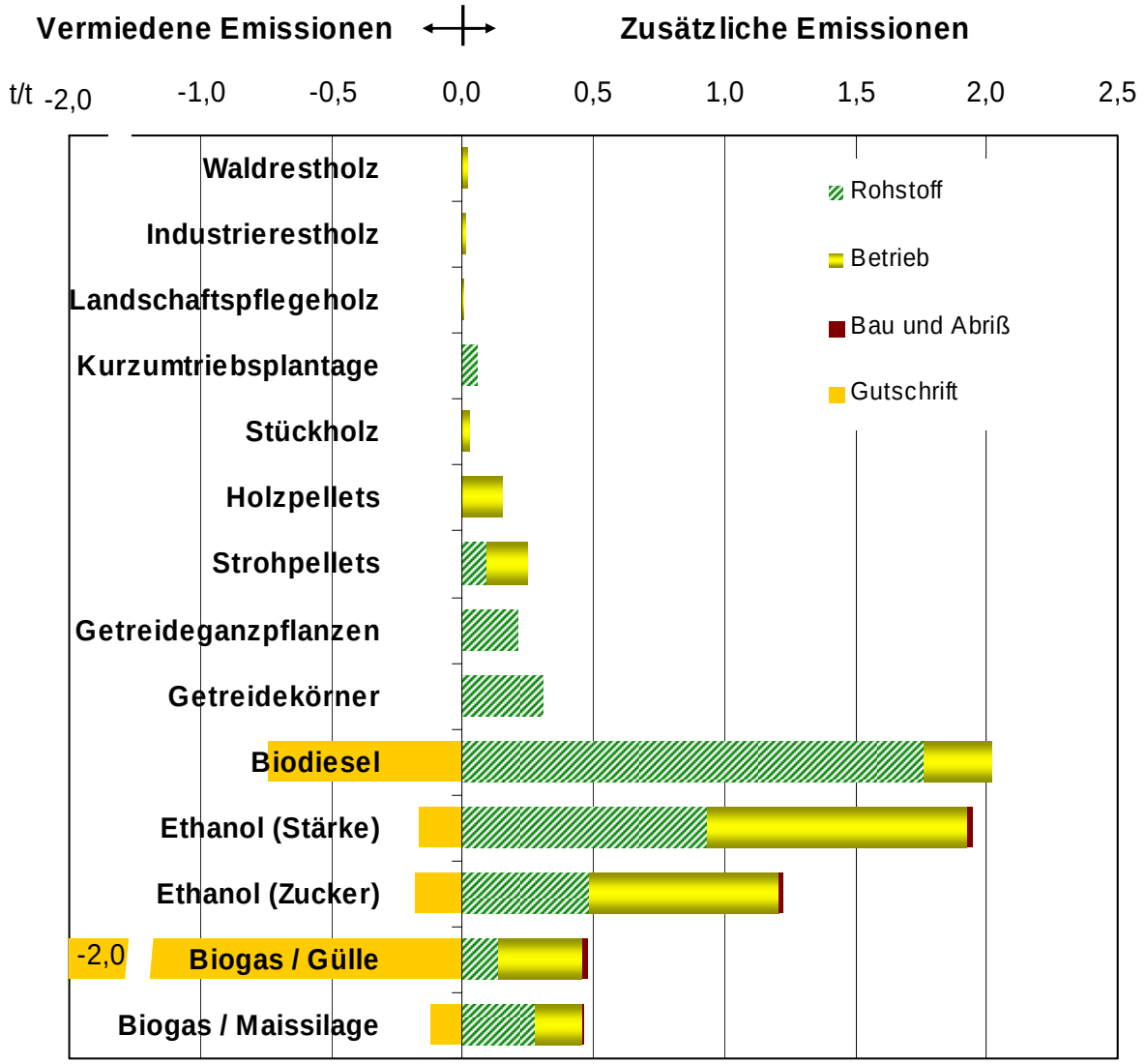


Abb. 5-6: Zusammensetzung der Klimagasemissionen in t je t Sekundärenergieträger nach Verursachungsart
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Schmitz 2005 und Wuppertal 2005]

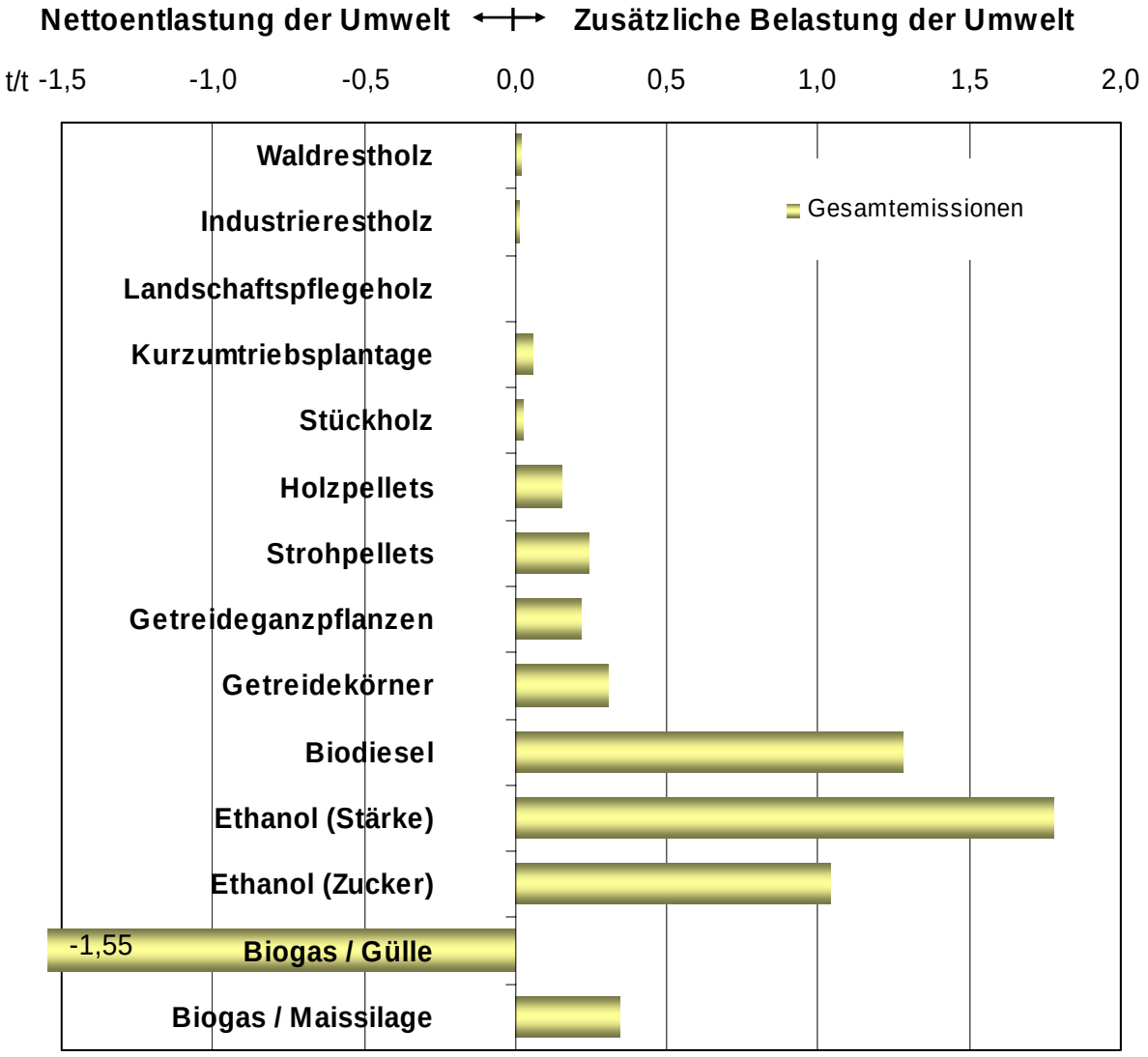


Abb. 5-7: Gesamtbilanz der Klimagasemissionen in t je t Sekundärenergieträger
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Schmitz 2005 und Wuppertal 2005]

In Abb. 5-8 und Abb. 5-9 sind die **Klimagasemissionen bezogen auf den Heizwert des Sekundärenergieträgers** dargestellt. Bezogen auf die Höhe der Klimagasemissionen und damit Reihenfolge der Sekundärenergieträger ergibt sich vor allem eine Verschiebung zwischen Biodiesel und Ethanol.

Aufgrund des höheren Heizwertes[13] sind die Klimagasemissionen je GJ bei Biodiesel im Vergleich zu Ethanol (aus Zucker) geringer, während sie zuvor beim Mengen-

[13] Heizwert Biodiesel: 36,8 MJ/kg, Heizwert Ethanol 27,0 MJ/kg

vergleich noch höher waren. Als Emissionen ergeben sich für Biodiesel ca. 37 kg/GJ, für Ethanol aus Zucker 49 kg/GJ und für Ethanol aus Stärke 84 kg/GJ.

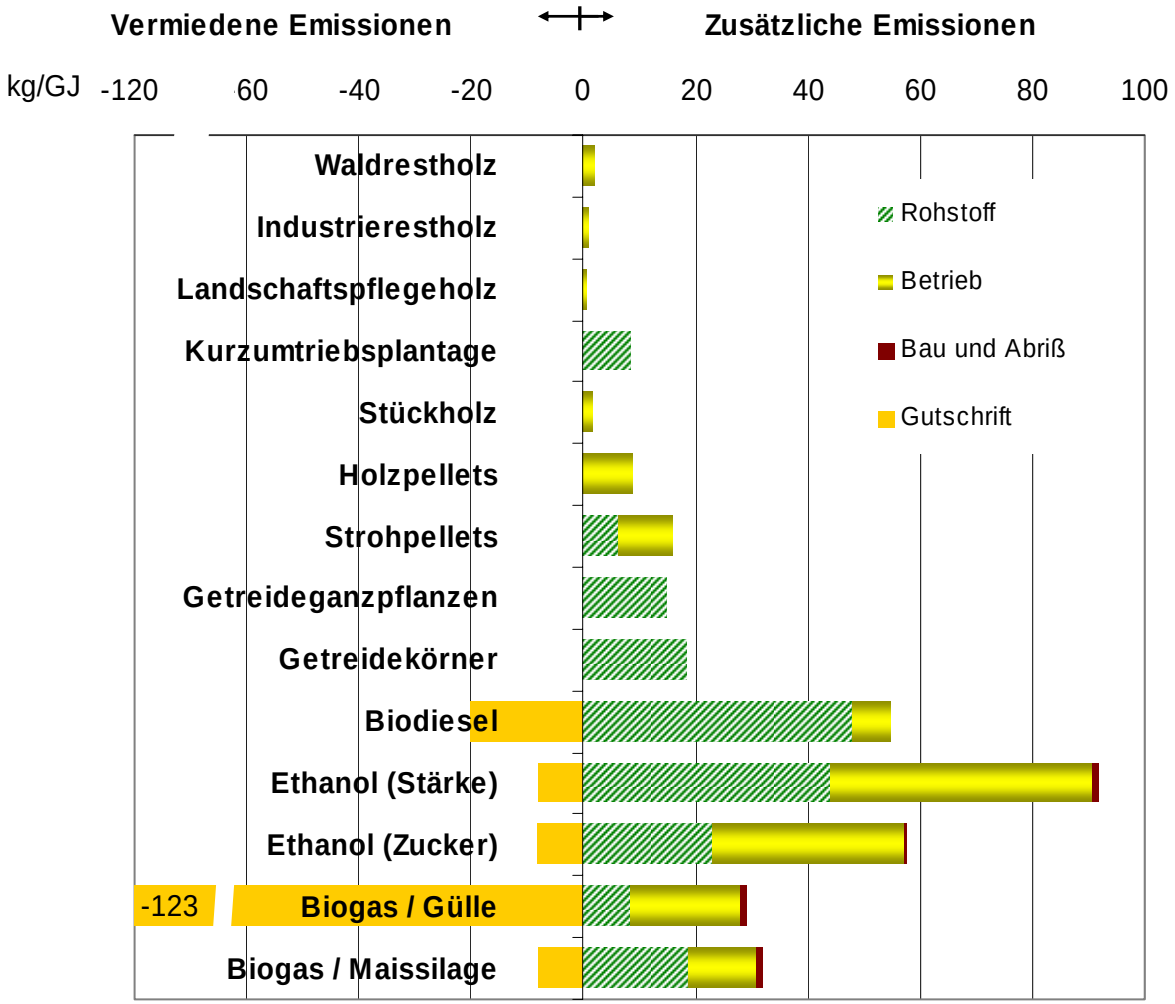


Abb. 5-8: Zusammensetzung der Klimagasemissionen in kg je GJ Sekundärenergieträger nach Verursachungsart
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Schmitz 2005 und Wuppertal 2005]

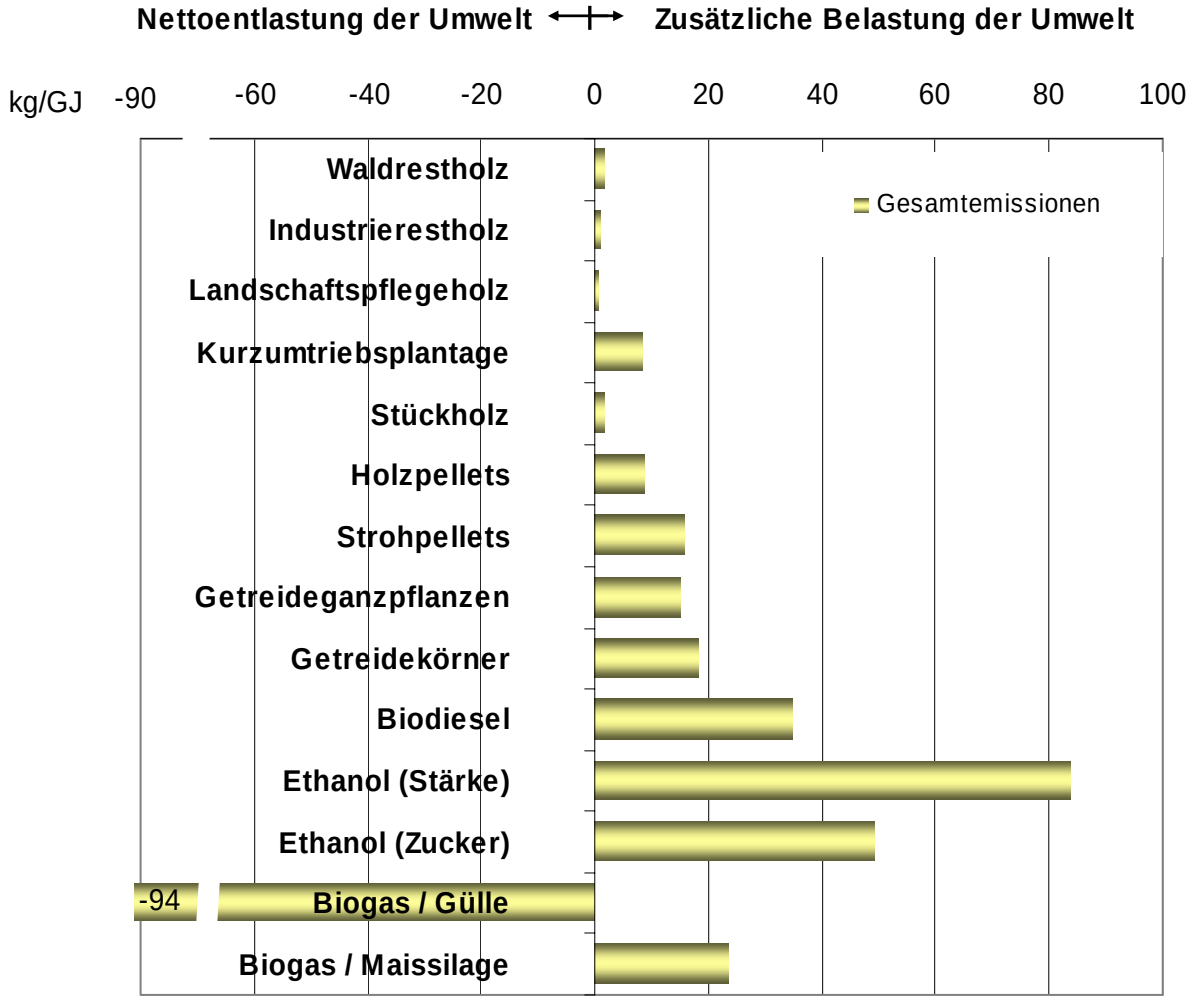


Abb. 5-9: Gesamtbilanz der Klimagasemissionen in kg je GJ Sekundärenergieträger
[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Schmitz 2005 und Wuppertal 2005]

5.4 Biomassenutzung

Die in den vorangehenden Kapiteln dargestellten Bioenergieträger werden vom Verbraucher zur Bereitstellung von Nutzenergie (Wärme, Kraft, Licht) eingesetzt. Dieser letzte Umwandlungsschritt erfolgt in Klein- und Großanlagen und wird im Folgenden für Wärme, Strom und Kraftstoffe untergliedert beschrieben.

5.4.1 Wärmebereitstellung

Wärme umfasst – wie im Kap. 2.3 bereits dargestellt wurde – nahezu 60 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Bioenergieträger können sowohl für die Erzeugung von Raum- als auch von Prozesswärme und Warmwasser eingesetzt werden. In diesem Kapitel werden exemplarisch einige typische Techniken für diese Anwendungsfälle vorgestellt. Die mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mögliche Wärmeversorgung bei gleichzeitiger Stromerzeugung wird im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

Wärmebereitstellung mit Kleinanlagen

Die Erzeugung von Wärme aus fester Biomasse in Hausfeuerungs-Kleinanlagen ist in Deutschland Stand der Technik. Aktuell wird in erster Linie Holz zur Wärmegewinnung eingesetzt. In diesem Anwendungsbereich wurde in den letzten Jahren eine leicht steigende Tendenz beobachtet. Dieser Trend kann bis 2010 fortgeschrieben werden.

Grundsätzlich kann darüber hinaus Biogas zur Wärmeerzeugung in Haushalten eingesetzt werden, sofern die Biogasqualität den Ansprüchen der Feuerungstechnik genügt. Ein direkter Einsatz des Biogases in Kleinanlagen ist aufgrund der räumlichen Gegebenheiten (räumliche Trennung der Biogasanlagen und der Kleinverbraucher) nur in wenigen Ausnahmefällen möglich. Damit Biogas für eine größere Anzahl an Endverbrauchern zur Verfügung stehen kann, muss das Biogas aufbereitet und in das bereits vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich bis **2010** die Technologie der Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz oder in besondere Schwachgasnetze in geringem Umfang etablieren wird. Damit stünde bis 2010 eine weitere Option zur Wärmeerzeugung aus Biomasse in Kleinanlagen zur Verfügung.

Im Folgenden werden vier Kleinanlagen einer Leistungsklasse von ca. 30 kW_{th} – nachfolgend als **Zentralheizungskessel** bezeichnet – dargestellt. Zuerst werden drei Kleinanlagen vorgestellt, welche biogene Festbrennstoffe zur Wärmeerzeugung einsetzen. Anschließend wird als Option für 2010, wenn die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz möglich ist, ein Gas-Brennwertkessel beschrieben.

Grundsätzlich wird beim Einsatz von Zentralheizungskesseln zur Erzeugung von Raumwärme versucht, jegliche direkte Wärmeabgabe an den umgebenden Raum (z. B. Heizkeller) zu vermeiden, da sich der Aufstellort meist nicht in einem zu beheizenden Raum befindet. Folglich sind Zentralheizungskessel mit einem Wasserwärmeübertrager ausgestattet und an einen Heizwasserkreislauf angeschlossen; über diesen wird ein geregelter Wärmetransport zu den Heizflächen der jeweiligen Räume sichergestellt. Die Wärmeabstrahlung von der Geräteoberfläche gilt als Verlust und muss durch entsprechende Verkleidung und Wärmedämmung minimiert werden.

Scheitholzfeuerung (30 kW_{th})

Als Prinzip für handbefeuerte Zentralheizungskessel kommt heute fast ausschließlich der untere Abbrand zum Einsatz (sogenannte Unterbrandfeuerungen, (Abb. 5-10)). In einen Füllschacht wird Holz in Form von Scheiten oder seltener auch als grobes Holzhackgut eingefüllt. Das eingefüllte Holz brennt am unteren Ende ab und rutscht aufgrund des Eigengewichts nach. Eine erneute Auffüllung des Brennstoffraumes erfolgt nach meist vollständigem Abbrand des eingefüllten Brennstoffes. Bei einer üblichen Nennwärmeleistung von 20 bis 40 kW beträgt die typische Einfüllmenge ca. 30 bis 50 kg Brennstoff.

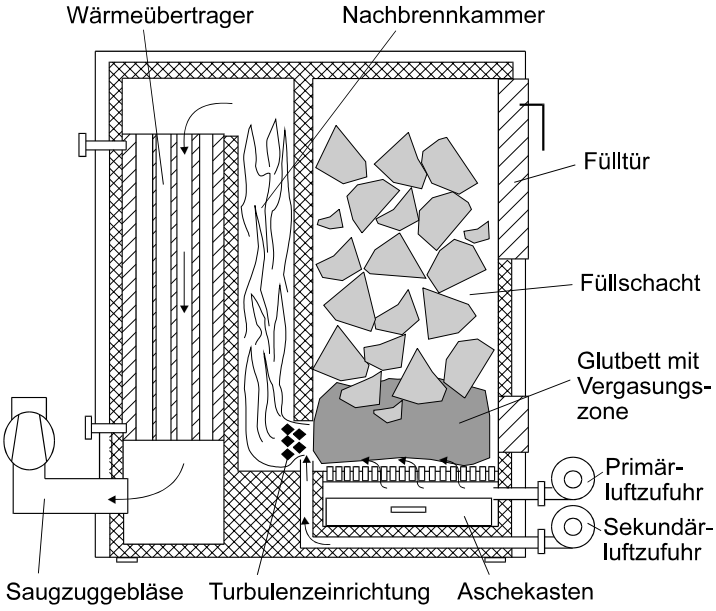


Abb. 5-10: Stückholzkessel
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Hackschnitzelfeuerung (30 kW_{th})

Holzhackschnitzel werden vornehmlich in sog. Unterschubfeuerungen verbrannt (Abb. 5-11). Der Brennstoff wird bei dieser Art Feuerung mit einer Förderschnecke von unten in die Feuermulde eingeschoben. Die Verbrennungsluft wird über Gebläse nach Bedarf zugeführt. Ein Teil wird als Primärluft direkt in die Hauptbrennkammer eingeblasen, ein Teil wird als Sekundärluft vor dem Eintritt in die heiße Nachbrennkammer mit den brennbaren Gasen vermischt. Die heißen ausgebrannten Gase geben im Wärmeübertrager ihre Wärme an den Heizkreislauf ab, werden mechanisch gereinigt und gelangen durch das Kaminsystem in die Atmosphäre.

Diese Feuerungen werden häufig in der Holzindustrie zur thermischen Nutzung von Hackschnitzeln eingesetzt.

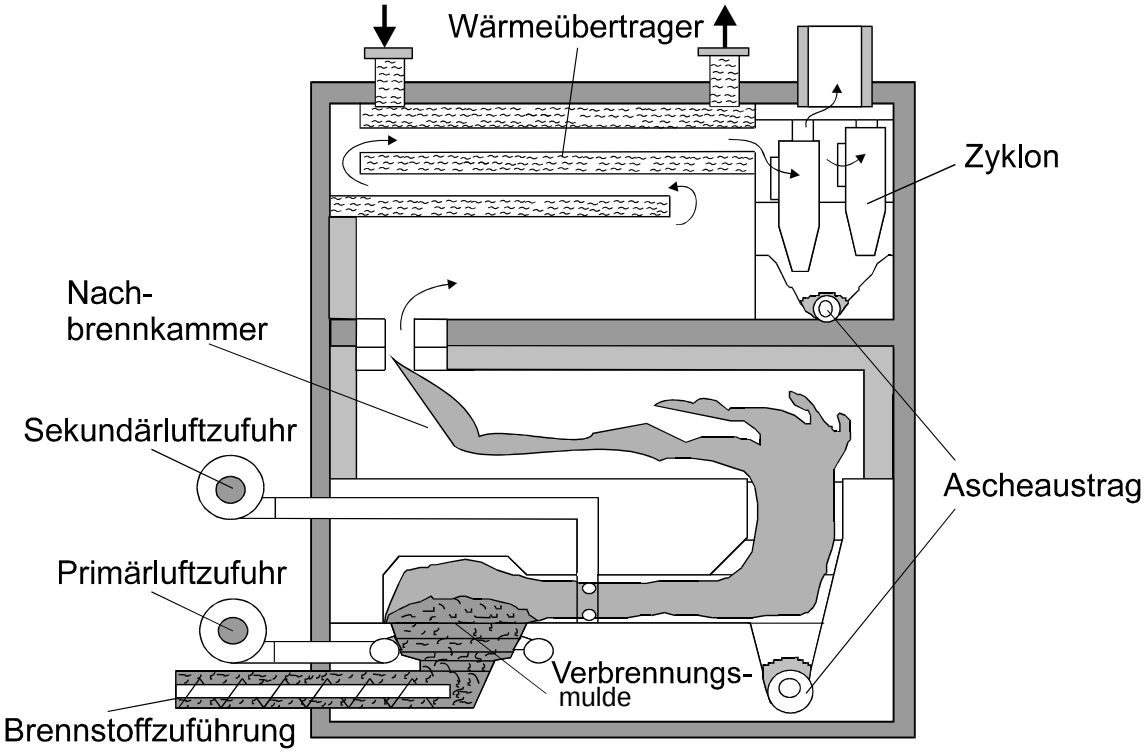


Abb. 5-11: Unterschubfeuerung für Holzhackschnitzel oder auch Pellets
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Pelletfeuerung (30 kW_{th})

Für die energetische Nutzung hochverdichteter Holzpellets können Feuerungen mit Fallschacht eingesetzt werden. Hier fallen die mit einer Förderschnecke zugeführten Pellets über ein Fallrohr oder einen Fallschacht von oben auf das Glutbett. Dieses befindet sich entweder in einer Brennschale (Schalenfeuerung), oder auf einem Kipprost. Dort wird die Luft von unten und seitlich ringförmig durch entsprechende Düsenbohrungen eingeleitet (Abb. 5-12). Bei Kipprostanlagen wird die anfallende Aschemenge von Zeit zu Zeit (z. B. alle 16 Stunden) automatisch in den darunter liegenden Aschesammler abgeworfen.

Neben den genannten Feuerungen mit Abwurfschacht werden für Holzpellets auch Unterschubfeuerungen oder Schrägrostfeuerungen mit Quereinschub verwendet (ab ca. 10 kW Nennwärmeleistung).

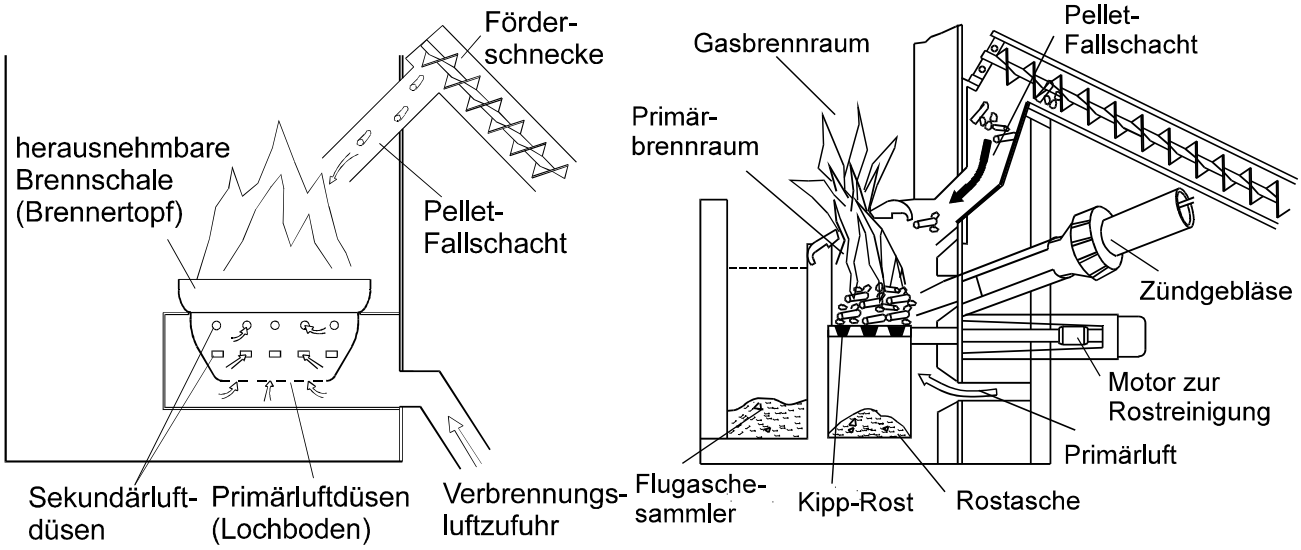


Abb. 5-12: Pelletfeuerung mit Fallschacht
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Zukünftige Entwicklung bei Kleinanlagen

Auf dem Gebiet der Biomasse-Festbrennstoffkessel wird in Zukunft eine Entwicklung von Niedertemperaturtechnik und Brennwerttechnik (ähnlich der Gas- und Ölkessel, s.u.) erwartet. Heute sind in diesem Anwendungsbereich vornehmlich Kon-

stanttemperaturkessel (Vorlauftemperatur konstant bei ca. 85° C) verbreitet. Die technische Entwicklung führt zu höheren Wirkungsgraden der Brennstoffnutzung.

Werden bis 2010 vermehrt Pellets aus Stroh hergestellt, können diese in den oben beschriebenen automatisch beschickten Feuerungen verbrannt werden. Probleme beim Einsatz von Strohpellets könnten der relativ hohe Chlorgehalt im Abgas (Korrosion) und das vergrößerte Ascheaufkommen bereiten.

Werden Getreidekörner als Regelbrennstoff zugelassen, ist ein möglicher Einsatz in pellet-geeigneten Feuerungsanlagen denkbar. Speziell an die Verbrennung von Getreidekörnern angepasste Feuerungen könnten bis 2010 entwickelt werden und vor allem im landwirtschaftlichen Sektor zum Einsatz kommen.

Sollte Biogas (auf Erdgasqualität) aufbereitet und in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden, ist ein problemloser Betrieb eines Gasbrenners mit „Biogas“ möglich. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Technologie bis 2010 etablieren kann. In diesem Fall kommt eine weitere Feuerungstechnik zum Einsatz.

Gasbrenner/-kessel (30 kW_{th})

Zur Raumwärme- und Brauchwarmwasserbereitung mittels Gasbrennern finden heute bei Neuanlagen überwiegend Niedertemperaturkessel (Vorlauftemperatur nach Bedarf gleitend zwischen 35 und 85° C) mit Brennwerttechnik Verwendung (Abb. 5-13). Hierbei kommen Systeme mit und ohne Gebläse (atmosphärische Brenner) zum Einsatz. Neben Erdgas, bezogen aus dem öffentlichen Netz, können Gasbrenner auch mit Stadt- oder Flüssiggas (z. B. Propan) betrieben werden.

Bei der Verbrennung von Erdgas (d.h. hauptsächlich Methan, CH_4) entsteht neben CO_2 und geringen Mengen anderer Emissionen vor allem Wasserdampf. Die beim Verbrennungsvorgang direkt freigesetzte Wärme entspricht dem unteren Heizwert des Erdgases. Bei den kondensierenden Heizkesseln (Brennwerttechnik) wird der Wasserdampf kondensiert und kann so zusätzlich die im Wasserdampf enthaltene (latente) Wärme nutzen. Dadurch kann der Brennwert (= oberer Heizwert) des Erdgases genutzt werden. Bezogen auf den unteren Heizwert sind so Norm-Wirkungsgrade von bis zu 109% erreichbar /Viessmann 2003/. Gasbrenner und Gaskessel werden in den unterschiedlichsten Bauarten angeboten und sind in nahezu allen Größen verfügbar.

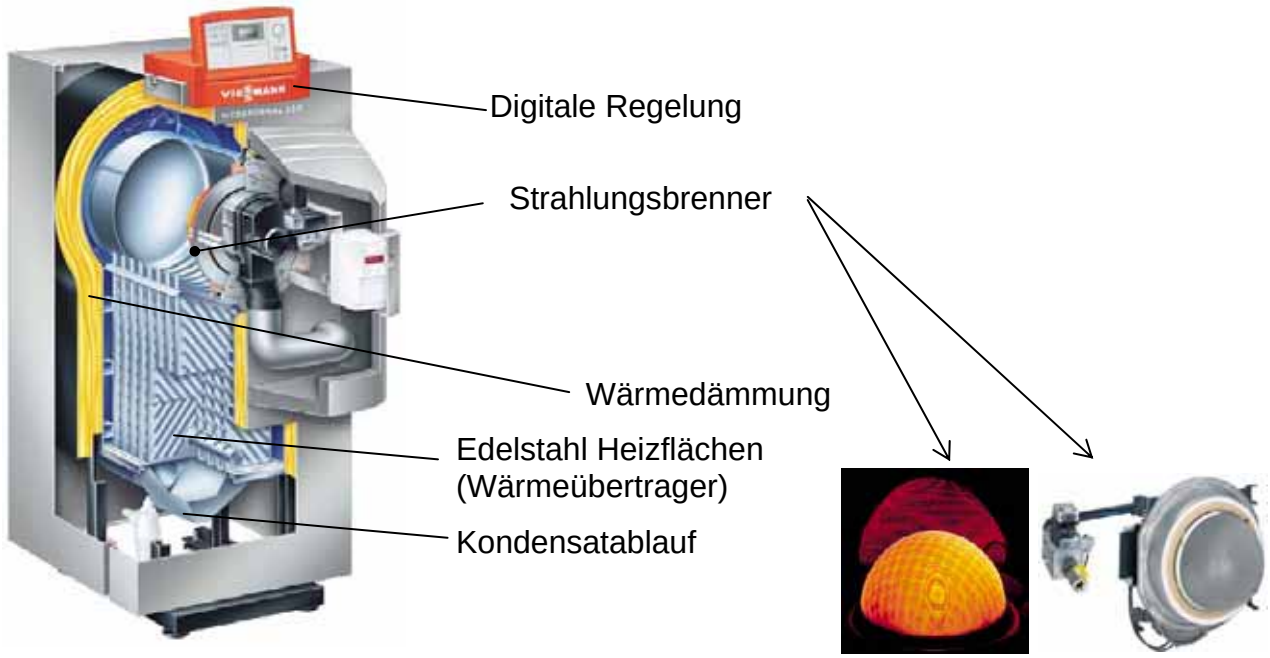


Abb. 5-13: Moderner Brennwert-Gaskessel mit Strahlungsbrenner
Quelle: Viessmann 2004]

Wärmebereitstellung mit Großanlagen, Heizwerken mit Hackschnitzelfeuerung und Spitzenlastkesseln

Im Folgenden wird eine Großanlage zur Wärmeversorgung einer Nahwärmeinsel mit einem **Grundlastkessel auf Basis von Biomasse** und einem **Spitzenlastkessel auf Basis fossiler Energieträger** dargestellt. Neben der Darstellung der Feuerungstechnik wird in einem zweiten Schritt die generelle Auslegung von Grund- und Spitzenlastkesseln vorgestellt.

Im Leistungsbereich um 1 MW_{th} und größer sind Rostfeuerungen die dominierende Technologie zur Verbrennung von Biomasse. Als Brennstoff eignen sich auch problematische feste Biomassefraktionen wie feuchte Holzreste oder aschereiche Rindenabfälle.

Bei einer Vorschubrostfeuerung (Abb. 5-14) wird der Brennstoff auf einem horizontalen oder schräg stehenden Rost verbrannt. Durch Vor- und Rückwärtsbewegungen der einzelnen Rostelemente wandert der Brennstoff auf dem schrägen Rost nach unten. Der Transport des Brennmaterials kann auch durch Vibrationen des Rostes erreicht werden. Am Rostende erfolgt dann eine automatische Entaschung. Der Rost erfüllt die Funktion des Transports sowie des Schürens und Umwälzens des Brennstoffs; dadurch wird eine Homogenisierung des Brennstoffbetts und eine bessere Belüftung erreicht.

Bei vielen Anwendungen dieses Leistungsbereichs empfiehlt es sich, die Biomassefeuerung nicht zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs vorzusehen, sondern damit lediglich die Wärme-Grundlast zu erzeugen. Zur Bereitstellung von Wärmebedarfs-Spitzen dient dann ein mit fossilen Brennstoffen befeuerter Kessel (Spitzenlastkessel).

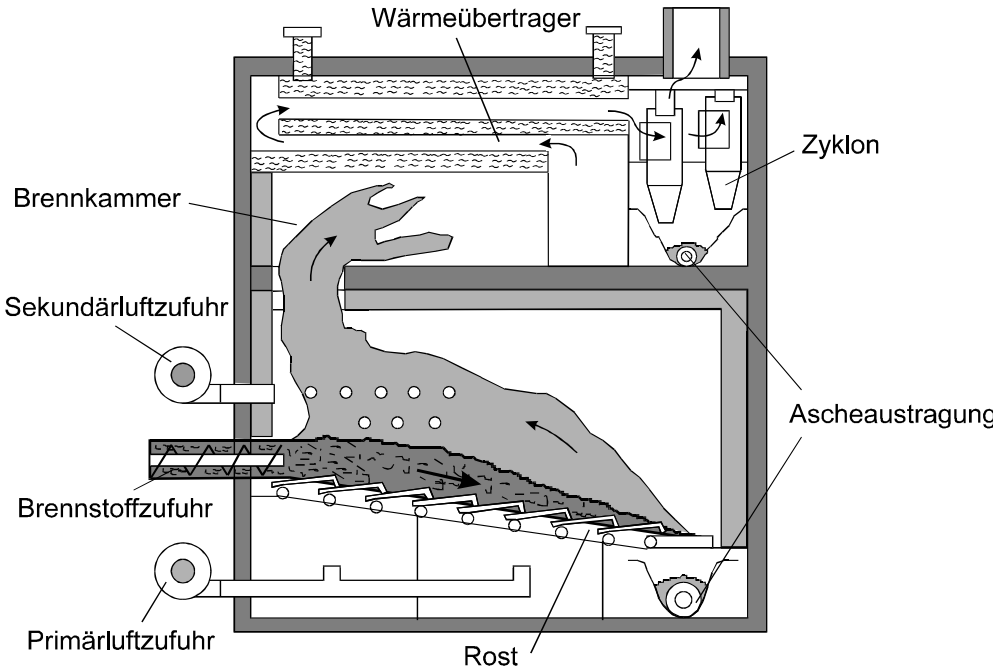


Abb. 5-14: Rostfeuerung
[Quelle: Kaltschmitt und Hartmann 2001]

Zukünftige Entwicklung bei Großanlagen

Die in Abb. 5-14 dargestellte Feuerungsanlage ist auch für die Verbrennung von Stroh oder Getreideganzpflanzen geeignet. Damit auch Ballen verarbeitet werden können, muss das System der Brennstoffzufuhr dafür angepasst werden. Diese Anpassung erfordert neben dem Ballentransport und der automatischen Ballenauflösung auch den dosierbaren Weitertransport der Halmgüter in den Feuerraum. Bei der Verbrennung von Stroh und Halmgütern muss mit einem erhöhten Ascheanfall und korrosiverem Rauchgas gerechnet werden. Es wird angenommen, dass sich bis 2010 die Technologie der Stroh- oder Ganzpflanzenballen-Verbrennung in größeren Heiz(kraft)werken etablieren wird.

Klimagasbilanzen für die Wärmebereitstellung aus Biomasse

Die Klimagasemissionen, die bei einer Wärmebereitstellung aus Biomasse beim aktuellen Stand der Technik entstehen, sind in Abb. 5-15 dargestellt. Die Entwicklung bis 2010 ist in Abb. 5-16 berücksichtigt.

Die Klimagasemissionen der Wärmebereitstellung aus **Kleinanlagen** variieren von 9,5 kg je GJ Wärme bei Industrierestholz-Hackgutfeuerung bis zu 19 kg/GJ bei einer Hackgutfeuerung mit Holz aus Kurzumtriebsplantagen.

Die **Großfeuerungsanlagen** erzeugen zwar je eingesetzter Biomasse geringere Klimagasemissionen als die Kleinanlagen (hauptsächlich aufgrund der deutlich besseren Brennstoffausnutzung), durch den notwendigen Einsatz eines Spitzenlastkessels, der mit Erdgas befeuert wird, entstehen hier aber Zusatzbelastungen. Daraus ergeben sich Klimagasemissionen von 20 kg CO_2/GJ für das Waldrestholzheizwerk bis 26 kg CO_2/GJ für das Hackschnitzelheizwerk mit Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Die Emissionen aus dem Erdgaskessel machen 1/2 bis 2/3 der Gesamtemissionen aus.

Die **Produktion und Aufbereitung der Brennstoffe** hat starke Auswirkungen auf die Gesamtemissionen. Der Emissionsanteil der Bereitstellung des Brennstoffes frei Anlage schwankt zwischen 15 % für Waldrestholzhackschnitzel für Großanlagen und 63 % für Holzpellets mit Kleinfeuerung. Er steigt u. a. mit dem Aufbereitungsgrad des Brennstoffes (z. B. Holzpellets, Hackgut aus Kurzumtriebsplantagen).

Die **direkten Emissionen** aus der Biomasseverbrennung sind in allen untersuchten Anlagen aufgrund der Klimaneutralität der Biomasseverbrennung gering. Die direkten Scheitholzemissionen liegen wegen des geringeren Kesselwirkungsgrades etwas über den Emissionen der übrigen Kleinanlagen. Die direkten Emissionen sinken mit dem Aufbereitungsgrad des Brennstoffes (Scheitholz vs. Holzpellets) bzw. dem Anlagenwirkungsgrad (Kleinfeuerungsanlage vs. Heizwerk).

Emissionen aufgrund des Einsatzes von **Hilfsenergie zum Betrieb der Anlagen** fallen bei allen Varianten in ähnlicher Größenordnung an. Geringere Werte entstehen hauptsächlich durch einen geringeren Automatisierungsgrad der Anlage (Scheitholzkessel) bzw. durch die Großanlagentechnik.

Die **Entsorgung von Reststoffen** ist in Bezug auf die Klimagasemissionen bei der Verbrennung von Biomasse vernachlässigbar.

Die **Emissionen für Bau und Abriss** der Kleinfeuerungsanlagen macht bis zu einem drittel der Gesamtemissionen aus. Bei Großfeuerungsanlagen ist dieser Anteil aufgrund der großen Energiebereitstellung unbedeutend.

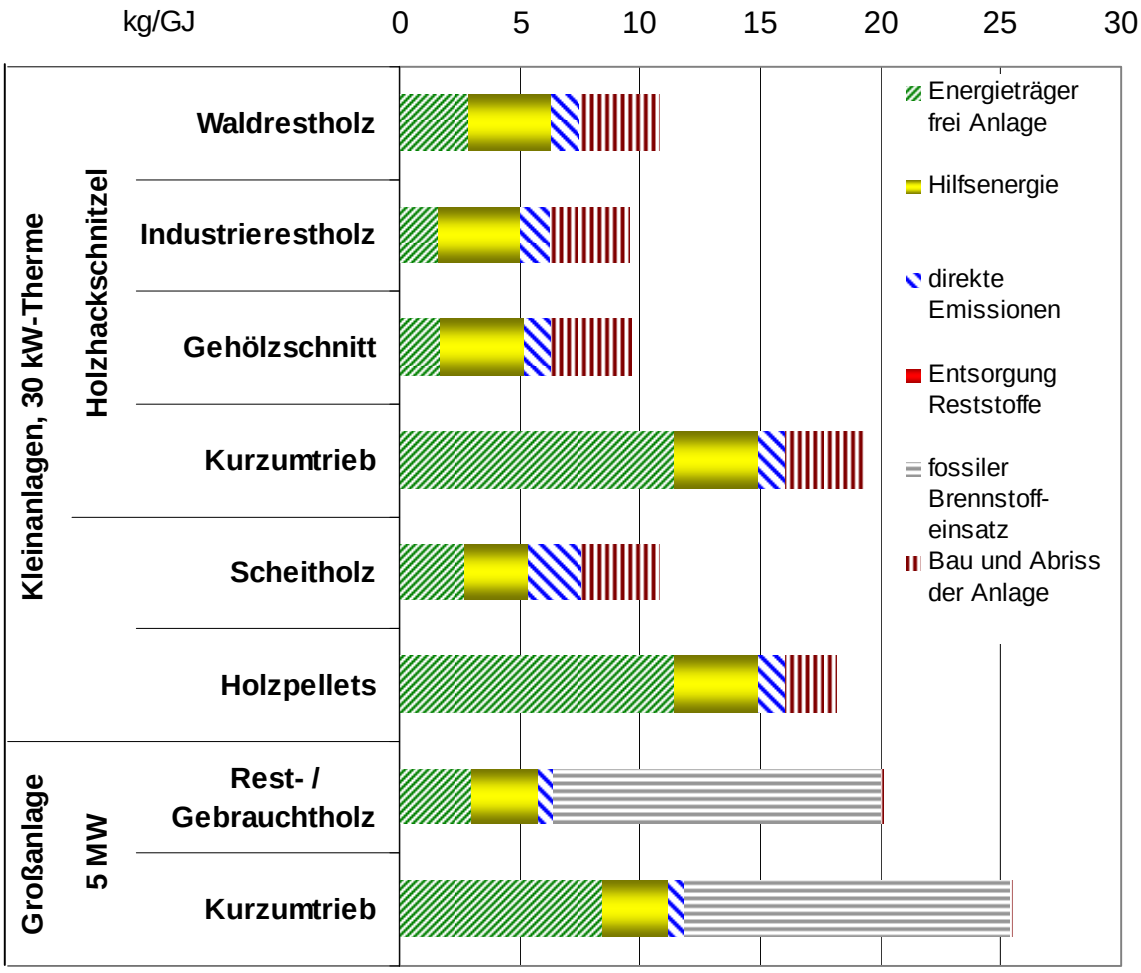


Abb. 5-15: Klimagasemissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse in kg je GJ Wärme (Anlagenstand 2005)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Bis zum Jahr **2010** werden keine erheblichen Verbesserungen innerhalb der bisher eingesetzten Technologien erwartet, daher kommt es auch zu keinen Veränderungen bei den freigesetzten Klimagasen der bereits heute verfügbaren Anlagen (Abb. 5-16). Durch eine technische Weiterentwicklung können bisher noch problematische Brennstoffe wie Stroh und Getreidekörner- und -ganzpflanzen (u. a. korrosives Abgas, Schlackebildungsneigung der Asche) künftig genutzt werden. Zudem besteht die Möglichkeit der Aufbereitung und Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz, wodurch

sich für diesen Energieträger die Möglichkeit bietet, z.B. in Erdgas-Hausfeuerungsanlagen eingesetzt zu werden.

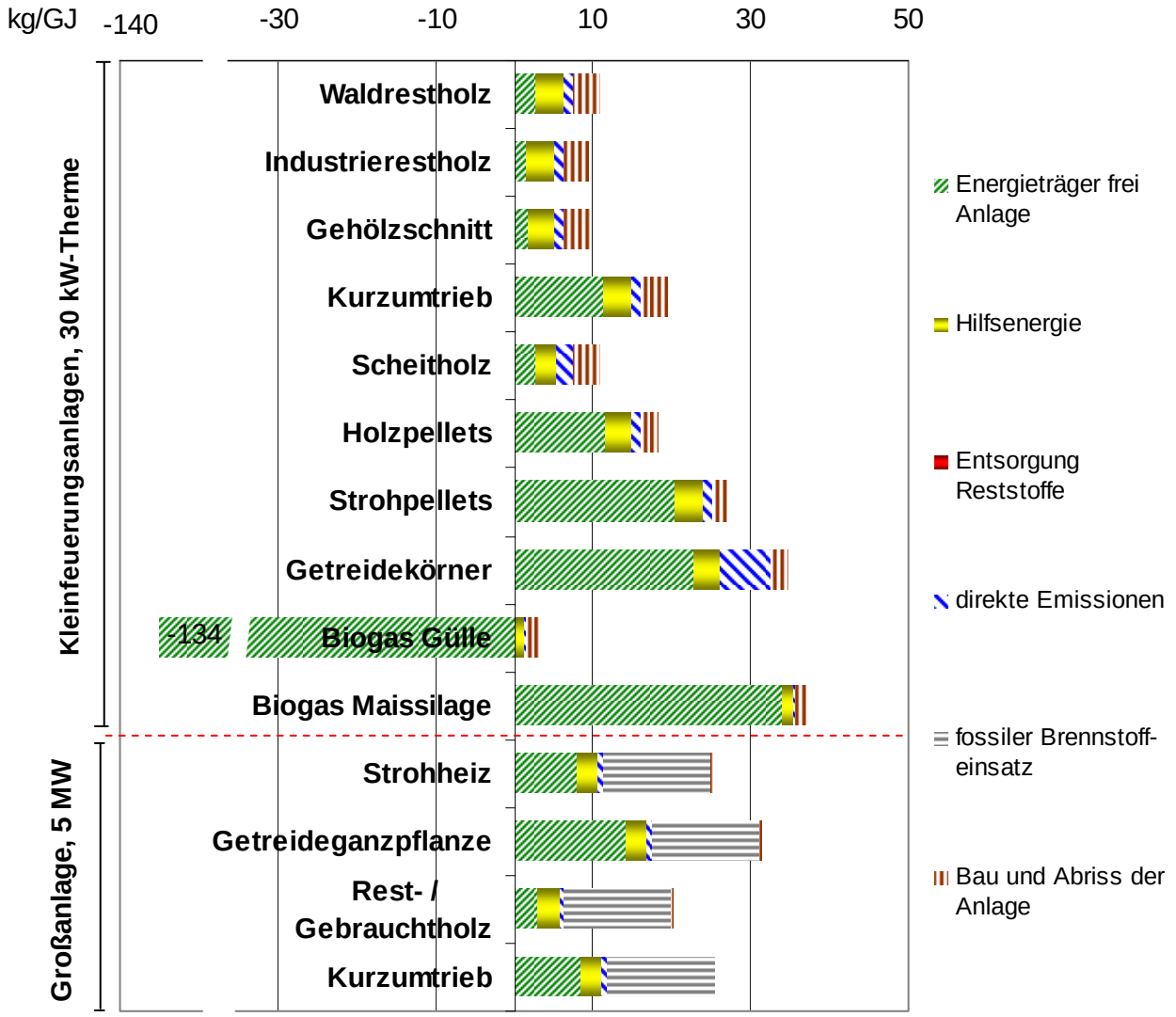


Abb. 5-16: Klimagasemissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse in kg je GJ Wärme (Anlagenstand 2010)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Die künftig möglichen Varianten der Wärmebereitstellung mittels Kleinfeuerungen durch Biogas (sowohl aus landwirtschaftlichen Rückständen als auch aus nachwachsenden Rohstoffen) und Strohpellets sowie durch die großtechnische Verwertung von Getreideganzpflanzen und Stroh bestätigen den Zusammenhang zwischen Klimagasemissionen und Aufbereitungsgrad des Brennstoffes. Besonders deutlich wird dies bei Strohpellets-Kleinfeuerungen.

Bei der Nutzung von Biogas aus landwirtschaftlichen Rückständen in Kleinfeuerungsanlagen ergibt sich aufgrund der vermiedenen Methanemissionen eine Einsparung von 134 kg Klimagasen je GJ. Die größten Klimagasemissionen entstehen dagegen bei der Verwendung von Biogas aus Maisilage in Kleinfeuerungsanlagen. Die Emissionen des Einsatzes von Stroh zur Wärmegewinnung in Heizwerken liegt in der Größenordnung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen.

Die direkten Emissionen sind auch bei den neu hinzugekommenen Energieträgern sehr gering und sinken mit dem Aufbereitungsgrad des Brennstoffes. Die geringsten direkten Emissionen unter den betrachteten Fällen werden durch die Verbrennung von Biogas in Kleinfeuerungen erzielt.

Der Hilfsenergieanteil an den Emissionen bleibt auch bei den künftigen Technologien unverändert niedrig. Der geringste Anteil wird bei der Nutzung eines gasförmigen Brennstoffes, hier dem Biogas, verursacht.

5.4.2 Strombereitstellung

Neben der Wärmeerzeugung ist unter den heute gegebenen technischen und gesetzlichen Randbedingungen der Einsatz fester und gasförmiger Bioenergieträger auch zur Stromerzeugung wirtschaftlich. Im Folgenden wird exemplarisch ein Holzkraftwerk und ein Gasmotor als Blockheizkraftwerk (BHKW) mit Biogas für die Strombereitstellung aus Biomasse dargestellt.

In der Betrachtung wird zwischen einer reinen Stromerzeugung (ggf. Wärmenutzung im Biogasprozess) und einer wärmegeführten Fahrweise mit Strom- und Wärmeproduktion (KWK) unterschieden.

Holzkraftwerk

Ein Kraftwerk zur Stromerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen arbeitet nach dem klassischen Dampfkraftprozess und wird damit durch die Feuerung, die Dampferzeugung, die Turbine, den Generator, den Wasserkreislauf, die Rauchgasreinigung und die regelungstechnischen Einrichtungen bestimmt. Mit Holzkraftwerken im Leistungsbereich von 20 MW_{el} lassen sich momentan Wirkungsgrade von 36,7 % errei-

chen. Dies entspricht dem Bruttowirkungsgrad. Wird der elektrische Eigenbedarf des Kraftwerks abgezogen, so verbleibt ein Nettowirkungsgrad von ca. 32,7 %.

Ein Kraftwerk dieser Größenordnung verbrennt ca. 500 Tonnen Brennstoff am Tag. Da die Dichte der Bioenergieträger vergleichsweise gering ist, müssen relativ große Volumina bewegt werden. Brennstofftransporte mit dem Lkw sind aus diesem Grund nur über Entfernungen von 30 bis 50 Kilometern sinnvoll. Ein Holzkraftwerk verfügt daher neben einem Straßen- und Bahnanschluss idealerweise auch über einen Wasserstraßenanschluss zur preisgünstigen Bereitstellung von Brennstoff aus größeren Entfernungen. Dann kann der überwiegende Teil des Brennstoffumschlags direkt vom Schiff aus erfolgen. Außerdem sollte in Anlagennähe Brennstoff für mehrere Tage zur Vermeidung von Lieferengpässen zwischengelagert werden können.

Zukünftige Entwicklung der Holzkraftwerke

Das dargestellte Beispiel des Holzkraftwerkes weist einen Bruttowirkungsgrad von ca. 37 % auf. Damit wird ein für diese Größenordnung hoher Stromwirkungsgrad erreicht. Diese Technologie ist auf dem gegenwärtigen Stand der Technik und damit bereits weit entwickelt. Aufgrund des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und des nötigen Einzugsgebietes (zur Brennstoffbeschaffung) werden voraussichtlich keine größeren Holzkraftwerke über 20 MW_{el} hinaus gebaut werden. Es kann bis 2010 von einer leicht steigenden Anzahl von Kraftwerken mit geringfügiger Verbesserung der Wirkungsgrade ausgegangen werden.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass bis 2010 auch Kraftwerke gebaut werden, welche vornehmlich Stroh- oder Ganzpflanzenballen als Brennstoff einsetzen. Bei der Verbrennung von Stroh und Halmgütern muss ein erhöhter Ascheanfall und korrosiveres Rauchgas berücksichtigt werden.

Gasmotor (BHKW) zur Biogasnutzung

Gasförmige Brennstoffe, fossiler oder biogener Herkunft, können mit relativ hohen Umwandlungswirkungsgraden in Gasmotoren zur Erzeugung von Elektrizität eingesetzt werden. Neben bis zu ca. 40 % Strom wird auch Abwärme in diesen Aggregaten erzeugt, die entweder abgeleitet werden muss (über Kühlkreisläufe) oder zur Wärmenutzung zu Verfügung steht. Diese gleichzeitige Erzeugung von Kraft (bzw. Strom) und Wärme wird als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet. Ist am jeweiligen Standort keine Wärmenutzung möglich oder vorgesehen, kann ein Gasmotor

(BHKW) zur ausschließlichen Stromerzeugung eingesetzt werden. Der schematische Aufbau eines Biogas-BHKW ist in Abb. 5-17 dargestellt.

Zukünftige Entwicklung bei Gasmotoren (BHKW)

Gasmotoren sind bereits seit einigen Jahren eine etablierte Technologie, welche zu einem hohem Stand der technischen Entwicklungsreife geführt wurden. Daher wird bis 2010 keine nennenswerte Steigerung der Wirkungsgrade erwartet (Wirkungsgrade liegen je nach Modulgröße bei 30 % bis 45 %).

Es wird auch keine große Zunahme der gebauten Anlagen zur reinen Stromproduktion erwartet, da der wirtschaftliche Betrieb eines BHKW von der parallelen Wärme- und Stromnachfrage abhängig ist und außerdem eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung durch das KWK-Gesetz gefördert wird.

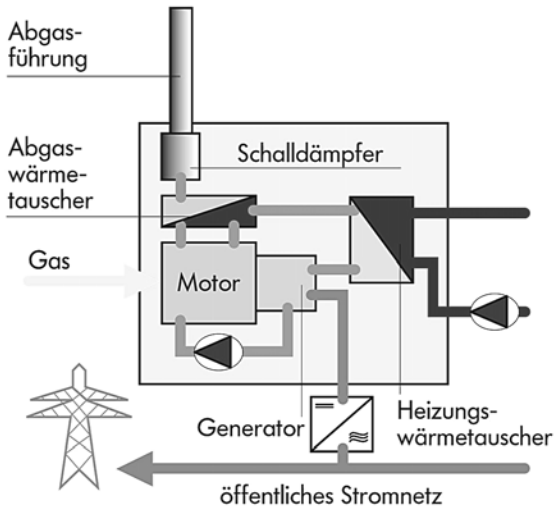


Abb. 5-17: Schematischer Aufbau eines BHKW /ASUE 2001/

Als gasförmiger biogener Brennstoff könnte theoretisch auch das Produktgas einer Biomasse-Vergasungsanlage eingesetzt werden. Die Technologie der Biomasse-Vergasung wird derzeit im Labormaßstab betrieben und weiterentwickelt.

Dabei stellt die Reinigung des Produktgases das Hauptproblem (und auch den Haupt-Kostenfaktor) dar. Sie ist für den sicheren Betrieb des Gasmotors relevant, da größere Teeranteile im Brenngas zu Ablagerungen im Motorblock (erhöhter Verschleiß) oder zum Ausfall des Motor führen können. Es wird eingeschätzt, dass bis 2010 keine dauerhaft anwendbare technische Lösung dieser Problematik entwickelt ist. Aus diesem Grund wird dieser mögliche Nutzungspfad in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Biomassenutzung mit Kraft-Wärme-Kopplung

Der Einsatz von Energieträgern in Motoren oder Turbinen zur Stromerzeugung mittels Generatoren bringt eine große Menge an Abwärme mit sich, die in den meisten

Fällen ungenutzt verloren geht. Diese Abwärme könnte größtenteils auch zur Wärmeversorgung genutzt werden, indem sie in Nah- oder Fernwärmenetze eingespeist wird. In diesem Fall wird von Kraft-Wärme-Kopplung gesprochen, da sowohl Strom als auch Wärme durch ein Heizkraftwerk bereitgestellt werden. Ob und wie viel Wärme am Standort des Heizkraftwerkes genutzt werden kann, hängt in erster Linie davon ab, ob am Standort des Heizkraftwerkes oder in seinem Umfeld eine ausreichende Nachfrage nach Wärme besteht. So kann die anfallende Wärme eines Biogas-BHKW, das dezentral am Standort einer Biogasanlage betrieben wird, in der Regel nicht genutzt werden, da sich kein Abnehmer für anfallende Wärmemenge findet (die den Bedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes weit übersteigt). Je größer die anfallende nutzbare Wärmemenge eines Kraftwerkes ist, desto größer sind auch die Ansprüche an die Infrastruktur, da die Wärme zum Verbraucher transportiert werden muss. So ist die Wärmemenge eines größeren Kraftwerks über größere Distanzen aufwändiger zu verteilen als die Abwärme eines kleinen BHKW. Ein Standort ist besonders gut für ein Heizkraftwerk geeignet, wenn bereits Fern- oder Nahwärmenetze vorhanden sind, auf das zurückgegriffen werden kann.

Zukünftige Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung

Es wird eine Zunahme der Anzahl gebauter BHKW-Module (für gasförmige Brennstoffe) und Heizkraftwerke (für biogene Festbrennstoffe) an Standorten erwartet, an denen neben Strom auch Wärme in einem günstigen Mengenverhältnis nachgefragt wird, da diese gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung außerdem durch das KWK-Gesetz gefördert wird /Prognos 2004/. Für die KWK-Nutzung auf Basis von Biogas bietet der Standort in ländlichen Regionen in der Regel aber nur geringe Absatzmöglichkeiten für die anfallende Wärme. Perspektivisch ließe sich dieses Potenzial durch die Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz (nach entsprechender Biogasaufbereitung) und KWK-Nutzung an verbrauchernahen Standorten deutlich ausweiten.

Klimagasbilanzen für die Strombereitstellung aus Biomasse

In Abb. 5-18 und Abb. 5-19 sind die mit der Strombereitstellung aus Biomasse verbundenen Emissionen dargestellt. Berücksichtigt sind dabei sowohl der aktuelle Stand der Technik im Jahr 2005 sowie die Entwicklung bis 2010.

Im Fall der Kraft-Wärmkopplung wurde für die Heizkraftwerke (Holzfeuerung) angenommen, dass je kWh Strom die gleiche Energetische Menge (3,6 MJ) an Wärme

ausgekoppelt und genutzt werden kann. Da bei einem Biogas-BHKW am Standort der Biogasanlage die anfallende Wärme meist nur Teilweise genutzt werden kann, wird hier von einer Auskopplung von 10 % der anfallenden nutzbaren Wärme ausgegangen. Die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz hat das Ziel, die Nutzung des Biogases an zentraler Stelle in größeren Aggregaten mit höheren Wirkungsgraden und einer erhöhten Wärmenutzung zu ermöglichen. Für die Stromproduktion im KWK-Betrieb 2010 wird daher ebenso wie bei Holz-Heizkraftwerken von einer Wärmenutzung in Höhe der Stromproduktion (3,6 MJ Wärme je kWh Strom) ausgegangen.

Die Klimagasemissionen für die Bereitstellung von Strom schwanken je nach Brennstoff und Technologie zwischen 71 und 263 kg Klimagasen je MWh (Abb. 5-18). Eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung führt zu einer Verringerung der Emissionen um etwa 20 bis 50 % gegenüber einer ausschließlichen Stromerzeugung. Die Reduzierung erklärt sich durch die bessere Brennstoffausnutzung bei einer zusätzliche Wärmenutzung. Die geringsten Emissionen entstehen durch die KWK-Stromerzeugung in einem Holzkraftwerk mit den Brennstoffen aus Rest- und Gebrauchtholz. Die größten Belastungen werden aktuell durch den Einsatz von Biogas aus Maissilage in einem BHKW zur reinen Stromerzeugung hervorgerufen.

Da ein sehr großer Teil der Gesamtemissionen auf die **Bereitstellung des Energieträgers frei Anlage** entfällt (bei Holz aus Kurzumtriebsplantagen sind dies bis zu 78 % der Gesamtemissionen und bei der Biogasbereitstellung sogar bis zu 95 %), ist der Herstellungsaufwand bzw. Aufbereitungsgrad des Brennstoffes ein entscheidender Faktor für die Höhe der Klimagasemissionen. Da die Sammlung und Aufbereitung von Restholz deutlich weniger aufwendig ist als der Anbau und die Ernte von Holz in Kurzumtriebsplantagen, ist auch der Einsatz von Rest- oder Gebrauchtholz in Heizkraftwerken am umweltfreundlichsten.

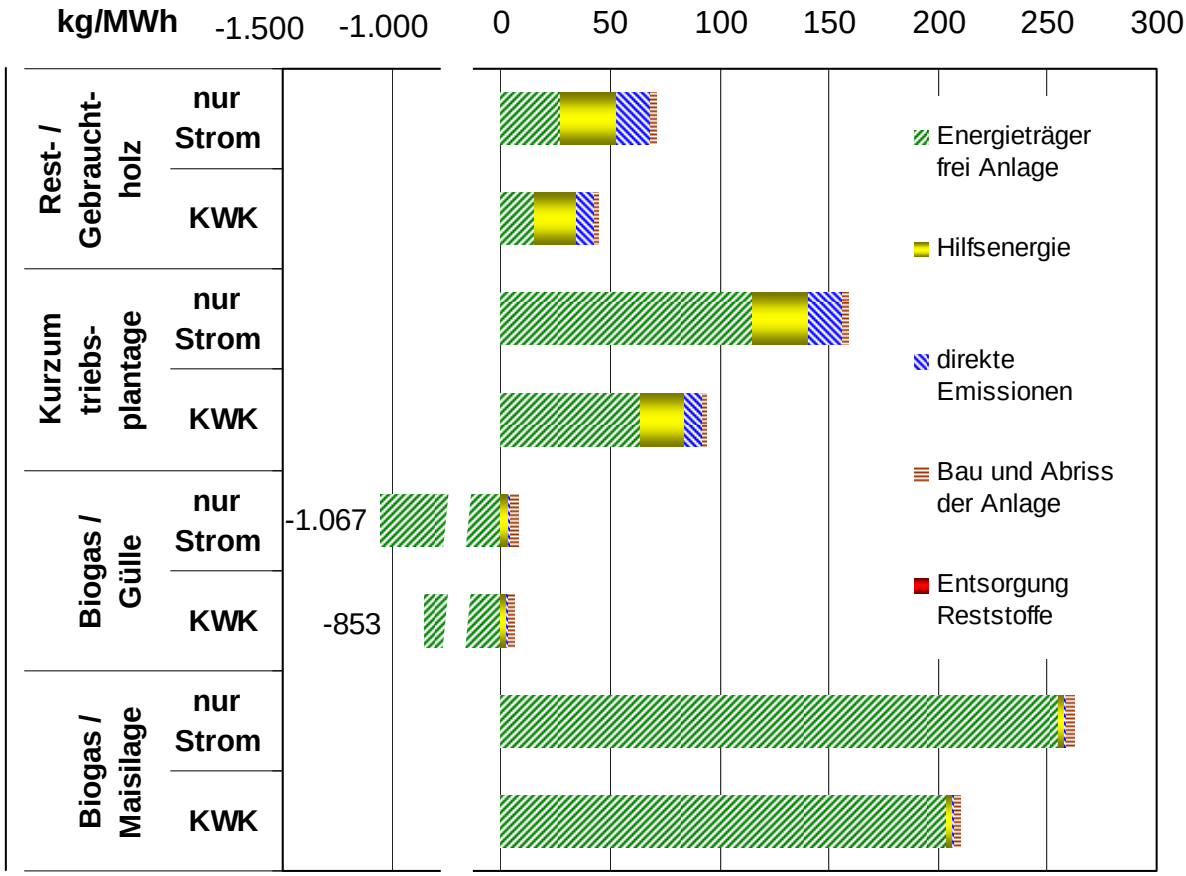


Abb. 5-18: Klimagasemissionen der Strombereitstellung in kg je MWh Strom (Anlagenstand 2005)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Emissionen aufgrund des **Hilfsenergieeinsatzes** verursachen nur bei Festbrennstoffen einen nennenswerten Anteil an den Gesamtemissionen (zwischen 20 und 26 kg/MWh). Für die Gasnutzung in einem BHKW ist ein deutlich geringerer Hilfsenergieaufwand als in einem Holzkraftwerk notwendig, so dass sich für die Biogasnutzung Klimagasemissionen in Höhe von 2,5 bis 3 kg je MWh ergeben.

Die **direkten Emissionen** sind wie bereits bei der reinen Wärmeerzeugung aus Biomasse relativ gering. Aufgrund der besseren Brennstoffeigenschaften sind diese bei einer Biogasnutzung mit einem Anteil von 0,4 % an den Gesamtemissionen besonders gering, bei der Holznutzung sind sie mit einem Anteil von 10 % deutlich höher.

Der **Bau und Abriss** verursacht Klimagasemissionen zwischen 1,6 bis 3 kg/MWh (bis zu 4 % der Gesamtemissionen) und hat somit für die Gesamtemissionen keine nennenswerte Bedeutung.

Die **Entsorgung der Reststoffe** aus der Biomassenutzung ist vernachlässigbar klein.

Die Aussagen für die gegenwärtig verfügbaren Technologien lassen sich auch auf die im Jahr **2010** nutzbaren Technologien zur Strom- bzw. Strom- und Wärmebereitstellung aus Biomasse übertragen (Abb. 5-19). Durch die neuen Technologien zur Nutzung von Stroh bzw. Getreideganzpflanzen sowie mögliche Biogaseinspeisungen verändert sich allerdings die Höhe der maximalen und minimalen Klimagasemissionen.

Die Variante eines **mit Ganzpflanzen gefeuertem Kraftwerkes** verursacht ca. 236 kg Klimagase je MWh Strom (bzw. in gekoppelter Erzeugung immerhin noch 136 kg/MWh).

Durch die Nutzung von **Biogas aus landwirtschaftlichen Rückständen** werden im Fall der ausschließlichen Stromproduktion ca. 1.000 kg Klimagasemissionen eingespart (gegenüber der konventionellen Gülleverwertung als Dünger). Der eingesparte Betrag durch KWK-Nutzung ist etwas geringer, da ein Teil der eingesparten Emissionen auch der entstandenen Wärme gutgeschrieben wird. Eine zentrale KWK-Nutzung von aufbereitetem und eingespeisten Biogas ist mit geringeren Klimagasemissionen verbunden, als eine ausschließlich dezentrale Stromerzeugung an der Biogasanlage, da größere Aggregate mit besseren Wirkungsgraden eingesetzt und außerdem mehr Wärme genutzt werden kann. Aufgrund der aufwendigen Aufbereitung (z.B. Reinigung, Verdichtung) zu Erdgasqualität verringern sich die Einsparungseffekte aber etwas.

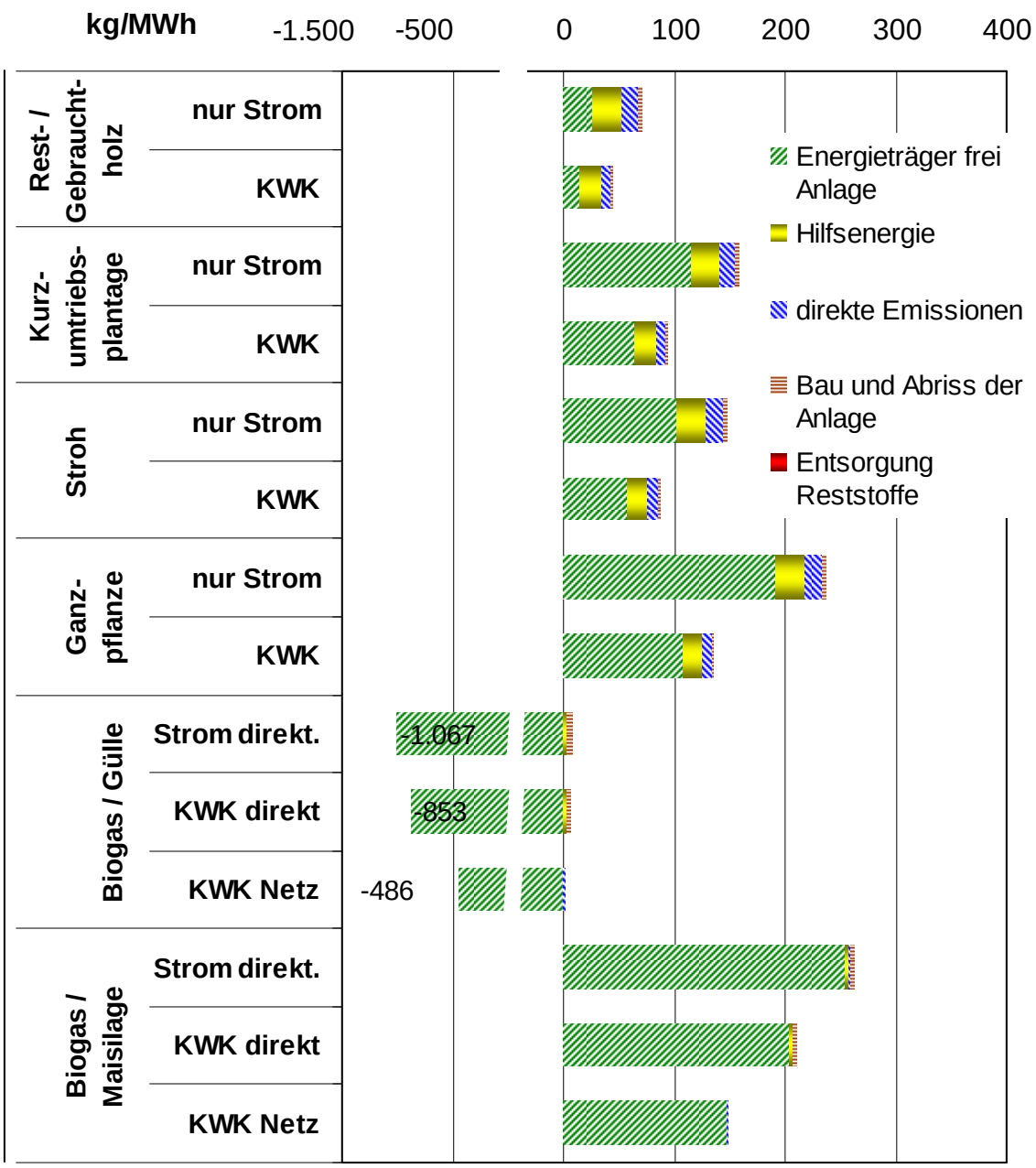


Abb. 5-19: Klimagasemissionen der Strombereitstellung in kg je MWh Strom (Anlagenstand 2010)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Bedeutende **direkte Emissionen** treten nur bei der Nutzung fester Biomasse auf. Dort schwanken die Beiträge von etwa 15 (für Stromerzeugung) bis 8 kg/MWh (für gekoppelte Stromerzeugung). Die Nutzung gasförmiger Biomasse (Biogas) verur-

sacht etwa 20 mal weniger direkte Klimagasemissionen. Bei diesen Energieträgern sind somit die direkten Emissionen unbedeutend.

Die Emissionen aus dem Bezug von **Hilfsenergie** sind, wie bereits zuvor festgestellt, in einer ähnlichen Größenordnung und abhängig von der Brennstoffart. Der Bau und Abriss sowie die Entsorgung der Reststoffe verursacht bei allen Varianten zwischen 0,8 und 4 % der Emissionen, wiederum in Abhängigkeit von der Art des Brennstoffes.

Die **Entsorgung** von Asche aus der Strohverbrennung verursacht etwa 10 mal mehr Emissionen als bei übrigen Festbrennstoffen. Aufgrund des sehr geringen Anteils an den Gesamtemissionen (ca. 0,2 %) ist dieser Betrag aber dennoch vernachlässigbar.

5.4.3 Kraftstoffbereitstellung

In Mitteleuropa können im Verkehrsektor biogene Kraftstoffe u. a. auf Pflanzenöl- und auf Alkoholbasis zum Einsatz kommen. Für Kraftstoffe auf Pflanzenölbasis sind Raps und Sonnenblumen mögliche Rohstoffe. Pflanzenöle können direkt in eigens angepassten Motoren genutzt werden, stärkere Verbreitung findet aber PME/RME (Pflanzenölmethylester/Rapsölmethylester, umgangssprachlich Biodiesel), das ein an die Eigenschaften von Diesel angepasster biogener Kraftstoff ist. RME kann auf zwei unterschiedlichen Arten genutzt werden. Einerseits sind dessen Eigenschaften fossilem Dieselkraftstoff so ähnlich, dass Biodiesel in Reinform eingesetzt wird, andererseits ist eine Zumischung von Biodiesel zu herkömmlichem Diesel möglich.

Alkohol biogenen Ursprungs (Bioethanol) kann dem Benzin beigemischt werden. Bei einem Anteil von 5 bis 15 % Ethanol (evtl. auch mehr) werden die Eigenschaften nicht wesentlich (negativ) beeinflusst. Dieses Verfahren wird z. B. in den USA praktiziert. Neben diesen Verfahren, welche technisch ausgereift sind und in unterschiedlichem Umfang in Deutschland angewandt werden, befinden sich weitere Verfahren zur Kraftstoffbereitstellung in der Entwicklung.

Biomasse kann vergast und anschließend mittels Synthese zu einem Kraftstoff verarbeitet werden, der fossilem Dieselkraftstoff so stark ähnelt, dass die vorhandenen Motoren nicht verändert werden müssen.

Außerdem ist die Nutzung von Biogas wie Erdgas in Kraftfahrzeugen möglich. Soll das Biogas nicht nur direkt am Anlagenstandort der Biogasanlage zur Verfügung stehen, muss es entweder in einem gesonderten Leitungsnetz verteilt werden (Beispiel:

Schwachgasnetz Zürich) oder aber zu erdgasähnlicher Qualität aufgearbeitet und über das vorhandene Erdgasnetz verteilt werden. Zur Betankung der Fahrzeuge mit einem gasförmigen Kraftstoff sind entsprechende Techniken notwendig und in Form von Erdgastankstellen bereits vorhanden. Damit die Fahrzeuge eine akzeptable Reichweite erhalten, muss das Biogas in den Tankstellen und im Tank auf rund 200 bar komprimiert werden.

Zukünftige Entwicklung der Kraftstoffe

Die Erzeugung von Biodiesel und Ethanol sind technisch ausgereifte Prozesse. Der Absatz von Biodiesel hat sich in den letzten Jahren stark vermehrt, ein weiter steigender Absatz bis 2010 wird angenommen. Die Produktionskapazitäten von Biodiesel und auch -ethanol wurden 2005 stark vergrößert. Es ist daher auch für die Beimischung von Ethanol (ETBE) zu Benzin von einem steigenden Absatz bis 2010 auszugehen. Die angenommenen Absatzsteigerungen der biogenen Kraftstoffe beruhen auf einer EU-Direktive, welche einen Anteil dieser Kraftstoffe von 5,75 % am gesamten Kraftstoffeinsatz bis 2010 fordert /EU 1998/. Diese, von der EU geforderten, aber nicht rechtlich bindenden Absatzzahlen für Biokraftstoffe, werden in Deutschland voraussichtlich schon im Jahr 2006 oder 2007 erreicht, was nicht zuletzt auf die Steuerbefreiung für Biokraftstoffe durch die Bundesregierung zurückzuführen ist (vgl. weiter unten: Kraftstoffstrategie der Bundesregierung).

Synthetische Kraftstoffe (aus Biomassevergasung/Pyrolyse) und Biogas wurden bisher nur für Demonstrations- und Forschungszwecke eingesetzt. Bis 2010 wird daher von keinem nennenswerten Absatz ausgegangen. Diese für den Kraftstoffsektor möglichen Technologien werden daher in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Bundesregierung verfolgt mit ihrer **Kraftstoffstrategie** das Ziel

- den Verbrauch fossiler Kraftstoffe zu senken und damit die Abhängigkeit vom Öl zu verringern (Versorgungssicherheit),
- den Ausstoß von Treibhausgasen aus dem Verkehrbereich zu vermindern (Klimaschutz),
- die aussichtsreichsten alternativen Kraftstoffe und Antriebe, die auch ein hohes Mengenpotenzial aufweisen, zu identifizieren (Innovation und Wirtschaftlichkeit) und

- den Handlungsbedarf für die wirtschaftlich aussichtsreichen Alternativen ermitteln und in einem Maßnahmenprogramm zusammenfassen (Umsetzung).

Die Bundesregierung ist der Auffassung, dass wegen der langfristigen wirtschaftlichen, verkehrlichen und ökologischen Auswirkungen dringend eine Erfolg versprechende Strategie für den Einsatz von wettbewerbsfähigen alternativen Kraftstoffen notwendig ist. Vor allem soll das innovative Potenzial dieser Technologien für Wachstum und Beschäftigung genutzt werden. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur umweltfreundlichen Mobilität und nachhaltigen Entwicklung des Landes geleistet /Fortschrittsbericht 2004/.

Klimagasbilanzen für Kraftstoffe aus Biomasse

Die Nutzung der Biokraftstoffe erfolgt zurzeit hauptsächlich bei Biodiesel (abgesehen von Pflanzenöl, welches relativ geringe Absatzzahlen aufweißt) in seiner Reinform ohne Zugabe eines fossilen Kraftstoffs. Ethanol wird in Deutschland gegenwärtig nicht als reiner Kraftstoff eingesetzt. Der Einsatz erfolgt durch Zumischung zu fossilem Kraftstoff (siehe hierzu Kap. 6.3, hauptsächlich in Form von ETBE). Die Darstellung der klimawirksamen Emissionen des Ethanols wird daher im Zusammenhang mit dem fossilen Kraftstoffsystem vorgenommen und ist in Kap. 7.3 beschrieben und dargestellt.

6 Klimagasemissionen beim Einsatz substituierbarer fossiler Energieträger

Wie bereits in Kapitel 2 zum „Energiesystem Deutschland“ dargestellt wurde, basiert unsere Energieversorgung zurzeit zu über 90 % auf fossilen Energieträgern. Zur Gewährleistung einer ausreichenden und sicheren Versorgung ist dafür ein umfangreiches technisches System von der großräumigen Verteilung (z.B. Erdgaspipelines, Stromhochspannungsnetz, Tankstellennetz) bis hin zum einzelnen Heizkessel in einem Wohngebäude installiert. An diese etablierten Energiesysteme haben wir uns gewöhnt und sie auch schätzen gelernt, da wir zu jeder Zeit mit der gewünschten Energie in Form von Licht mittels Strom oder Wärme zum Beispiel mittels Erdgas versorgt werden.

Entsprechend den lokalen Gegebenheiten hat sich zudem eine spezifische Infrastruktur der Energieversorgung mit folgender Ausrichtung herausgebildet:

- Die **Wärmeversorgung** in dicht bebauten Gebieten wie zum Beispiel den Innenstädten erfolgt hauptsächlich mit Erdgas und in vielen größeren Städten auch mit Fernwärme. Der Heizöl- und Kohleeinsatz ist hier nur unbedeutend.
  Mit abnehmender Bebauungsdichte zum Stadtrand und bis in die ländlichen Regionen hinein nimmt der Heizöleinsatz zu. Obwohl das Erdgasnetz auch in dünner besiedelten Bereichen weit verbreitet ist, nimmt hier die Bedeutung der nicht leitungsgebundnen Energieversorgung auf Basis leicht transportierbarer Energieträger wie Heizöl zu.
- Die **Stromversorgung** in Deutschland wird über ein weit verzweigtes Verteilnetz (1,7 Mio. km) gewährleistet und basiert zu etwa 80 % auf der Erzeugung in Großkraftwerken. Daneben wird vor allem in großen Städten und bei einzelnen in der Regel großen Energieverbrauchern Strom und Wärme gemeinsam in **Kraft-Wärme-Kopplung** erzeugt. Hierfür werden vorrangig Erdgas und Kohle eingesetzt.
- Die **Kraftstoffversorgung** wird über ein weit verzweigtes Tankstellennetz gesichert (über 15.000 Tankstellen), welche von ca. 20 Raffinerien mit den entsprechenden Kraftstoffsorten beliefert werden. Darüber hinaus werden ca. 50% des in Deutschland eingesetzten Dieselkraftstoffes direkt an Endkunden (Spediteure, Bauunternehmen, etc.) geliefert.

Wie im Kapitel zuvor dargestellt wurde, existieren für die Nutzung von Biomasse heute moderne Anwendungstechniken, die – wie zum Beispiel bei Gas- und Ölheizungen – eine bequeme und sichere Energieversorgung ermöglichen. Der Wechsel von

einer Gas- oder Ölheizung zu einer Heizung mit einem biogenen Energieträger bedeutet also nicht etwa, dass beispielsweise wieder mühsam Holz gehackt und regelmäßig per Hand der Heizkessel gefüllt werden muss. Die dynamische Entwicklung der Zentralheizungen mit dem Einsatz von Holzpellets von 3.200 Anlagen im Jahr 2000 auf fast 26.000 Anlagen im Jahr 2004 zeigt die große Akzeptanz dieser Technik beim Verbraucher.

Welche Möglichkeiten bestehen nun für biogene Energieträger, im Wärme-, Strom- und Kraftstoffmarkt fossile Energien zu substituieren? Nachfolgend werden hierzu die Hauptrichtungen einer möglichen Substitutionsentwicklung dargestellt.

6.1 Wärmebereitstellung

Die weitere Verbreitung von **Kleinanlagen** zur Nutzung von Biomasse kann im Prinzip in allen Verbrauchssektoren erfolgen. Die Ausgangsbedingungen für die Nutzung von Biomasse sind allerdings aufgrund der vorhandenen Energieinfrastruktur, der spezifischen Anforderungen der Biomasseanlagen und der Sichtweisen der verschiedenen Marktteilnehmer sehr unterschiedlich zu bewerten.

- In **städtischen Kerngebieten** ermöglichen die räumlichen Verhältnisse in der Regel nicht die Bereitstellung von Lagerflächen für die zur Wärmeerzeugung benötigten Biomasse (z.B. Holzpellets). Hier wird allenfalls punktuell eine direkte Biomassenutzung vor Ort erfolgen können. Perspektivisch mit einem Zeithorizont um 2010 wäre allerdings denkbar, dass Biogas außerhalb der Stadt in das Gasnetz eingespeist wird und so auch in verdichteten Baugebieten indirekt zum Einsatz kommen könnte. Für diesen Teil des Wärmemarktes wird aber zurzeit kein Subsituationspotenzial gesehen.
- Für **Mehrfamilienhäuser** in weniger dicht besiedelten Siedlungsgebieten kommen Anlagen zur Biomassenutzung in Betracht. Hier besitzen technische oder räumliche Hemmnisse nur eine untergeordnete Rolle. Allerdings stellen aus Sicht der Vermieter die höheren Investitionen in eine Heizanlage für Biomasse in der Regel einen entscheidenden Ablehnungsgrund dar. Dieser Teil des Wärmemarktes wird sich voraussichtlich erst bei deutlich höheren Energiekosten für fossile Energieträger und günstigeren Anlagenkosten für Biomasse entwickeln lassen.

- Von den knapp 38 Mio. Wohnungen in Deutschland befinden sich 17,4 Mio. Wohnungen (45 %) in **Ein- und Zweifamilienhäusern**. Das hohe Eigeninteresse der Eigentümer an ihrer Energieversorgung und das auf diesen Markt abgestimmte Anlagenangebot zur Biomassenutzung begünstigt vor allem die Nutzung von Holzpellets in Zentralheizungsanlagen in diesem Marktsegment. Aufgrund der spezifischen Versorgungssituation mit in der Regel ausreichenden Platzverhältnissen für die Biomasselagerung und bei einem gleichzeitig höheren Ölanteil für die Wärmeerzeugung ist dies für die nächsten Jahre der interessanteste Markt für Biomasseanlagen beim Endverbraucher.
- Die Marktentwicklung für Biomasse in der **Industrie** sowie im **GHD-Sektor**[14] war in der Vergangenheit vor allem durch die Verwendung anfallender Reststoffe (z.B. Holzabfälle in der holzverarbeitenden Industrie) geprägt. In diesem Marktsegment sind nicht ökologische Aspekte der entscheidende Auslöser für die Nutzung von Biomasse, sondern die wirtschaftlichen Aspekte stehen im Vordergrund. In diesem Marktsegment hängt die weitere Biomassenutzung über das bisherige Maß hinaus somit vor allem vom zusätzlichen Anfall preisgünstiger Biomasse ab. Hier ist mit Blickrichtung auf das Jahr 2010 nur ein verhaltenes Marktwachstum zu erwarten.

Für den vorzunehmenden Vergleich der Klimagasemissionen eignet sich aus dem **Segment der Kleinanlagen** somit vor allem ein Ein-/Zweifamilienhaus mit einer Gas- oder Ölheizung sowie die Wärmeversorgung durch Fernwärme. Für den typischen Vergleichsfall des Ein-/Zweifamilienhauses wird ein Energiemix von je 50 % Gas und Heizöl mit dem Kesselwirkungsgrad einer Neuanlage von jeweils 102 % (Brennwertkessel) gewählt. Es wird somit davon ausgegangen, dass der Substitutionseffekt durch Biomasseanlagen zum Zeitpunkt einer ohnehin anstehenden Anlagenerneuerung entsteht und eine Neuanlage und keine Altanlage mit schlechteren Emissionswerten verdrängt würde. Nennenswerte technische Entwicklungsschübe sind bei neuen Heizkesseln bis 2010 nicht zu erwarten.

Neben dem Einsatz von Kleinanlagen kann Wärme auch an zentraler Stelle durch eigens errichtete **Heizwerke** bereitgestellt und mittels eines Fernwärmenetzes zum Verbraucher transportiert werden. Anders als bei Kleinanlagen kommen hier vor allem Wärmeabnehmer in städtischen Kerngebieten und sonstigen Gebiete mit relativ

[14] GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

dichter Siedlungsstruktur in Betracht. In allen anderen Fällen ist die Wärmeverteilung meistens zu kostenintensiv, da durch den Trend zu besser wärmegedämmtem Wohnraum, die spezifischen Abnahmemengen für Wärme sinken. Außer in Heizwerken kann Wärme auch durch **gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion** (Kraft-Wärme-Kopplung) bereitgestellt werden. Die Verteilung der Wärme erfolgt wie bei der Erzeugung in Heizwerken.

Als Vergleichsfall für die Fernwärmeversorgung wird davon ausgegangen, dass kein bestehendes Heizwerk, in dem fossile Brennstoffe genutzt werden, ersetzt wird. Vielmehr werden für den Vergleich die durchschnittlichen Emissionen der in Deutschland bereit gestellten Fernwärme jetzt und in Zukunft herangezogen. Dabei wird bis **2010** von einer Verdreifachung der Stromproduktion durch KWK, ausgegangen (d. h. von 3,5 TWh auf 11,1 TWh) /Prognos 2004/.

Klimagasbilanzen der Wärmebereitstellung mit fossilen Energieträgern

Zur Wärmebereitstellung werden zwei grundsätzliche Systeme unterschieden:

- Die Erzeugung von Wärme in Hausfeuerungsanlagen durch die Nutzung von Erdöl und Erdgas sowie
- die Bereitstellung von Wärme durch Fernwärme-Heizwerke oder Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung.

In Abb. 6-1 sind die Klimagasemissionen dargestellt, die mit der Bereitstellung eines GJ Wärme durch Hausfeuerungsanlagen auf der Basis von Erdöl und Ergas sowie durch den deutschen Fernwärmemix verbundenen sind. Um für biogene und fossile Energieträger den gleichen technischen Entwicklungstand zugrunde zu legen, wird für die Wärmeerzeugung in Hausfeuerungsanlagen ein Brennwertkessel berücksichtigt, wie sie 2005 installiert werden können. Bis **2010** wird sich diese Technik weiter etablieren, aber zu keiner nennenswerten weiteren Emissionsminderung durch technische Verbesserungen führen.

Durch den Einsatz von Erdöl in Brennwertkesseln ist ein GJ Wärme mit der Freisetzung von knapp 90 kg Klimagasen verbunden. Durch den Einsatz von Erdgas sind es mit 71 kg ca. 20 % weniger Klimagasemissionen je GJ. Dies bedeutet, dass sich durch den Einsatz von Erdgas statt Erdöl in Hausfeuerungsanlagen Emissionen von Klimagasen vermeiden ließen. Da jedoch eine Vielzahl von Haushalten nicht an das Erdgasnetz angeschlossen ist, ist dies nicht möglich oder mit teilweise erheblichen

Kosten verbunden. Sollte aber ein Erdgasnetz bereits vorhanden sein, ist der Einsatz von Erdgas aus Klimagesichtspunkten günstiger.

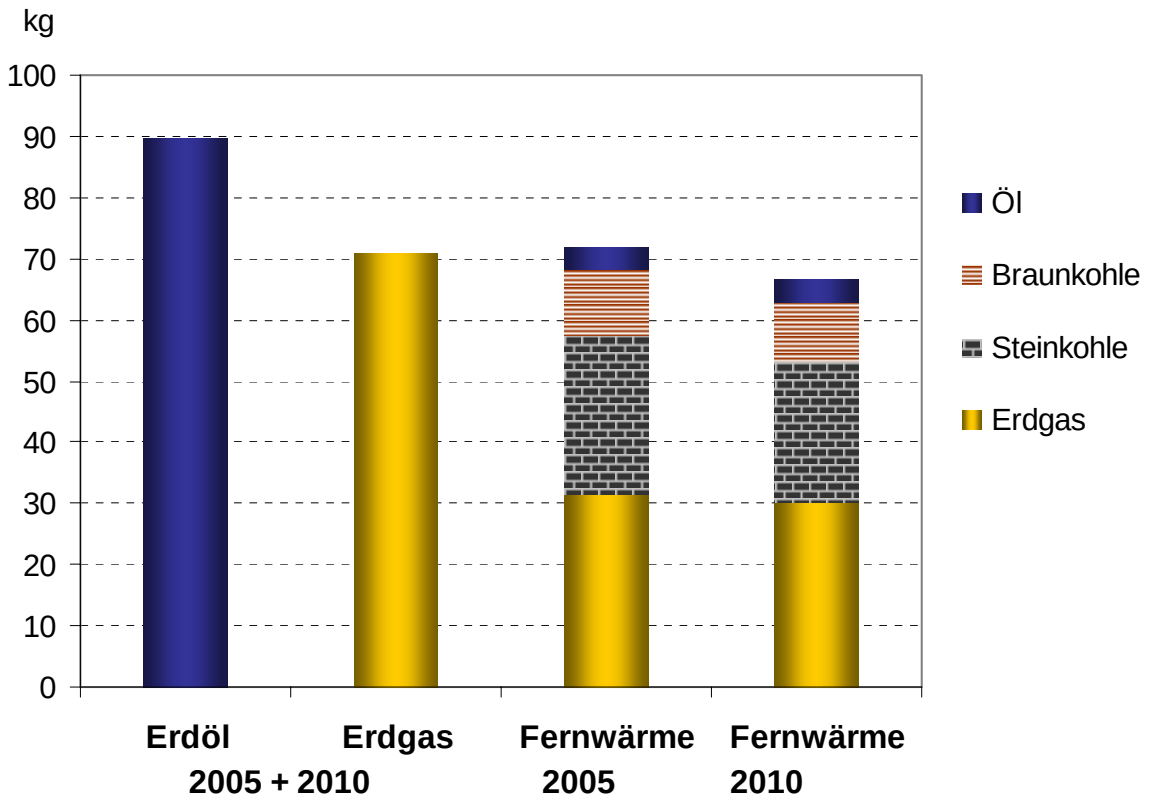


Abb. 6-1: Klimagasemissionen in kg je GJ Wärme. Hausfeuerungsanlagen und Fernwärme 2005 und 2010.
[Quelle: eigene Berechnungen, ecoinvent 2004]

Die Klimagasemissionen, die mit der Fernwärmebereitstellung verbunden sind, belaufen sich für den aktuellen Zeitraum auf fast 72 kg je GJ, für das Jahr 2010 auf knapp 67 kg. Die Hälfte der Klimagasemissionen ist auf den Einsatz von Erdgas zurück zuführen, bei steigendem Anteil an der Fernwärmebereitstellung bleibt die absolute Höhe der Erdgas-Emissionen konstant. Die Emissionen, die auf Steinkohle zurückzuführen sind, gehen verhältnismäßig stark zurück, da bis 2010 einige KWK-Anlagen mit schlechtem Wirkungsgrad durch neuere ausgetauscht werden. Der Öl-Anteil bleibt auf niedrigem Niveau bis 2010 unverändert. Durch die Modernisierung von Altanlagen und vermehrte Erdgasnutzung verringern sich die Klimagasemissionen der Fernwärmebereitstellung um ca. 5 kg je GJ.

6.2 Strombereitstellung

Die wesentlichen Grundlagen zur Stromerzeugung in Deutschland sind bereits in Kapitel 2 beim „Energiesystem Deutschland“ dargestellt worden. Unter dem Aspekt des Substitutionspotenzials ist vor allem der massive **Erneuerungsbedarf im deutschen Kraftwerkspark** von besonderem Interesse.

Der Erneuerungsbedarf bis 2020 beläuft sich aufgrund des Anlagenalters auf etwa 40 GW. Im Falle der Fortsetzung des vereinbarten Ausstiegs aus der Kernenergie werden zusätzlich bis 2020 etwa nochmals 20 GW Kraftwerksleistung ersetzt werden müssen. Bis 2010 fällt ungefähr die Hälfte dieses Erneuerungsbedarfs an (Abb. 6-2).

Für den vorzunehmenden Vergleich der Klimagasemissionen wird davon ausgegangen, dass kein einzelnes Kraftwerk mit einem bestimmten Energieträger durch ein Biomassekraftwerk ersetzt oder nicht neu gebaut wird. Vielmehr wird – entsprechend der üblichen Vorgehensweise bei solchen generellen Betrachtungen – für den Vergleich von den durchschnittlichen Emissionen des deutschen Kraftwerksparks heute und in Zukunft (2010) ausgegangen. Die Zusammensetzung des deutschen Strommixes bis zum Jahr 2010 wurde bereits in Kapitel 2.3 erläutert.

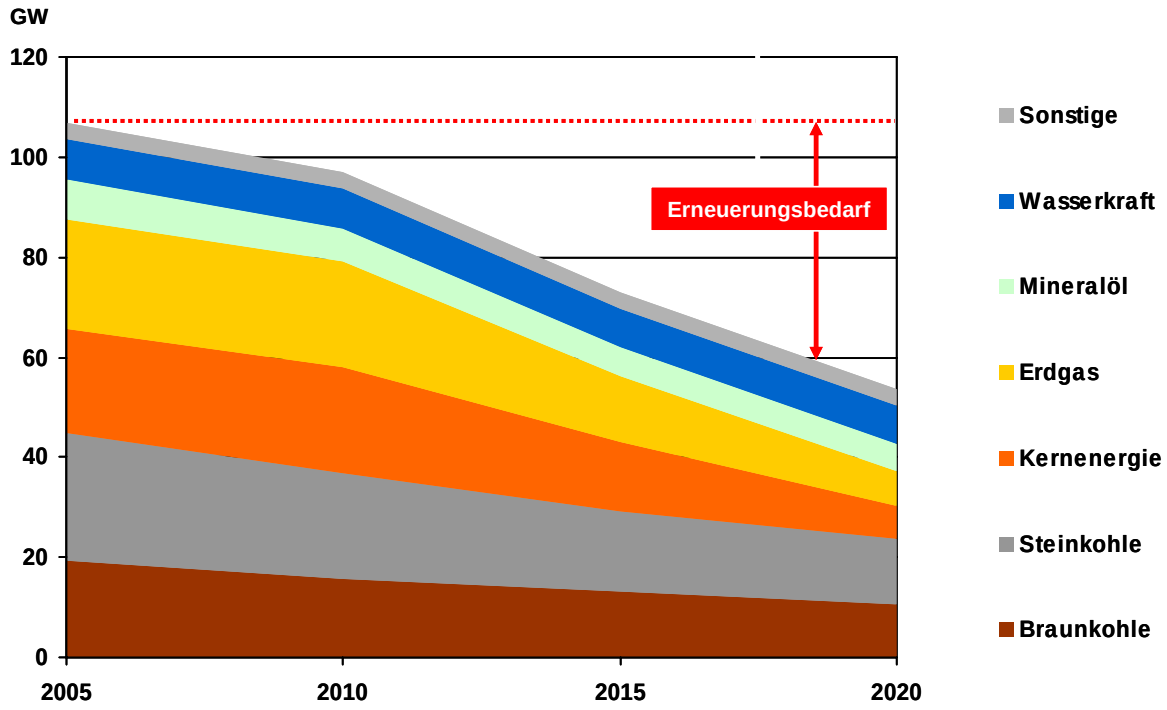


Abb. 6-2: Erneuerungsbedarf im deutschen Kraftwerkspark
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Klimagasbilanzen der Strombereitstellung des deutschen Kraftwerksparks

In Abb. 6-3 sind die Klimagasemissionen dargestellt, wie sie mit der Strombereitstellung in Deutschland zum gegenwärtigen Zeitpunkt und 2010 verbunden sind. Die Gesamtemissionen für die Strombereitstellung sinken von 655 kg je MWh auf 570 kg je MWh.

Der Grund für den Rückgang sind zum einen die Wirkungsgradverbesserungen fossiler Kraftwerke und zum anderen der größere Anteil erneuerbarer Energieträger in 2010. Allein aufgrund der Wirkungsgradverbessung ergibt sich eine Klimagaseinsparung je MWh Strom von ca. 52 kg (9 %).

Die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien ergibt eine Minderung der Klimagasemissionen von zusätzlich knapp 32 kg je MWh (4 %).

Die Höhe der Gesamtemissionen wird zu 90 % durch die Braun- und Steinkohlenutzung verursacht, obwohl der Energieeinsatz zur Stromproduktion nur zu gut 50 % aus diesen beiden Energieträgern stammt. Auf Erdgas und Erdöl entfallen zusammen 10 % der Emissionen bei 12 % Energieträgeranteil. Durch die Kernenergienutzung entstehen trotz 27 % Anteil am Strommix keine nennenswerten Klimagasemissionen.

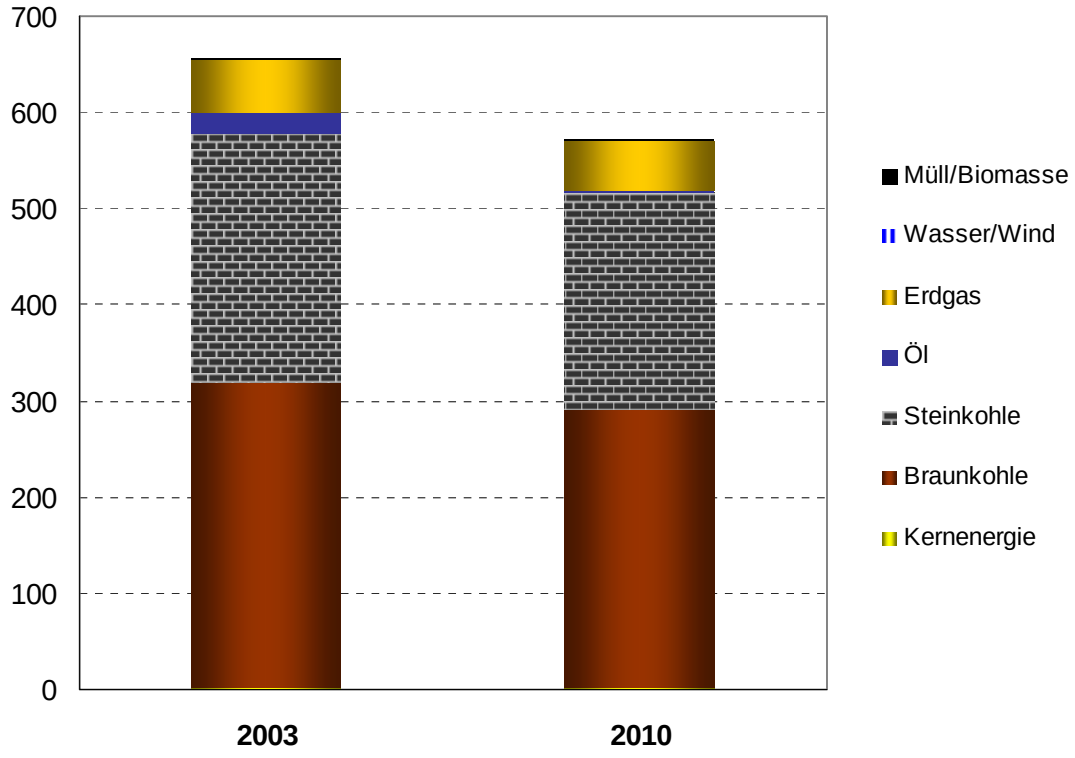


Abb. 6-3 Klimagasemissionen in kg je MWh deutscher Strommix

[Quelle: Eigene Berechnungen, auf Basis von Prognos 2005 und ecoinvent 2004]

Die zuvor dargestellte Entwicklung der Klimagasemissionen im Zusammenhang mit der Stromerzeugung kann nur eine **Momentaufnahme** sein und berücksichtigt Entwicklungen über das Jahr 2010 hinaus nicht. Es wird aber bereits deutlich, dass trotz eines fossilen Brennstoffanteils von 62 % bei den zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträgern bis zum Jahr 2010 bereits deutliche Fortschritte bei der Klimagasminderung zu erwarten sind. Mit einer fortschreitenden Erneuerung des deutschen Kraftwerksparks und damit verbundenen Wirkungsgradverbesserungen sowie einer weiteren Zunahme von Kraftwerken auf Basis von Erdgas und erneuerbaren Energien wird sich dieser Trend auch künftig fortsetzten. Allerdings wird bei der Nutzung fossiler Energieträger weiterhin ein großer Anteil der Klimagasemissionen in Deutschland künftig mit der Stromerzeugung verbunden bleiben.

Aus dieser Erkenntnis heraus werden daher schon seit einiger Zeit verstärkt Forschung- und Entwicklungsanstrengungen unternommen, um das **CO_2-freie Kraftwerk** zu entwickeln. Dabei werden im Wesentlichen folgende Wege bestritten /ERI 2001/:

- Brennstoff-Decarbonisierung
- Anreicherung des CO_2-Stromes im Kraftwerksprozess und Abtrennung dieses Stroms
- Abscheidung von CO_2 durch Rauchgaswäsche mit Lösungsmitteln

Damit das abgeschiedene CO_2-Gas nicht in den Kohlenstoffkreislauf der Natur zurückgelangt, werden weltweit Forschungen zu neuen Verfahren der CO_2-Einlagerung – der **Sequestierung** – durchgeführt. Folgende Haupttechnologien zur Sequestierung werden im Rahmen nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsprogramme untersucht /ERI 2001/:

- Einleitung konzentrierter CO_2-Strömungen in tiefe Meeresschichten
- Einleitung von CO_2 in geologische Formationen
- Biologische Fixierung von CO_2 an Pflanzen durch massive Aufforstung
- Einbindung von CO_2 an mineralische Stoffe und Deponierung dieser Stoffe

Nachdem vor allem die USA, aber auch Japan und Kanada, zunächst die Vorreiter für entsprechende Forschungs- und Entwicklungsprogramme waren, sind nunmehr auch in Deutschland intensive F&E-Aktivitäten gestartet worden. Hierbei geht es ebenso wie zuvor ausgelistet einerseits um die Entwicklung von Abscheidetechnologien verbunden einer Verbesserung der Kraftwerkswirkungsgrade und anderseits um die

Suche und Erprobung geeigneter Lagerstätten für die Speicherung der CO_2-Gase /BMWA 2003/.

Ein langfristiges F&E-Projekt hat die Vattenfall Europe AG gestartet. Eine Pilotanlage (30 MW_{th}) mit CO_2-Abscheidung soll bis 2008 in Betrieb gehen und ein Demonstrationskraftwerk (250 MW_{el}) nach erfolgreicher Testphase gebaut werden. Ein kommerzieller Einsatz wäre aus Sicht von Vattenfall voraussichtlich ab 2020 möglich /Vattenfall 2005/, /RWE 2006/.

Für die Erfolgsaussichten eines CO_2-freien Kraftwerks erscheint trotz aller technischen Herausforderungen weniger die Abscheidetechnologie die entscheidende Stellgröße zu sein, sondern vielmehr die noch bestehenden Unklarheiten über eine langfristig sichere Einlagerung der abgeschiedenen CO_2-Gase in entsprechenden Speichern. Ungewiss sind auch noch die tatsächlichen Kosten für die CO_2-Abscheidung und CO_2-Speicherung. Die Angaben hierzu bewegen sich noch in großen Bandbreiten (z.B. Abscheidung: 18-50 €/t CO_2, Speicherung: 10-24 €/t CO_2) /BMWA 2003/. In entsprechenden Veröffentlichungen zu den möglichen Kosten eines CO_2-freien Kraftwerks lassen sich auch Werte zum Teil deutlich oberhalb und unterhalb der zuvor genannten Kosten finden /WBGU 2003/.

Eine abschließende Bewertung zu den tatsächlichen Realisierungschancen eines CO_2-freien Kraftwerkes ist gegenwärtig noch nicht möglich. Zurzeit bestehen vor allem noch große Unsicherheiten im Hinblick auf eine sichere CO_2-Speicherung und die Wirtschaftlichkeit einer solchen Klimagasminderungsstrategie.

6.3 Kraftstoffbereitstellung

Die Mobilität unserer Gesellschaft wird heute in erster Linie durch fossile Energieträger, vor allem Erdöl, sichergestellt. In Deutschland wurden 2003 insgesamt fast 54 Mio. t (2.320 PJ) fossiler Kraftstoffe in ca. 54 Mio. Kraftfahrzeugen verbraucht. Der Benzinanteil am Kraftstoff beläuft sich auf etwa 48%, der Dieselanteil auf ca. 52 %. Der Gesamtkraftstoffbedarf in Deutschland wird bis 2010 geringfügig zurückgehen, wobei sich die Anteile zugunsten der Dieselnutzung verschieben werden /MWV 2004/.

Um den Verbrauch fossiler Kraftstoffe zu verringern und die fossilen Ressourcen zu schonen, hat die Europäische Union durch eine Kraftstoffdirektive und weitere Richtlinien festgelegt, dass ein Teil des genutzten Kraftstoffes aus biogenen Quellen

stammen muss /EU-Kraftstoffdirektive 98/70/EG/, /Richtlinie 2003/30/EG/. Bis zum Jahr 2005 sollten in den Mitgliedsstaaten der EU der Anteil von Biokraftstoffen auf 2 % sämtlicher Kraftstoffe ansteigen, bis 2010 auf 5,75 %. Dies ist technisch auf unterschiedlichen Wegen realisierbar:

- Durch den Einsatz von Biodiesel aus Pflanzenöl als Reinkraftstoff statt fossilem Diesel (B100),
- durch die Zumischung von Biodiesel zu fossilem Diesel (z. B.: B5 oder B10, 5 %- bzw. 10 %-Anteil)
- durch die Zumischung von Bioethanol oder ETBE zu Benzin (z. B.: E5 oder E10, 5 %- bzw. 10 %-Anteil) mit geringen Anteilen (ETBE bis 15 % möglich) oder
- durch eine Zumischung von Bioethanol zu Benzin mit großem Anteil (z. B.: E85 entsprechend einem 85 %-Anteil).

In den drei ersten Fällen (ohne E10) müssen die Fahrzeuge (Motoren) selbst nicht verändert werden, da die Brennstoffeigenschaften der biogenen Kraftstoffe bzw. des Gemisches den Eigenschaften der fossilen Kraftstoffe entsprechen. Biodiesel wird so hergestellt, dass es in konventionellen Motoren verbrannt werden kann, bei der Zumischung von Ethanol zu Benzin können sich die Kraftstoffeigenschaften mit zunehmendem Anteil an Ethanol erheblich verändern. Daher wird für den Zeitraum bis 2010 von einer maximalen Zumischung in Höhe von 5 bis max. 10 Volumenprozent am Kraftstoff ausgegangen. Einige Automobilhersteller bereiten bereits heute ihre Neufahrzeuge auf den Einsatz mit E10 vor /Leohold/. In der Diskussion sind aber auch Kraftstoffgemische bis E85. Bei diesen höheren Ethanolkonzentrationen müssen die Motoren allerdings technisch verändert werden, da sonst ein problemloser Betrieb nicht gewährleistet ist. Vom Autoproduzenten Ford werden seit August 2005 in Schweden so genannte „Flexible Fuel Vehicles“ (FFV) angeboten, welche mit E85 problemlos betrieben werden können. Im Hinblick auf den Zeithorizont bis 2010 wird aber vor allem über die Beimischung (E5 - 10) bzw. ETBE-Beimischungen eine größere Menge Bioethanol im Kraftstoffsektor etabliert werden können.

Für das Jahr **2005** ist die Zielvorgabe eines Anteils von 2% Biokraftstoffen, vor allem aufgrund des Einsatzes von Biodiesel erreicht worden. Der Grad der Zumischung von Bioethanol zu Benzin ist zurzeit noch sehr gering, wird aber – gerade an freien

Tankstellen – schon vorgenommen. Die Mineralölindustrie setzt seit 2004 neben Biodiesel vor allem ETBE soweit als möglich ein.

Als Ergebnis der Änderungen der Steuerbegünstigung für Biokraftstoffe und der Einführung eines Biokraftstoffquotengesetzes sind die zu erreichenden Mindestzielmengen praktisch vorgegeben. Diese orientieren sich an den Mengenvorgaben des Aktionsplans der EU-Kommission. Noch nicht einschätzbar sind die Auswirkungen der stufenweisen Teilbesteuerung auf dem Reinkraftstoffmarkt. In Abhängigkeit von der Dieselpreisentwicklung ist nicht auszuschließen, dass die Verwendung von Biodiesel als Reinkraftstoff 2008/2009 wirtschaftlich unattraktiv wird. Zur dauerhaften Aufrechterhaltung eines Reinstoffkraftmarktes für Biodiesel müsste dann ein Steuersatz eingeführt werden, der die tatsächlichen Wettbewerbsunterschiede zu Dieselkraftstoff widerspiegelt. Dieser Steuersatz müsste den Mehrverbrauch – den „Steuersatz“ als Ergebnis der Quotenverpflichtung auch für Biokraftstoffhersteller – sowie einen Preisabstand als „Anreizelement“ berücksichtigen. Gemäß Bericht der Bundesregierung zur Überkompensationsprüfung (BT als Groß-Drucksache 15/5816) müsste dieser mindesten 0,10 €/l betragen. Als Ergebnis der stark steigenden Biodieselkapazität werden bereits Rohstoffe (Sojasaat, Sojaöl und Rapsöl) importiert. Problematisch ist die Tatsache, dass im europäischen Markt ein Großteil der Biodieselproduktionskapazität auf den deutschen Markt orientiert ist. Als Ergebnis der geänderten Steuerbegünstigungen für Biokraftstoffe wird der Export von Biodiesel nach Deutschland zunehmend unattraktiv. Im Umkehrschluss erhöht sich dadurch der Druck in den jeweiligen Mitgliedstaaten, nationale Rahmenbedingungen zur Förderung von Biokraftstoffen zu schaffen. Zudem steht die EU-Kommission vor der Herausforderung, für einen freien Warenverkehr von Biokraftstoffen innerhalb der EU gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen. Dies gilt beispielsweise für auf nationaler Ebene geschaffene Rahmenbedingungen (z.B. Ausschreibungen) wie z.B. Frankreich, die im Wesentlichen zum Ziel haben, die heimischen Biokraftstoffproduzenten zu bevorzugen.

Klimagasbilanzen für die Kraftstoffbereitstellung aus fossilen und biogenen Energieträgern

Die Menge an emittierten Klimagasen je Fahrzeugkilometer ist an den Kraftstoff-Verbrauch gekoppelt und hängt stark von der Betriebsweise des Fahrzeugs ab. Innerortsfahrten mit vielen Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen verursachen

den höchsten Verbrauch, Außerorts- und Autobahnfahrten mit relativ konstanter Geschwindigkeit und weniger Beschleunigungsvorgängen benötigen etwas weniger Energie.

Vor diesem Hintergrund wird für diese Studie eine Fahrleistung definiert, die sich zu jeweils 30 % aus Innerorts- und Außerortsfahrten sowie zu 40 % aus Autobahnfahrten zusammensetzt /Gemis 2004/.

Zum 1. Januar 1993 wurden erstmals EU-weit Schadstoffgrenzwerte eingeführt, die Neufahrzeuge einhalten müssen, um eine Zulassung zu erhalten (Schadstoffnorm Euro 1). Diese Schadstoffgrenzwerte, die auch die Emissionen von Klimagasen beeinflussen können, wurden zu Beginn der Jahre 1996, 2000, 2005 immer weiter abgesenkt (Euro 2 bis 4). Seit Anfang 2005 gilt die Euro 4 Norm, die Anzahl der in Deutschland nach dieser Norm zugelassenen Autos ist jedoch noch relativ gering. Für die Darstellung der aktuellen Situation werden daher exemplarisch die Klimagasemissionen eines Kraftfahrzeuges betrachtet, dass die Euro 3-Norm erfüllt.

Für **2010** wird ein Kraftfahrzeug betrachtet, das die Euro 4 Norm erfüllt. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich aufgrund der Selbstverpflichtung der Automobilindustrie der Kraftstoffverbrauch gegenüber 2005 bei Benzinfahrzeugen um knapp 10 % und bei Dieselfahrzeugen um knapp 5 % senken wird /Gemis 2004/. Das Einsparpotenzial beim Kraftstoffverbrauch stößt jedoch laut VDA aufgrund steigender emissionsrechtlicher Anforderungen und der Komfortansprüche des Endkunden zunehmend an seine Grenzen.

Die emittierten Klimagase eines Benzin- und Dieselfahrzeugs sind für 2005 und 2010 in Abb. 6-4 dargestellt.

Die Klimagasemissionen betragen im Jahr **2005** für ein Fahrzeug der EURO 3-Norm inklusive der Kraftstoffvorkette 242 g je Fahrzeugkilometer für Benzinfahrzeuge und 170 g für Dieselfahrzeuge. Zu diesem großen Unterschied (knapp 30 %) kommt es, da aufgrund des besseren Wirkungsgrades des Dieselmotors der Verbrauch je km bei Dieselfahrzeugen geringer ist.

Bis **2010** gehen die Emissionen gegenüber 2005 analog zu dem geringeren Kraftstoffverbrauch um 10 % (Benziner) bzw. 5 % (Dieselfahrzeuge) zurück. Der Unterschied zwischen Euro 3- und Euro 4-Norm hat also keine Auswirkungen auf die Höhe der Klimagasemissionen, diese sind an den Kraftstoffverbrauch gekoppelt.

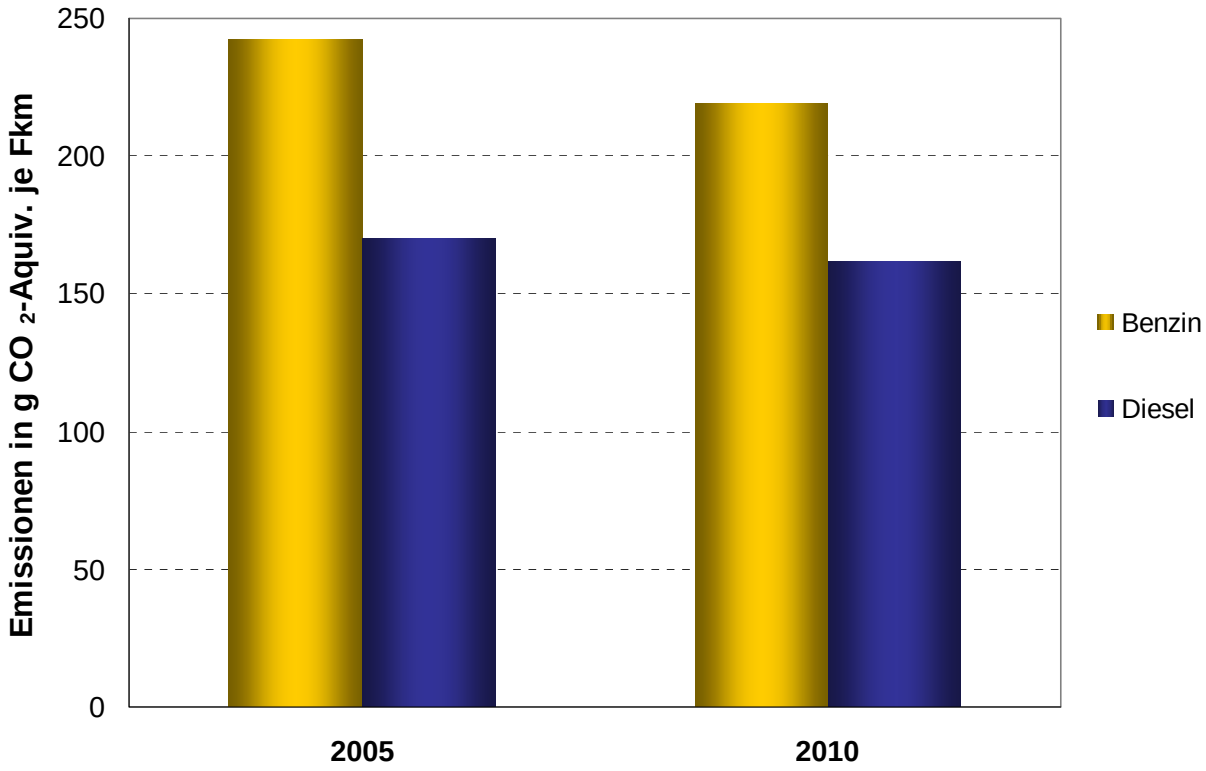


Abb. 6-4: Klimagasemissionen in g je Fahrzeugkilometer für fossile Treibstoffe

[Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von GEMIS 2004]

7 Vergleich der Klimagasemissionen biogener und fossiler Energieträger

In den vorangegangenen Kapiteln wurden der Umfang und die Ursache für die Klimagasemissionen durch die Energieumwandlung dargestellt. Der Analyse der biogenen Bereitstellungspfade (Kap. 5) folgte die Beschreibung fossiler Wandlungsketten (Kap. 6). Im Folgenden werden die Klimagasemissionen, die mit der Erzeugung von Energie auf Basis biogener und fossiler Energieträger verbunden sind, miteinander verglichen, wodurch die optimalen Minderungspfade für die biogenen Energieträger ermittelt werden können.

7.1 Wärmebereitstellung

Wärme wird vornehmlich in Kleinfeuerungen in den Haushalten erzeugt. Die sich aus dem Vergleich der Bioenergieträger untereinander ergebenden Unterschiede relativieren sich bzw. verlieren an Bedeutung, wenn die Betrachtung um die Bereitstellung von Wärme aus Erdgas und Erdöl erweitert wird (Abb. 7-1).

Die Wärmebereitstellung durch die Nutzung fossiler Energien ist mit den 3- bis 8-fachen Klimagasemissionen wie bei der Nutzung biogener Energieträger verbunden.

Da in Biomasse-Heizwerken (Großanlagen) auch fossile Energieträger zur Deckung der Spitzenlast zum Einsatz kommen, sind die Einsparungen gegenüber der Vergleichstechnik (Fernwärme) etwas geringer. Es kann aber immer noch das 2,5 bis 3,5-fache an Klimagasemissionen eingespart werden.

Bis **2010** ändert sich an den zuvor genannten Größenordnungen nichts Wesentliches (Abb. 7-2). In Kleinanlagen können auch Strohpellets eingesetzt werden, die mit einer Einsparung an Klimagasemissionen um den Faktor 2,8 im Vergleich zu fossilen Energieträgern verbunden sind. Im landwirtschaftlichen Sektor können Getreidekörner zur Wärmegewinnung eingesetzt werden (Nischenanwendung). Darüber hinaus kann Biogas durch Einspeisung in das Erdgasnetz räumlich getrennt vom Produktionsstandort zur Wärmeerzeugung in Hausanlagen genutzt werden. Biogas aus Gülle weist aufgrund der vermiedenen Emissionen starke Unterschiede zu Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen auf (Maissilage, Faktor 2). Auch bei Großanlagen bleiben die Verhältnisse annähernd konstant. Der Einsatz von Stroh ist vergleichbar zu Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen (Faktor 2,7). Beim Einsatz von Getreideganzpflanzen im Heizwerk wird der geringste Einsparungseffekt gegenüber dem

Fernwärmemix erreicht (Faktor 2). Die beschrieben Zusammenhänge sind vereinfacht in Abb. 7-3 dargestellt.

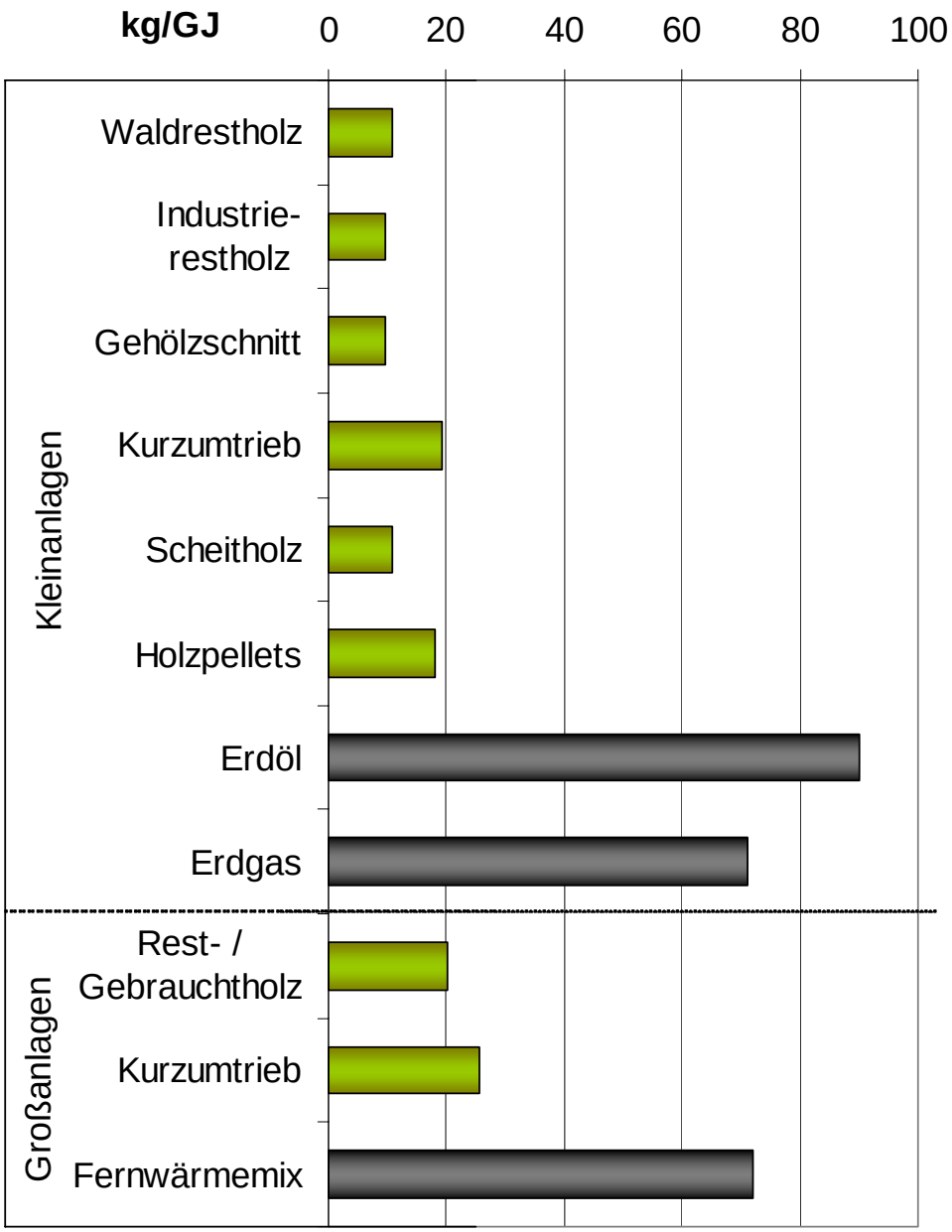


Abb. 7-1: Klimagasemissionen in kg je GJ Wärme von biogenen und fossilen Energieträgern im Vergleich (Anlagenstand 2005)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

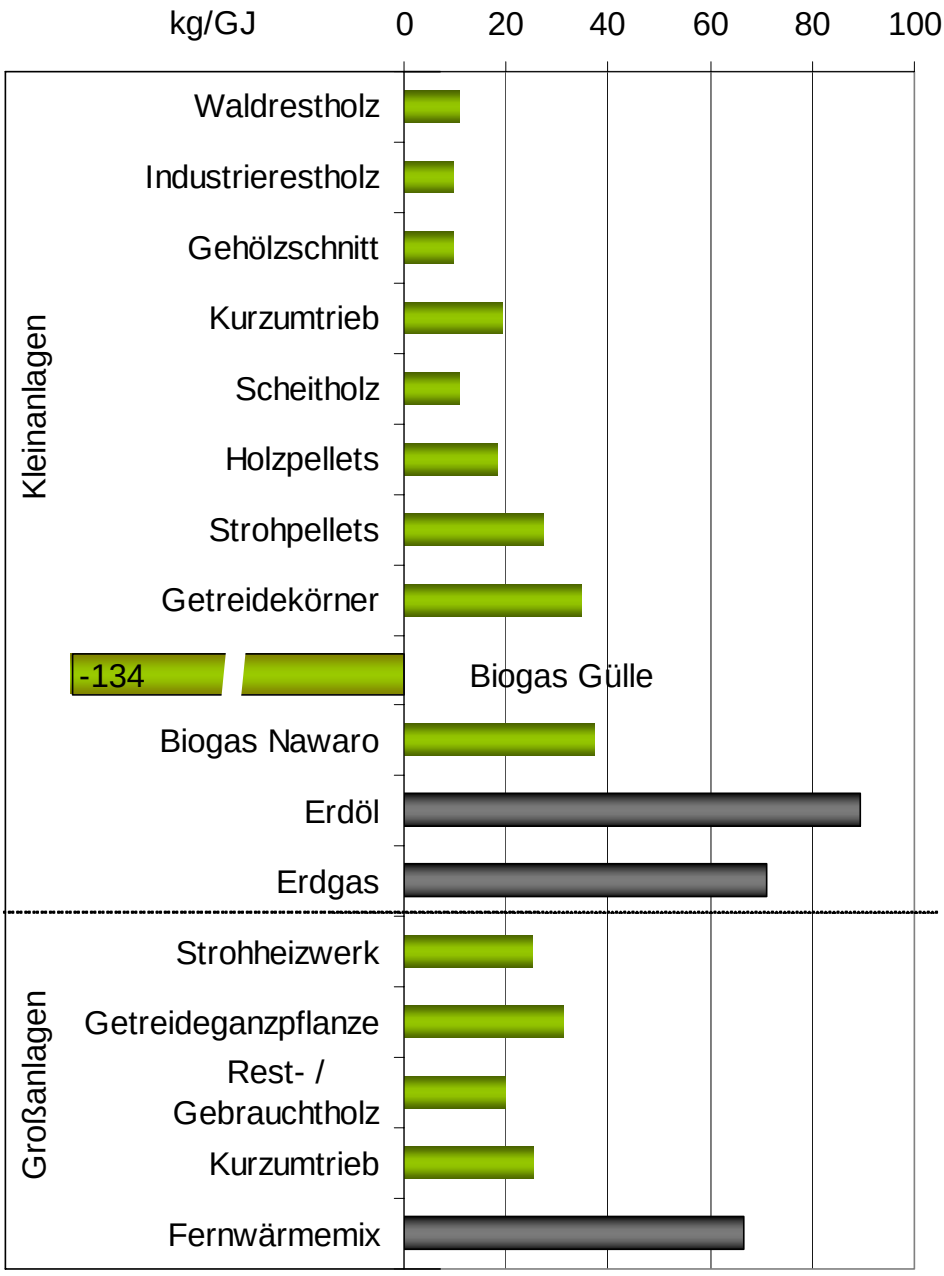


Abb. 7-2: Klimagasemissionen in kg je GJ Wärme von biogenen und fossilen Energieträgern im Vergleich (Anlagenstand 2010)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

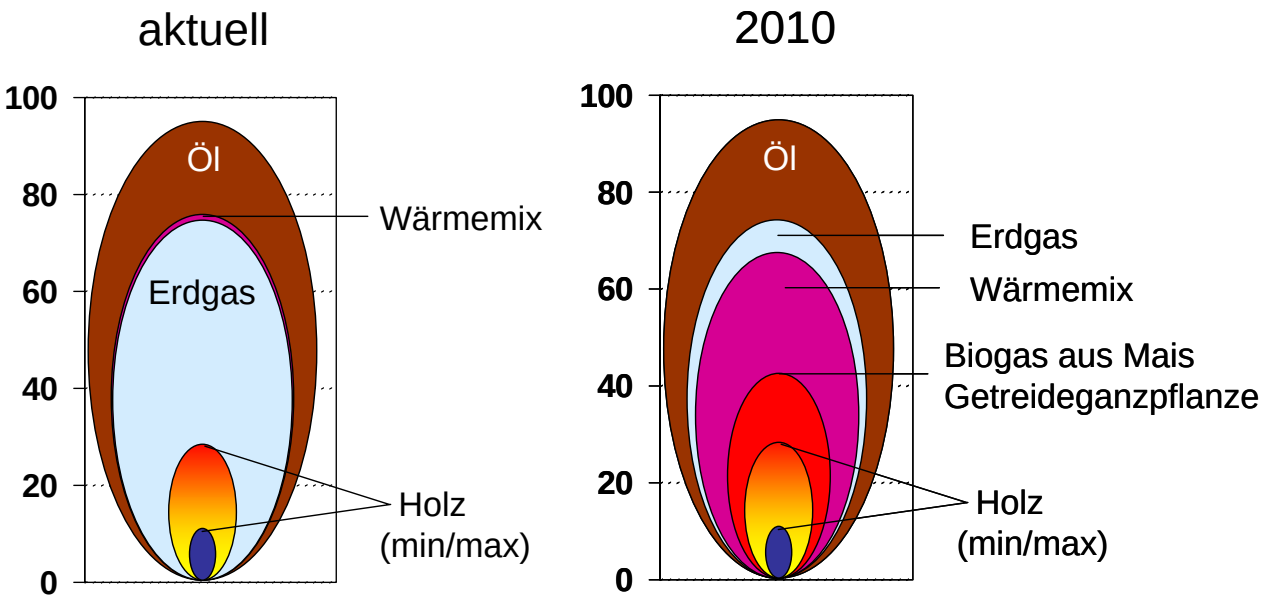


Abb. 7-3: Vereinfachte Darstellung des Vergleichs der Klimagasemissionen in kg je GJ Wärme
[Quelle: Eigene Berechnungen]

7.2 Strombereitstellung

Die Klimagasemissionen, die mit dem deutschen Strommix verbunden sind, liegen aktuell mit 655 kg je MWh um das 2,5 bis 3,5-fache über den Emissionen einer reinen Strombereitstellung aus Biogas (Maissilage) oder mit Holz aus Kurzumtriebsplantagen (Abb. 7-4).

Werden Rest- oder Gebrauchthölzer zur Stromproduktion verwendet, machen die Emissionen sogar nur ca. 10 % des deutschen Strommixes aus. Durch eine gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion (KWK) sinken die spezifischen Emissionen noch einmal, so dass durch Rest- und Gebrauchthölzer nur 7 % der Emissionen des Strommixes verursacht werden. Durch Biogas (Maissilage) und Holz aus Kurzumtriebsplantagen werden bei einer KWK-Nutzung Klimagasemissionen verursacht, die um den Faktor 3 bis 6 unter dem Strommix liegen.

Die Einsparungen, die mit der Biogasproduktion aus landwirtschaftlichen Reststoffen (Gülle) verbunden sind, lassen sich nicht durch Faktoren ausdrücken. Diese Art der Strombereitstellung ist auf jeden Fall mit positiven Klimaeffekten verbunden, da eine größere Menge an Emissionen an anderer Stelle eingespart wird, als durch die Stromproduktion entsteht.

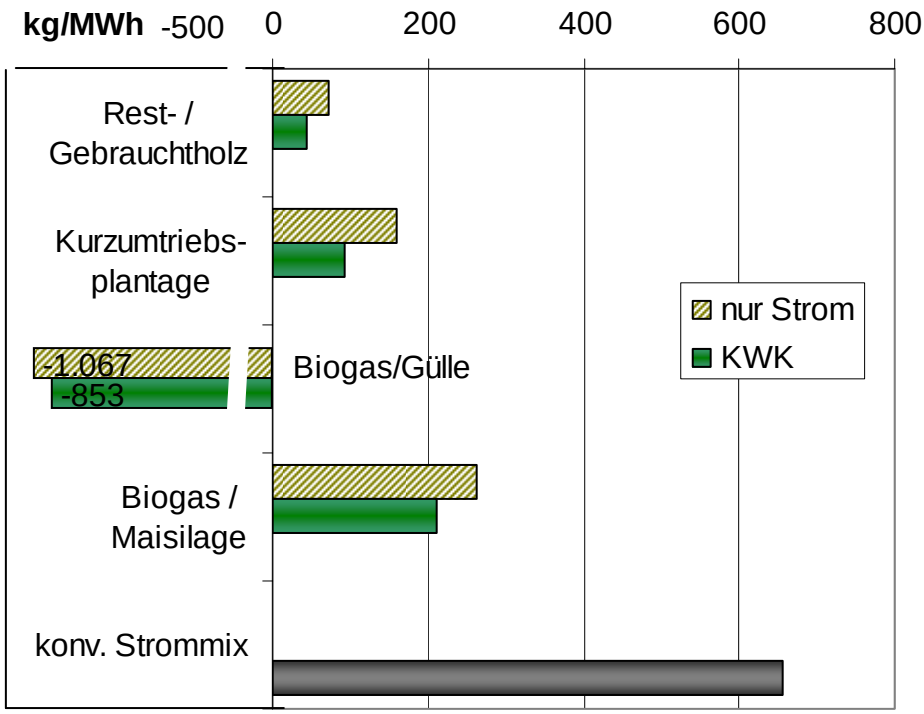


Abb. 7-4: Klimagasemissionen in kg je MWh Strom von biogenen und fossilen Energieträgern im Vergleich (Anlagenstand 2005)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Bei der Betrachtung der künftigen Entwicklung kommt neben dem Stroh- und Ganzpflanzeneinsatz zur Stromproduktion auch die Möglichkeit der Biogaseinspeisung und zentralen Nutzung in Frage, wodurch die Bereitstellung von KWK-Strom ausgeweitet werden könnte. Bis **2010** erhöht sich zudem die Effizienz der konventionellen Kraftwerke, so dass die Klimagasemissionen je MWh im Strommix auf 573 kg zurückgehen (Abb. 7-5). Dies entspricht einem Rückgang um 13 %. In dem Maße, in dem die Klimagasemissionen zurückgehen, sinken auch die Minderungsmöglichkeiten durch biogene Energieträger.

Die neu hinzu gekommenen Möglichkeiten der Stroh- und Ganzpflanzenverbrennung liegen bei einem Viertel (Stroh) bis knapp der Hälfte (Getreideganzpflanze) der mit dem Strommix verbundenen Emissionen. Die Einsparpotenziale steigen noch einmal durch die Stromproduktion im KWK-Betrieb.

Die Einspeisung von Biogas aus Maissilage in das Erdgasnetz lohnt sich aus Klimagesichtspunkten immer dann, wenn keine KWK Option vor Ort besteht und das eingespeiste Biogas zentral mit großen Aggregaten und großer Wärmeauskopplung

eingesetzt werden kann. Dies gilt im Prinzip auch für Biogas aus Gülle, jedoch sind hier die Klimagaseinsparungen in der Vorklette derart groß, dass durch eine Biogaseinspeisung in jedem Fall ein positiver Netto-Effekt erzielt wird, dieser ist allerdings kleiner als ohne Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz.

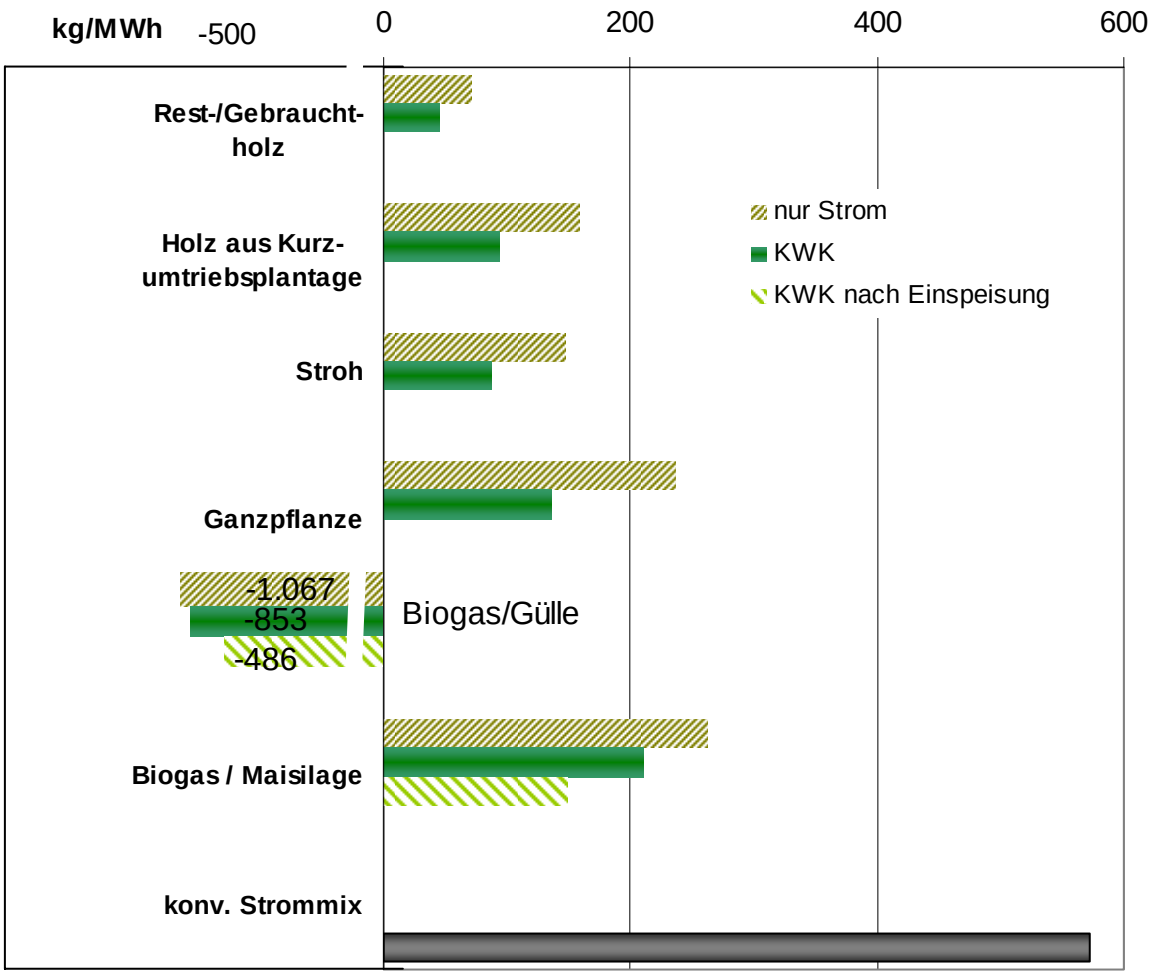


Abb. 7-5: Klimagasemissionen in kg je MWh Strom von biogenen und fossilen Energieträgern im Vergleich (Anlagenstand 2010)
[Quelle: Eigene Berechnungen]

7.3 Kraftstoffbereitstellung

Die Auswertung der Klimagasbilanzen (Abb. 7-6) für die Kraftstoffe E5 (aus Zucker bzw. Stärke), Benzin sowie Diesel, Biodiesel (RME) und B5 zeigt für das Jahr 2005, dass die Klimagasemissionen je Fkm bei benzingetriebenen Fahrzeugen am größten sind (242 g/Fkm). Der Biodieselantrieb verursacht die spezifisch geringsten Emissionen mit 78 g/Fkm. Ein fünfprozentiges Zumischen von Ethanol zu Benzin führt bei einer Berücksichtigung aller relevanten Vorketten nur zu einem sehr geringen Rückgang der Klimagasemissionen je Kilometer: -1 % bei E5 auf Zuckerbasis bzw. –0,3 % bei Ethanol auf Stärkebasis.

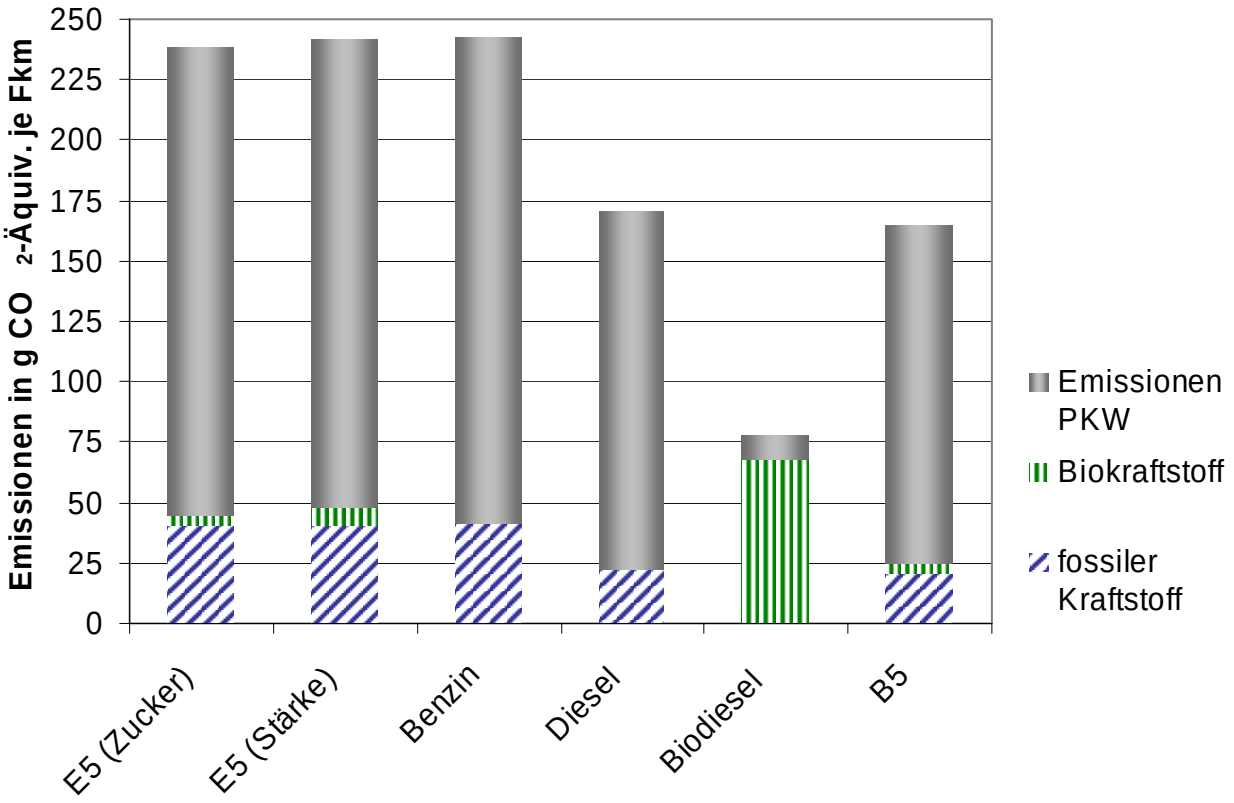


Abb. 7-6: Klimagasemissionen in g je Fahrzeugkilometer in 2005 nach Kraftstoffarten
[Quelle: Eigene Berechnungen], andere Beimischverhältnisse wie E10, E85 oder B10 wurden für 2010 in Abb. 7-7 berücksichtigt

Mit zunehmendem Biokraftstoffanteil reduzieren sich die direkten Emissionen des PKW. Sie sind bei den beiden E5-Varianten gleich groß. Trotzdem sind die Gesamtemissionen beim Einsatz von E5 auf Zuckerbasis geringer als beim Einsatz von E5

auf Stärkebasis, was auf die erhöhten Belastungen aus der Kraftstoffvorkette zurückzuführen ist. Hier kommt der Effekt zum tragen, dass das Zumischen von 5 Volumenprozent Ethanol energetisch nur ca. 3,3 % ausmacht. Diese 3,3 % des Kraftstoffs verbrennen klimaneutral und verbessern die Klimagasbilanz des Fahrzeuges. Im Falle von E5 auf Stärkebasis steht der 3,3-prozentigen Ersparnis ein erhöhter Aufwand in der Kraftstoff-Bereitstellung gegenüber, der fast ebenso hoch ist.

Die Höhe der Gesamtemissionen wird bei der Biodieselnutzung (B100) mit ca. 86 % hauptsächlich von der Bereitstellung des Biodiesels verursacht. Die direkten Emissionen bei der Kraftstoffnutzung machen nur ca. 6,5 % der Emissionen der konventionellen Dieselantriebe aus und sind vor allem auf den Einsatz des fossilen Methanols zur Umesterung zurückzuführen. Dieselbetriebene Fahrzeuge emittieren zudem auch aufgrund des besseren Motor-Wirkungsgrades je Fahrzeugkilometer nur etwa 3/4 der Klimagasemissionen der benzinbetriebenen PKW.

Beim direkten Vergleich fossiler und biogener Kraftstoffe ergeben sich je Fahrzeugkilometer Klimagas-Einsparungen in Höhe von

- 3,6 g E5(Zucker) gegenüber Benzin,
- 0,55 g E5(Stärke) gegenüber Benzin,
- 92,6 g Biodiesel gegenüber fossilem Diesel und
- 5,4 g B5 gegenüber fossilem Diesel.

Bei einem Beimischungsanteil von 5 % Bioethanol am Benzin ergeben sich nur relativ geringe Einsparpotenziale. Bei einer Fahrleistung von 15.000 km je Jahr ergeben sich durch die E5-Nutzung Einsparungen je Fahrzeug in Höhe von 8,25 kg bis 54,2 kg pro Jahr. Die Beimischung von 5 % Biodiesel zu fossilen Diesel ergibt eine Einsparung von 77 kg Treibhausgasemissionen pro Jahr bei gleicher Fahrleistung.

Für das Jahr **2010** sinken die Gesamtemissionen aufgrund von leichten Effizienzsteigerungen in der Fahrzeugtechnik, die ebenso für die Nutzung konventioneller als auch biogener Kraftstoffe wirksam werden (Abb. 7-7).

Eine weitere Reduzierung wird durch den auf Stärke optimierten Pflanzenanbau ermöglicht. Bei insgesamt zurückgehendem Kraftstoffverbrauch und Klimagasemissionen verändern sich die Werte der einzusparenden Emissionen bei einer 5 % Zumi-

schung von Ethanol: Da es bei der Ethanolbereitstellung aus Zucker bis 2010 zu keinen nennenswerten Effizienzsteigerungen kommen wird, sinkt die Einsparung von E5(Zucker) gegenüber Benzin von 3,6 auf 3,3 g/Fkm. Die Einsparungen von E5(Stärke) steigen aufgrund der Optimierung im Pflanzenbau von 0,55 auf 1,23 g/Fkm. Eine Erhöhung der Zumischquote (E10) vergrößert die Einsparungen an Klimagasen entsprechend. Bei Biodiesel sinken die Einsparungen je Fahrzeugkilometer von 92,6 auf 87,8 g/Fkm aufgrund der allgemeinen Effizienzsteigerungen. Die Emissionen von E85 (auf Zuckerbasis) liegen fast doppelt so hoch wie die von Biodiesel, die Einsparungen an Klimagasemissionen sind aufgrund des anderen Vergleichsbrennstoffs (Benzin gegenüber Diesel) jedoch verhältnismäßig hoch: z. B E85 (Zucker): 78,8 g/Fkm Einsparung an CO_2-Äquiv. gegenüber Benzin). B5 bzw. B10 haben vergleichsweise geringe Minderungen an Klimagasemissionen zur Folge. Sie liegen bei ca. 5 bzw. 10 g/Fkm.

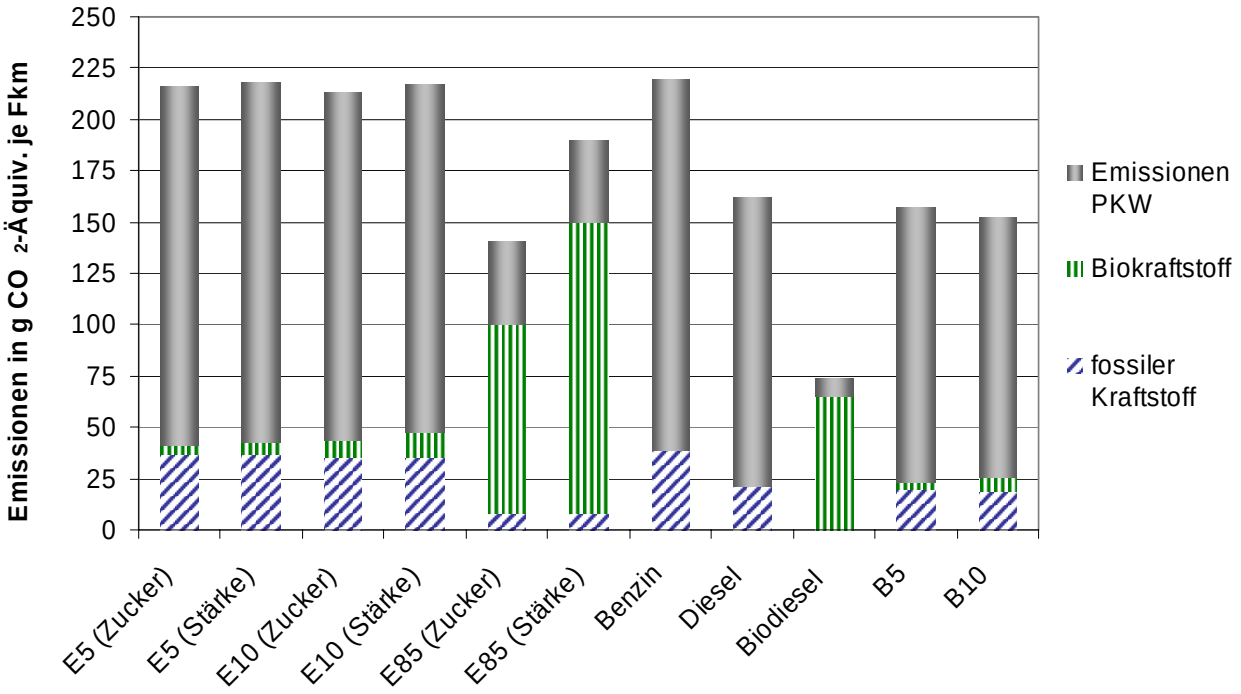


Abb. 7-7: Klimagasemissionen in g je Fahrzeugkilometer in 2010 nach Kraftstoffarten.
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Teil III

Beiträge zum Klimaschutz

8 Minderung der Klimagasemissionen durch Biomassenutzung

Für die insgesamt mögliche Klimagasminderung durch Biomassenutzung ist es nun noch notwendig, das in Deutschland vorhandene Energieträgerpotenzial mit einzubeziehen.

In der nun folgenden Berechnung werden die möglichen Energieerträge der Pflanzenproduktion (Ertrag je ha), die tatsächlichen Potenziale der Reststoffe sowie die durch den Einsatz der biogenen Energieträger vermiedenen Klimagasemissionen zusammengeführt.

Durch eine Verknüpfung dieser Analysen wird als abschließendes Ergebnis dieser Studie die maximal mögliche Minderung von klimawirksamen Emissionen in Deutschland durch den verstärkten Einsatz von Biomasse zur Energiebereitstellung bis zum Jahr 2010 ermittelt.

8.1 Spezifischer Energieertrag der Pflanzenproduktion

Die energetisch nutzbaren Pflanzen weisen unterschiedliche spezifische Erträge an Frischmasse je ha auf. Die landwirtschaftliche Fläche, die für den Energiepflanzenanbau genutzt werden kann, ist begrenzt. Dies bedeutet, dass nicht alle Pflanzen nach Wunsch oder Bedarf bereitgestellt werden können, sondern dass beim Anbau einer Art die entsprechende Fläche für eine andere Art nicht mehr zur Verfügung steht. Die optimalen Ertragspotenziale je Pflanze sind im Überblick in Tab. 8-1 dargestellt.

Neben den Frischmasseerträgen verschiedener Energiepflanzen sind die möglichen sekundären Energieträger und der daraus resultierende Energieertrag aufgeführt. Einzelne Pflanzen können mittels verschiedener Bereitstellungsketten zu unterschiedlichen Sekundärenergieträgern aufbereitet werden und weisen daher unterschiedliche Energieerträge je ha auf. Den größten energetischen Ertrag liefert Weizen als Ganzpflanzenballen. Die anderen Getreidesorten, genutzt als Ganzpflanzen, weisen ähnlich hohe Werte auf. In der gleichen Größenordnung liegt auch der Ertrag an Holzhackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen (als Festbrennstoff genutzt). Auch durch Biogas aus Silomais sind noch relativ hohe Energieerträge je Hektar zu erreichen. Einen nur etwas geringeren Hektarertrag weist auch Ethanol aus Zuckerrüben auf. Um einen Faktor 2 bis 3 darunter liegen die übrigen Pfade zur Kraftstoffbereitstellung. Besonders hinzuweisen ist auf den Umstand, dass Ethanol

aus Weizen einen ca. dreimal geringeren Energieertrag je ha liefert als Ethanol aus Zuckerrüben.

Tab. 8-1: Spezifischer Energieertrag der Pflanzenproduktion je Jahr

Rohstoff	spezifischer Ertrag in t FM/ha*	**sekundär Energieträger**	**spezifischer Energieertrag in GJ/ha**
Holz (Pappel-Kurz-umtriebsplantage)	10,6	**Hackschnitzel**	**166,5**
Weizen (Kornertrag)	7,3	**Ethanol**	**57,6**
Weizen (Ganzpflanzen)	13,2	**Ganzpflanzen-ballen**	**170,0**
Roggen (Kornertrag)	5,4	**Ethanol**	**38,2**
Roggen (Ganzpflanzen)	13,0	**Ganzpflanzen-ballen**	**166,9**
Triticale (Kornertrag)	5,9	**Ethanol**	**46,6**
Triticale (Ganzpflanzen)	11,3	**Ganzpflanzen-ballen**	**145,0**
Silomais (Ganzpflanzen)	44,2	**Biogas**	**151,7**
Zuckerrüben	56,0	**Ethanol**	**124,8**
Raps (Rapssaat)	3,8	**Biodiesel**	**55,8**
Sonnenblumen (Kerne)	2,4	**Biodiesel**	**34,4**

* Angabe in Tonne Frischmasse je Hektar

[Quelle: FAO 2000, vgl. Tab. 3-1 und eigene Berechnungen]

8.2 Maximale Klimagasreduktion

Ein hoher Energieertrag je Hektar – wie zuvor in Kap. 8.1 dargestellt – bedeutet aber nicht zwingend auch ein hohes Minderungspotenzial für Klimagase. Die Aufwendungen, die im gesamten Lebensweg - von der Produktion über die Aufbereitung bis hin zur letztendlichen Umwandlung - müssen bei der Ermittlung des Klimagasminderungspotenzials berücksichtigt werden. Dazu müssen die möglichen Energieerträge je ha mit den in Kap. 7 ermittelten Minderungsmöglichkeiten verknüpft werden. Darüber hinaus sind auch die anfallenden Reststoffe, die energetisch genutzt werden können, in die Betrachtung mit einzubeziehen.

In Tab. 8-2 sind die Ergebnisse dieser Zusammenführung dargestellt und die Minderungspotenziale für die Jahre 2005 und 2010 ausgewiesen. Für die Interpretation der

Ergebnisse ist folgendes zu beachten:

- Die Tabelle ist in zwei Bereiche eingeteilt. Im oberen Teil werden die Minderungspotenziale durch die Energiepflanzenproduktion verglichen, im unteren Bereich sind die Potenziale aufgelistet, die durch den vollständigen Einsatz der biogenen Reststoffe erschlossen werden können.
- Es muss berücksichtigt werden, dass die Minderungspotenziale der Energiepflanzen nicht addiert werden können, da auf den angenommenen 2 Mio. ha Anbaufläche jeweils nur eine Pflanzenart angebaut werden kann.
- Die Reststoffpotenziale können hingegen addiert werden, da diese Stoffe in unterschiedlichen Bereichen anfallen und nicht von der genutzten Fläche abhängen. Einzige Ausnahme bildet hierbei der Reststoff „Stroh", für den das Reduktionspotenzial für mehrere Nutzungspfade berechnet wurde (als Pellets in Hausfeuerungsanlagen oder als Ballen zur Strom- und Wärmebereitstellung in Großanlagen). Von diesem Reststoff darf zur Bestimmung des Endergebnisses nur ein Pfad berücksichtigt werden.

Die Höhe der möglichen Klimagasminderung ist von der Art der End- bzw. Nutzenergie abhängig, die durch den Endenergieträger bereitgestellt werden soll. Werden z. B. Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen zur ausschließlichen Erzeugung von Wärme verbrannt, ist das Minderungspotenzial geringer, als wenn entweder nur Strom oder auch Strom und Wärme im KWK-Betrieb erzeugt werden.

Die Minderungspotenziale verringern sich in vielen Nutzungsbereichen, wenn die aktuellen Werte mit den Werten für 2010 verglichen werden. Diese Entwicklung lässt sich durch die Verbesserung des konventionellen Energiemixes erklären. Die Emissionen, die z.B. durch den Strommix verursacht werden, verringern sich bis 2010 z. B. aufgrund von Wirkungsgradverbesserungen stärker als die Emissionen der Bioenergieträger, welche bereits auf einem sehr niederen Niveau sind und damit Wirkungsgradverbesserungen bei Anlagen mit Biomassenutzung, in absoluten Zahlen ausgedrückt, eine geringere Auswirkung haben. Damit können je Energieeinheit künftig weniger Emissionen mit heute bereits genutzten Bioenergieträgern im Vergleich zum konventionellen System eingespart werden als in der Gegenwart. Da aber auch bei der Nutzung der Bioenergieträger technische Fortschritte eintreten, kommen neu oder besser zu nutzende biogene Brennstoffe hinzu. So kann Stroh im Jahr 2010 stärker zur Erzeugung von Energie in Form von Wärme oder Strom eingesetzt werden als zurzeit. Damit wird im Vergleich zu heute ein zusätzliches biogenes Energieträgerpotenzial erschlossen.

Tab. 8-2: Maximales jährliches Minderungspotenzial für Klimagasemissionen durch Biomasse nach Energieträgern und Einsatzart in Deutschland (Energiepflanzen auf 2 Mio Hektar Anbaufläche, Reststoffe max. möglicher Anfall) *[Quelle: Eigene Berechnungen]*

Rohstoff			Sekundär-Energieträger	End- oder Nutzenergie	Minderungspotenzial für Klimagase [Mio. t]	
					2005	2010
Rohstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion (jeweils 2 Mio ha)	**Festbrennstoffe**	Holz (Kurz-umtriebsplantage)	**Hackschnitzel**	Wärme Strom Wärme + Strom	13,1 15,2 **17,2**	11,6 12,6 **14,6**
		Weizen (Ganzpflanzen)	**Ganzpflanzen-ballen**	Wärme Strom Wärme + Strom	noch keine Nutzung	9,5 8,0 10,3
		Roggen (Ganzpflanzen)	**Ganzpflanzen-ballen**	Wärme Strom Wärme + Strom	noch keine Nutzung	9,4 7,8 10,1
		Triticale (Ganzpflanzen)	**Ganzpflanzen-ballen**	Wärme Strom Wärme + Strom	noch keine Nutzung	8,1 6,8 8,8
	Flüssige Brennnstoffe	Weizen (Korn)	**Ethanol**	Kraftstoff E5	0,69	1,79
		Roggen (Kornertrag)	**Ethanol**	Kraftstoff E5	0,46	1,19
		Triticale (Korn)	**Ethanol**	Kraftstoff E5	0,56	1,45
		Zuckerrüben	**Ethanol**	Kraftstoff E5	10,27	10,52
		Raps (Korn)	**Biodiesel**	Kraftstoff	4,91	4,90
		Sonnenblumen [1)] (Kerne)	**Biodiesel**	Kraftstoff	0,12	0,12
	Biogas	Silomais (Ganzpflanzen)	**Biogas**	Wärme Strom Wärme + Strom	geringe Nutzung 12,5 **14,2**	**13,6** 9,9 11,5
Reststoffe		Wald-, Gebraucht-, Industrierestholz	**Hackschnitzel Scheitholz**	Wärme Strom Wärme + Strom	**10,7** 9,7 10,1	**10,7** 8,3 8,7
		Industrierestholz	**Pellets**	Wärme	**0,13**	**0,13**
		Stroh	**Pellets**	Wärme	noch keine Nutzung	**9,6**
			Ballen	Wärme Strom Wärme + Strom	noch keine Nutzung	7,0 6,3 7,2
		Gülle und Tierexkremente	**Biogas**	Wärme Strom Wärme + Strom	geringe Nutzung 15,4 **17,6**	**21,8** 18,2 21,2
gewichtete Summe der farbig hinterlegten Einträge					*45,5*	*56,8*

1) Für den Anbau von Sonnenblumen wurde nur eine Anbaufläche von 80.000 ha angenommen.

Für die Ermittlung des maximalen Minderungspotenzials berücksichtigte Energiepflanzen und Nutzungspfade.

Für die Ermittlung des maximalen Minderungspotenzials berücksichtigte Reststoffe und Nutzungspfade.

Zur Bestimmung des **maximalen Minderungspotenzials** werden aus dem Bereich der landwirtschaftlich zu produzierenden Energieträger diejenigen Energiepflanzen und dem zugehörigen Nutzungspfad ausgewählt, mit denen die höchsten Klimagasminderungen verbunden sind. Zu diesem Wert werden jeweils die höchst möglichen Klimagasminderungen aus dem Bereich der Reststoffe hinzuaddiert. Die entsprechenden Werte zur Ermittlung des maximalen Minderungspotenzials sind in Tab. 8-2 farbig markiert. Für das maximale Minderungspotenzial ergibt sich folgende Situation bei den Nutzungsmöglichkeiten für Biomasse:

- **Energiepflanzen**
  Die Stromgewinnung im KWK-Betrieb sowohl durch Holzhackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen als auch durch Biogas aus Maissilage sind mit ähnlich großen Klimagasminderungen verbunden. Für das Minderungspotenzial wird unter Berücksichtigung einer möglichst hohen Artenvielfalt im Pflanzenbau davon ausgegangen, dass auf der zur Verfügung stehenden Fläche jeweils zur Hälfte Mais und Holz angebaut wird.
- **Reststoffe**
  Beim maximalen Minderungspotenzial werden die Wärmegewinnung aus Rest- und Gebrauchthölzern sowie Holzpellets aus Industrierestholz berücksichtigt. Hinzu kommt die Stromerzeugung im KWK-Betrieb durch Biogasnutzung auf Basis von Gülle und Tierexkrementen.

Für das Jahr **2010** sind die relevanten Nutzungspfade größtenteils die gleichen, im Bereich der Reststoffnutzung kann durch eine Wärmegewinnung aus in das Erdgasnetz eingespeistem Biogas aber eine höhere Klimagaseinsparung erreicht werden als durch eine reine Stromerzeugung. Hinzu kommt außerdem die Wärmebereitstellung durch Strohpellets. Der Vorteil der Wärmebereitstellung von Strohpellets gegenüber Strohballen liegt im höheren Wirkungsgrad der Feuerungsanlagen.

In Abb. 8-1 sind die maximal möglichen Klimagasminderungen für die Jahre 2005 und 2010 nach Bioenergieträgern im Überblick dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung leitet sich ab, dass die in Deutschland für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehende Anbaufläche aus Gründen des Klimaschutzes am besten mit Holz oder Mais bebaut werden sollte. Durch diese zwei Energiepflanzenarten lassen sich die höchsten Klimagasminderungen erzielen. Das insgesamt mögliche Minderungspotenzial an Klimagasen beträgt ca. 45,1 Mio. t im Jahr

2005 und steigt bis 2010 durch die zusätzliche Nutzung des Strohpotenzials auf ca. 56,8 Mio. t an. Werden diese Klimagasminderungen mit den Gesamtemissionen des deutschen Energiesystems von 2000 (982 Mio. t Klimagase) verglichen, so ließen sich durch den Einsatz von biogenen Energieträgern in Form von angebauten Energiepflanzen und Reststoffen 2005 rund 5 % und 2010 rund 6 % der klimarelevanten Emissionen einsparen.

Dieses Minderungspotenzial stellt einen Maximalwert aufgrund der in dieser Studie gesetzten Annahmen und Randbedingungen dar. Über den Einsatz einer jeweiligen Option zur Bereitstellung von Nutzenergie aus Biomasse entscheiden letztendlich die Verbraucher aufgrund der politischen Rahmenbedingungen. Gewohnheit, Bequemlichkeit und vor allem die Kosten sind hierbei wichtige Faktoren. Dies kann durch die Politik in großem Umfang beeinflusst werden, etwa durch die Vorgabe von Minderungszielen für die Klimagasemissionen oder auch eine Strategie zur Verringerung der Energieimportabhängigkeit.

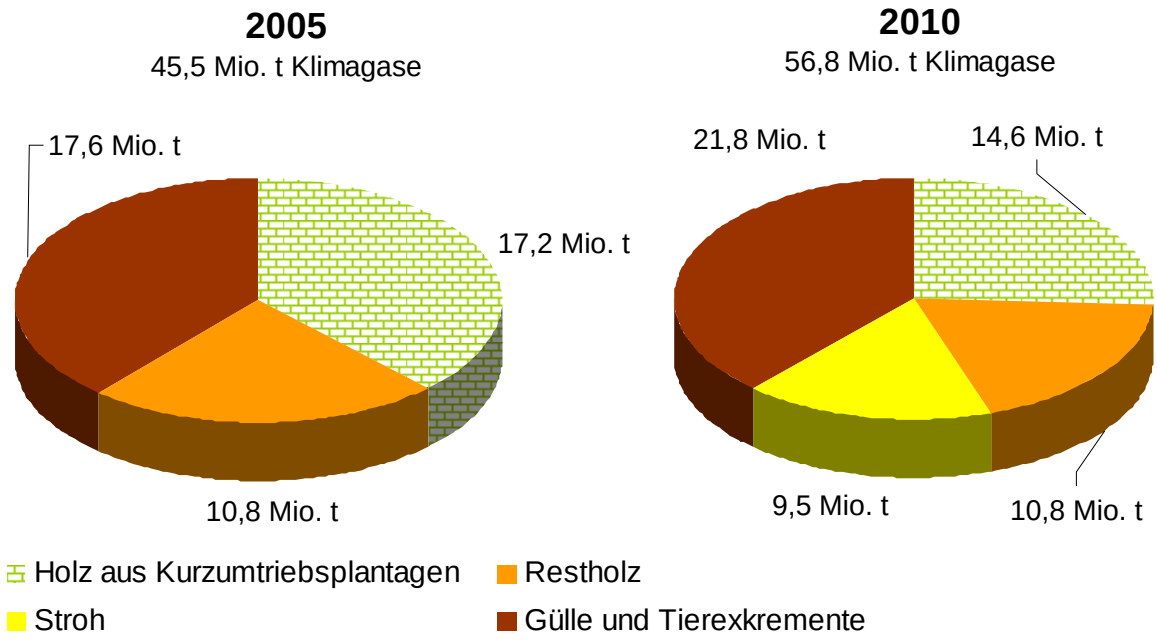


Abb. 8-1: Theoretisch mögliche Klimagasminderung durch die energetische Nutzung von Biomasse in den Jahren 2005 und 2010
[Quelle: Eigene Berechnungen]

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Deutschland werden im Zusammenhang mit der Energieversorgung die **Ziele einer wirtschaftlichen, sicheren und umweltverträglichen Versorgung** verfolgt. Eine tragfähige Perspektive für eine nachhaltige Energiepolitik für den Standort Deutschland muss an diesen drei gleichrangigen Zielen ausgerichtet werden. Die **Gleichrangigkeit dieser Ziele** muss auch beim künftigen Energiemix beachtet und eine adäquate Balance zwischen diesen Zielen gefunden werden.

Vor dem Hintergrund dieser energiewirtschaftlichen Ziele einerseits und der zunehmenden **Importabhängigkeit**, hohen **Energiepreisen** und Verpflichtungen zur **Klimagasminderung** andererseits steht Deutschland vor großen Herausforderungen. In Bezug auf die Klimagasminderung in der ersten Verpflichtungsperiode (2008/2012) befindet sich Deutschland auf einem guten Weg und wird die Minderungsziele wohl erreichen. Für weitere und deutlich höhere Minderungsziele sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen über die derzeit absehbaren Entwicklungen hinaus erforderlich. Das Ziel der neuen Bundesregierung, eine CO_2-Minderung von 30 % bis 2020 im Vergleich zu 1990 bei entsprechenden Verpflichtungen auf Ebene der EU zu erreichen, würde unter gegenwärtigen Voraussetzungen wohl erst im Jahr 2030 erreicht /EWI 2005/.

Im Rahmen möglicher **Maßnahmen zur Klimagasminderung** in Deutschland stellt die Nutzung der erneuerbaren Energien neben Energieeinsparungs- und Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der klassischen Endenergieträger eine wichtige Option dar. Der Biomasse kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, da sie einerseits an traditionelle Nutzungsformen anknüpfen kann und anderseits noch große ungenutzte Potenziale in ganz Deutschland verfügbar sind.

Die vorliegende Studie ist der Frage nachgegangen: „**Welchen Beitrag kann die Biomasse zum Klimaschutz leisten?**“, um aufzuzeigen, welchen Stellenwert die Biomassenutzung in Strategien zum Klimaschutz einnehmen kann. Hierzu wurden vor allem folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Ermittlung der Klimagasemissionen der biogenen und substituierbaren fossilen Energieträger. Hierbei wurde der komplette Pfad von der Gewinnung bzw. vom Pflanzenanbau bis zur Nutzung beim Endverbraucher einschließlich der mit den Nutzungsanlagen verbundenen Klimagasemissionen berücksichtigt.

- Bestimmung der für die Biomassenutzung verfügbaren Potenziale und deren möglicher Beitrag zur Klimagasminderung mit einem Zeithorizont bis 2010.

Die zur Verfügung stehende Biomasse ergibt sich einerseits aus biogenen Reststoffen und anderseits aus nachwachsenden Energiepflanzen auf nicht für die Lebensmittelproduktion notwendigen Ackerflächen. Die in der Untersuchung berücksichtigten Biomassepfade sind im Überblick in Abb. 9-1 dargestellt.

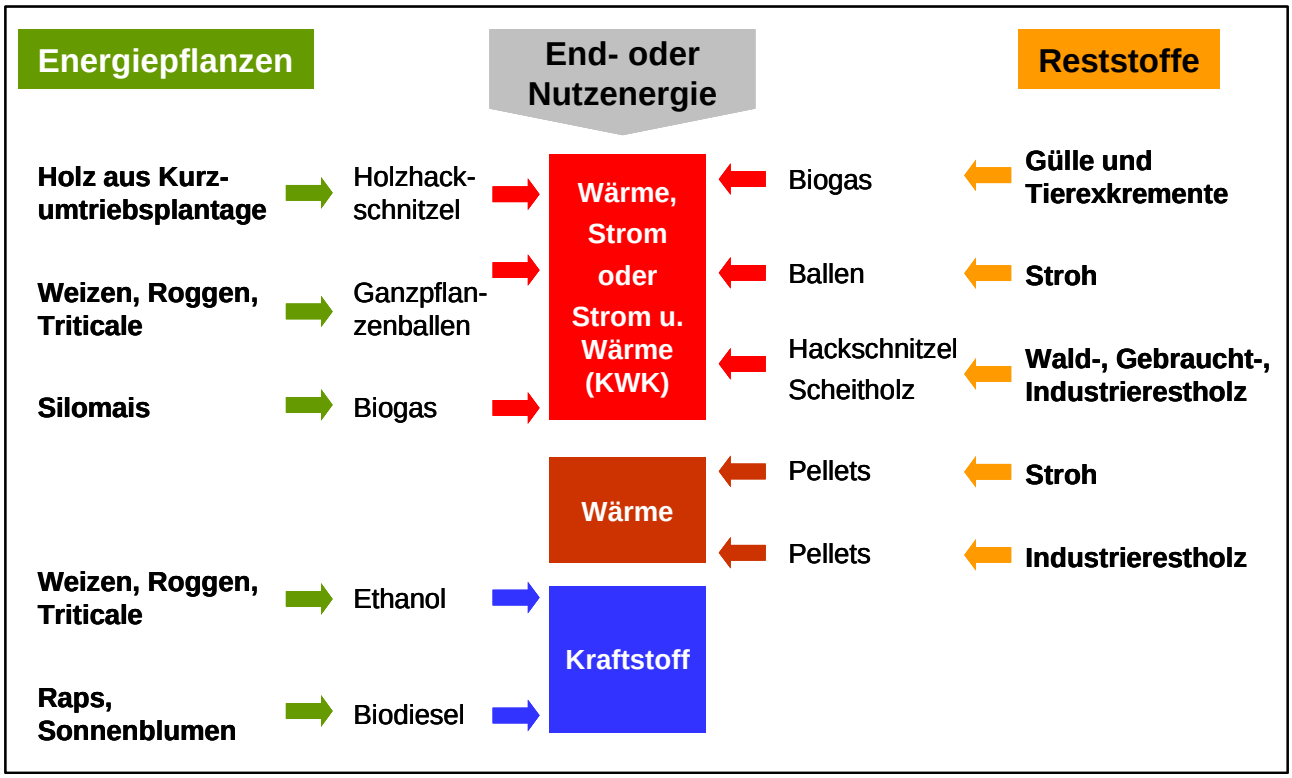


Abb. 9-1: Übersicht der betrachteten Nutzungspfade biogener Energieträger

Obwohl das bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte Kohlendioxid (CO_2) als klimaneutral gilt, da es zuvor von der Biomasse beim Wachstum der Atmosphäre entzogen wurde, ist die Biomassenutzung nicht gänzlich ohne die Freisetzung von Klimagasen möglich. So ist zum Beispiel mit dem Biomasseanbau (Düngung) und notwendigen Transportaufwendungen, aber auch dem entsprechenden Bau der Nutzungstechnologien die Freisetzung von Klimagasen verbunden. Die sich hieraus ergebenden Klimagasemissionen differieren zwischen den unterschiedlichen Biomassearten und der jeweils gewählten Nutzungsform (Wärme-, Strom- oder Kraftstoffbereitstellung). Die sich aus dem gesamten Nutzungspfad einschließlich Anlagentechnologie ergebenden Klimagasemissionen werden nachfolgend dargestellt und mit den fossilen Nutzungstechnologien verglichen.

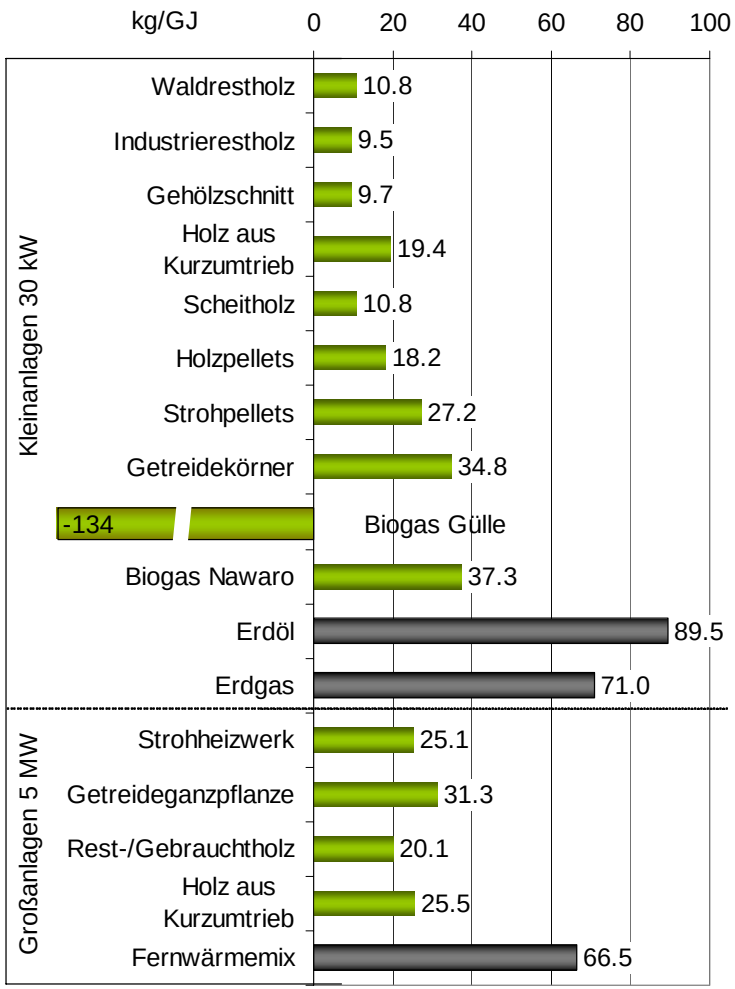


Abb. 9-2: Klimagasemissionen der Wärmebereitstellung in 2010 *[Quelle: Eigene Berechnungen]*

Klimagasemissionen bei der Wärmebereitstellung

Bei der Wärmebereitstellung (Abb. 9-2) mit Biomasse weisen die auf Holz basierenden Bioenergieträger in der Regel die geringsten Klimagasemissionen auf, da hier vor allem geringere Emissionen aus der Düngung entstehen.

Hinzuweisen ist auf die negativen Klimagasemissionen beim Einsatz von Gülle zur Biogasproduktion. Wird Gülle direkt als Dünger auf die Ackerflächen aufgebracht, wird durch den mikrobiologischen Abbau das Klimagas Methan freigesetzt. Wird hingegen erst Biogas aus Gülle erzeugt, wird das Methan „aufgefangen“ und energetisch genutzt. Der verbleibende Gärrest aus der Biogasgewinnung hat gute Düngereigenschaften und eine erheblich geringere Klimarelevanz als Gülle.

Die Biomassenutzung in Kleinanlagen hat tendenziell geringere Klimagasemissionen als beim Einsatz in Großanlagen.

Im Vergleich mit den Nutzungstechnologien auf Basis fossiler Energieträger können mit der Biomassenutzung etwa 40 bis 90 % der Klimagasemissionen vermieden werden[15].

[15] Ohne Berücksichtigung der Biogaserzeugung auf Basis von Gülle.

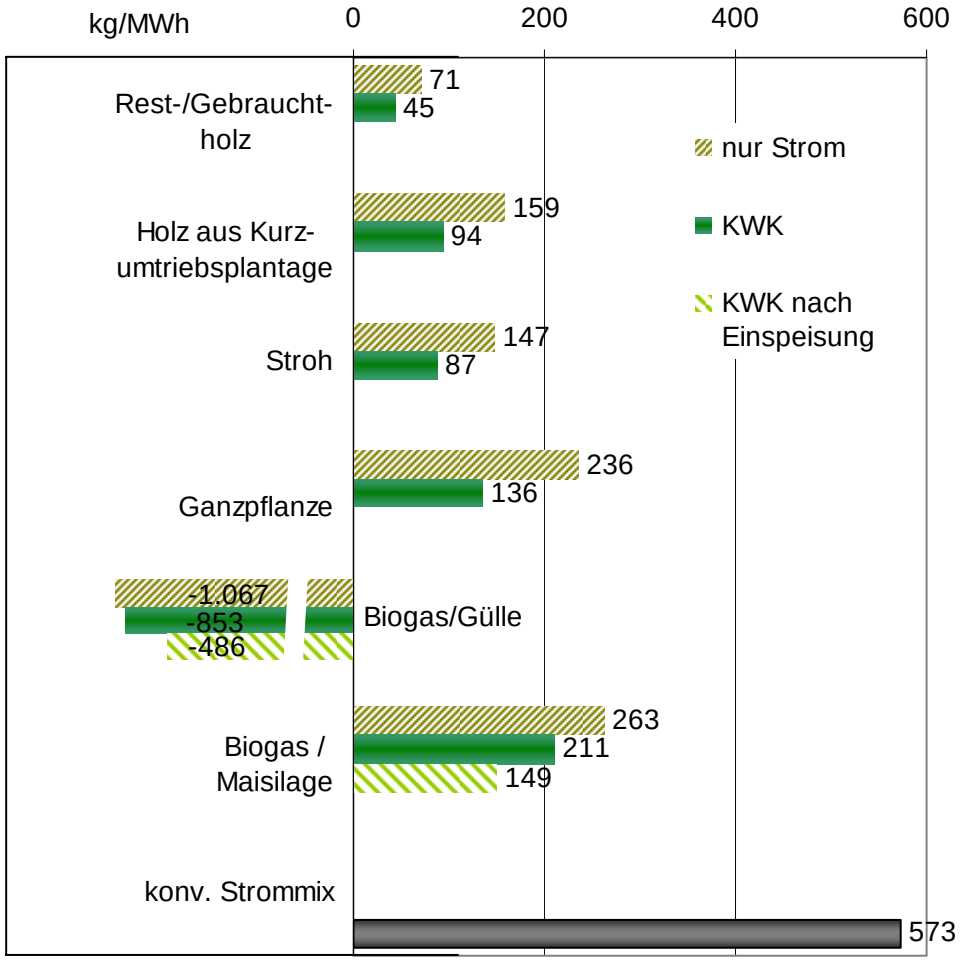


Abb. 9-3: Klimagasemissionen der Strombereitstellung in 2010 *[Quelle: Eigene Berechnungen]*

Klimagasemissionen bei der Strombereitstellung

Für die Strombereitstellung auf Basis von Biomasse wurden

- die ausschließliche Stromerzeugung,
- eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) am Anlagenstandort und
- die Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz sowie eine räumlich getrennte Strom- und Wärmeerzeugung (KWK)

untersucht (Abb. 9-3).

Erwartungsgemäß führt die KWK-Nutzung zu den geringsten Klimagasemissionen. Die Einspeisung des Biogases in das Erdgasnetz und KWK-Nutzung in Verbrauchernähe führt zu weiteren Klimagasminderungen, da hierbei ein größerer Anteil an Wärme genutzt werden kann und dadurch die zusätzlichen Emissionen für die Aufbereitung zu Erdgasqualität mehr als ausgeglichen werden.

Im Vergleich zum deutschen Strommix liegen die Klimagasemissionen bei der Biomassenutzung etwa um 50 bis 90 % niedriger.[16]

[16] Ohne Berücksichtigung der Biogaserzeugung auf Basis von Gülle.

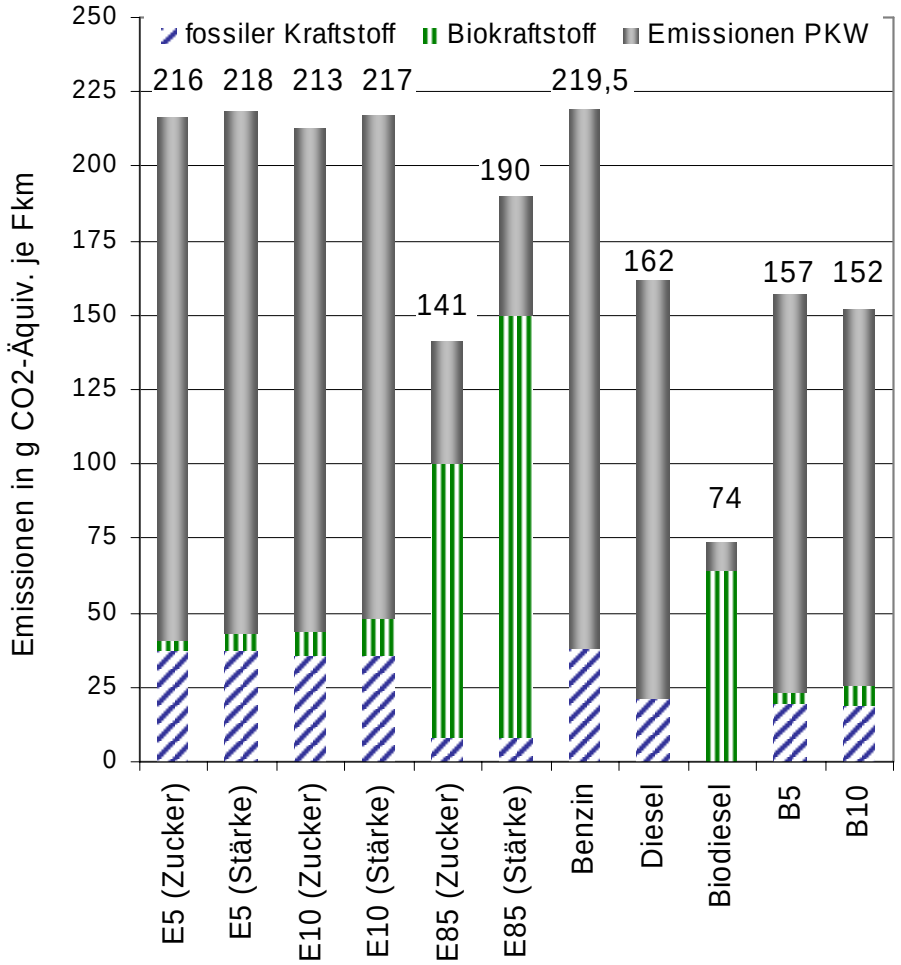


Abb. 9-4: Klimagasemissionen der Kraftstofferzeugung in 2010 *[Quelle: Eigene Berechnungen]*

Klimagasemissionen bei der Kraftstoffbereitstellung

Für die Kraftstoffbereitstellung aus Biomasse wurden die beiden Nutzungspfade

- Beimischung von Bioethanol zum Benzin,
- Beimischung von Biodiesel zum Diesel und Biodiesel

untersucht und mit ausschließlich auf Mineralöl basierenden Kraftstoffen verglichen. Hinsichtlich des Bioethanoleinsatzes wurden zudem die bereits heute zum Teil genutzte Beimischung von 5 Volumenprozent (E5) sowie die perspektivisch 2010 denkbaren Anteile von 10 und 85 Volumenprozent (E10 bzw. E85) von Bioethanol am Benzin berücksichtigt. Heute werden bereits vom Automobilhersteller Ford in Schweden Fahrzeuge angeboten, deren Motoren auf die Nutzung entsprechend hoher Bioethanolanteile ausgelegt sind. Beim Biodieseleinsatz wurden B5, B10 und B100 berücksichtigt.

Die Klimagasemissionen für die Bioethanolnutzung bei E5 und E10 zeigen relativ geringe Unterschiede zwischen der Bereitstellung auf Basis von zucker- bzw. stärkebasierten Energiepflanzen, wobei stärkebasierte Biotreibstoffe höhere Klimagasemissionen aufweisen (Abb. 9-4).

Im Vergleich zum mineralölbasierten Benzin wird nur mit einem Bioethanolanteil von 85 % (E85 aus Zucker) eine deutliche Minderung der Klimagasemissionen (ca. 36 %) erreicht. Die Beimischung von 5 Volumenprozent (E5) hat lediglich eine Klimagasminderung von ca. 1,5 % zur Folge.

Durch den Einsatz von Biodiesel lassen sich trotz der Emissionen aus der Produktionskette, welche mit einer Reihe von Klimagasemissionen verbunden ist, u. a. wegen Emissionen bei der landwirtschaftlichen Produktion, im Vergleich zu mineralölbasiertem Diesel etwa 54 % der Klimagasemissionen einsparen. Die Nutzung von B5 und B10 spart etwa 3 bzw. 6 % der Klimagasemissionen ein.

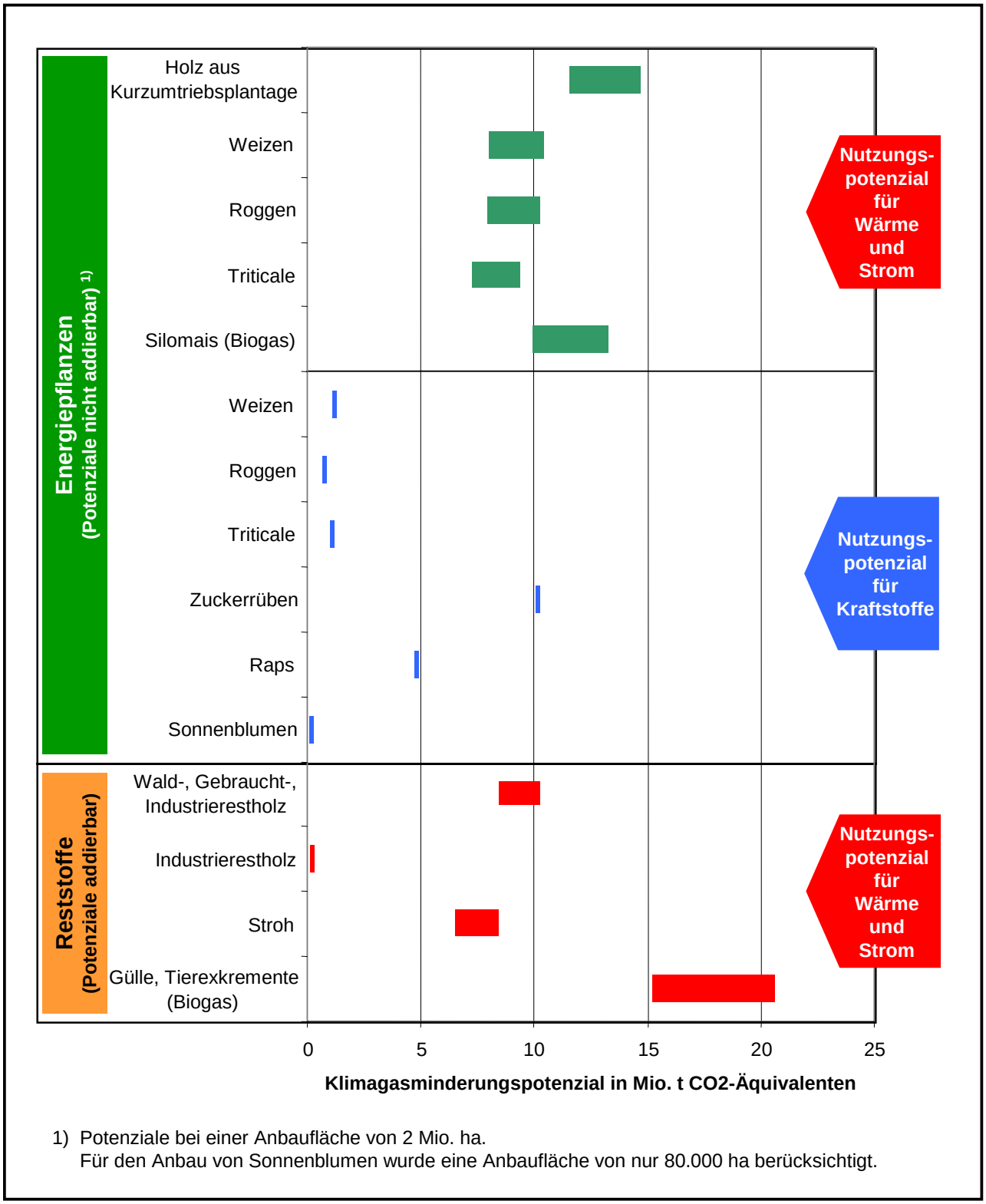
Die Minderungseffekte für Klimagasemissionen sind im Kraftstoffsektor mittels Biomasse deutlich niedriger als bei der Bereitstellung von Wärme und Strom.

Ausgehend von den ermittelten Klimagasemissionen für die verschiedenen Möglichkeiten zur Biomassenutzung wurden abschließend die jeweils damit verbundnen **Potenziale zur Klimagasminderung** berechnet. Bei den Potenzialen sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

- Der Anfall der biogenen Reststoffe (u. a. Holzreste, Stroh und Gülle) ist nur wenig beeinflussbar und abhängig von der land- und forstwirtschaftlichen Produktion bzw. steht im Zusammenhang mit der holzverarbeitenden Industrie.
- Die **Energiepflanzenproduktion** ist eng verbunden mit den dafür zur Verfügung stehenden Ackerflächen. In dieser Studie wurde von einer verfügbaren Anbaufläche von 2 Mio. ha – entsprechend 17 % der Ackerfläche in Deutschland – ausgegangen. Diese Flächenreserve ist für den Energiepflanzenanbau ein limitierender Faktor. Perspektivisch ist allerdings davon auszugehen, dass u. a. durch weitere Ertragssteigerungen und den Abbau von Exportsubventionen für landwirtschaftliche Produkte die für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehenden Ackerflächen zunehmen werden. Für den längerfristigen Zeithorizont bis 2020 könnte eine Fläche von bis zu 4 bis 6 Mio. ha zur Verfügung stehen /IE 2005a/.

Die mit der Biomassenutzung möglichen Klimagasminderungen liegen bei der **landwirtschaftlichen Produktion von Energiepflanzen** bei fast 15 Mio. t im Jahr 2010 (Abb. 9-5). Neben dem sehr unterschiedlichen Beitrag der einzelnen Biomassen wird

die Höhe zudem durch den Nutzungspfad wie ausschließlicher Wärmeproduktion oder Strom- und Wärmeproduktion (KWK) deutlicht beeinflusst.



1) Potenziale bei einer Anbaufläche von 2 Mio. ha.
Für den Anbau von Sonnenblumen wurde eine Anbaufläche von nur 80.000 ha berücksichtigt.

Abb. 9-5: Bandbreite des Minderungspotenzials für Klimagasemissionen durch Biomasse im Jahr 2010
[Quelle: Eigene Berechnungen]

Die für die landwirtschaftliche Produktion von Biomasse zur Energienutzung angenommenen 2 Mio. ha können nur einmalig genutzt werden, so dass die ausgewiesenen Minderungspotenziale bei den Energiepflanzen nicht addiert werden können. Bei der **Nutzung der biogenen Reststoffe** ist hingegen eine Addition der ausgewiesenen Minderungspotenziale möglich, so dass sich hier ein Minderungspotenzial von fast 42 Mio. t ergibt.

Würde ein ausschließlich an den Minderungspotenzialen orientierter Biomasseanbau stattfinden, stellen zum Beispiel der Anbau von Mais zur Biogasproduktion und der Holzanbau in Kurzumtriebsplantagen mit Hackschnitzelproduktion eine viel versprechende Option dar. Beide Optionen sind annähernd gleichwertig und führen im Falle einer gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung zu den größten Klimagasminderungen. Die Nutzung anderer Energiepflanzen gleichfalls zur Strom-, Wärme- oder Kraftstoffproduktion hätte zum Teil deutlich geringere Klimagasminderungen zur Folge.

Die **Nutzung der maximalen Potenziale** von biogenen Reststoffen und Energiepflanzen könnte einen **Beitrag zur Klimagasminderung** von ca. 57 Mio. t im Jahr 2010 leisten. Bezogen auf die Klimagasemissionen im Jahr 2000 (982 Mio. t) ließe sich somit eine Minderung um etwa. 6 % realisieren. Dieses Minderungspotenzial kann als Orientierungswert für die Ausformung klimapolitischer Strategien angesehen werden und erfordert unter verschiedenen Aspekten eine **Bewertung**:

- In Bezug auf den **Energiepflanzenanbau** wird sich in der Realität ein optimierter Anbau mit ausschließlicher Ausrichtung auf die höchsten Beiträge zur Klimagasminderung mit der Folge großflächiger deutschlandweiter Monokulturen wohl nicht durchsetzen. Es wird sich aufgrund der Wettbewerbsfähigkeit der jeweiligen Kulturarten in der Fruchtfolge und des Wettbewerbs zwischen Nahrungsmittel- und Energiepflanzenproduktion – zum Teil auch in Abhängigkeit von bestehenden und sich entwickelnden Teilmärkten – ein Biomassemix einstellen. Auch unter dem Aspekt einer nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft wird nur ein Mix von unterschiedlichen Energiepflanzen zielführend sein. Zudem sind für die Erreichung energiepolitischer Ziele wie die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Kraftstoffversorgung nicht alle Biomassepotenziale gegenwärtig gleichermaßen geeignet.
- Die **biogenen Energiemärkte** befinden sich noch in einem dynamischen Orientierungs- und Aufbauprozess, so dass sie erst längerfristig zu einem größe-

ren Anteil zur klimaschonenden Energieversorgung beitragen können. Hier bieten sich allerdings längerfristig auch weitaus größere Potenziale als hier für das Jahr 2010 ausgewiesen. Mit der Aktivierung weiterer Ackerflächen, die langfristig nicht mehr für die Lebensmittelproduktion gebraucht werden, und verbunden mit Ertragssteigerungen beim Pflanzenanbau ist vor allem nach 2010 von deutlich höheren Potenzialen der Biomasse zur Klimagasminderung auszugehen.

- Nur ein **Zusammenspiel unterschiedlicher Maßnahmen** sichert die Energieversorgung des Landes, wird den Anstieg der Importabhängigkeit mindern und auf lange Sicht die Kosten der Energieversorgung stabilisieren helfen. Die technischen Entwicklungen sowohl im klassischen Energiesektor – wie etwa clean-coal-Technologien mit CO_2-Sequestierung – als auch bei den erneuerbaren Energien, welche sich gegenseitig durch Synergien fördern, sorgen durch Technologieexporte und die Schaffung neuer Arbeitsplätze außerdem für eine Stärkung des Standorts Deutschland.

Die Energieversorgung eines Landes muss auf einem soliden Fundament aufgebaut werden, das auch längerfristig einen verlässlichen Rahmen für alle Akteure aus Unternehmen und Politik darstellt. In der Energiewirtschaft sind Investitionsentscheidungen zu treffen, die auch über Wahlperioden hinaus Bestand haben müssen. Das gilt gleichermaßen für Investitionen in fossile, nukleare und erneuerbare Energietechnologien. Daher sollte sich die Energiepolitik an nachfolgenden **Leitlinien für den Energiemix der Zukunft** orientieren:

- Der Energiemix der Zukunft muss an den **gleichrangigen Zielen** einer sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Versorgung ausgerichtet sein. Im Sinne einer sozialverträglichen Versorgung sind Akzeptanzaspekte zu berücksichtigen.
- Die Nutzung aller **heimischen Energieressourcen** – hierzu gehören vor allem Braun- und Steinkohle sowie erneuerbare Energien – ist eine wesentliche Grundlage für eine sichere Versorgung. Es ist daher sinnvoll, die bestehenden Optionen sinnvoll zu nutzen und in einem strategisch ausgerichteten Energieträgermix zu berücksichtigen.
- Die **Balance** zwischen den energiepolitischen Zielen war und ist immer eine Gratwanderung. Diese Balance erfordert einen dynamischen Anpassungsprozess an sich ändernde Rahmenbedingungen. Nur bei einem ausgewogenen Energiemix, bei dem kein Energieträger ausgeschlossen wird, können die Vor- und Nachteile

der einzelnen Energieträger in ihrer Kombination zur Erfüllung des energiepolitischen Zieldreiecks beitragen.

Möglich wird eine derartige Entwicklung durch eine Fortführung der **F&E-Begleitung bzw. Forschungskoordinierung** und **Innovationsförderung** bei den nachwachsenden Rohstoffen sowie den klassischen Energieträgern. Für die Biomasseanwendung stehen ausgereifte und für die Verbraucher anwendungsfreundliche Nutzungstechnologien zur Verfügung. Unabhängig davon, dass bei vorhandenen Verfahren und Technologien zur Biomassenutzung immer ein Optimierungspotenzial besteht, wären unter dem Blickwinkel der vollständigen Potenzialerschließung künftig in größerem Maße technologische Verbesserungen vor allem in folgenden Bereichen notwendig:

- Entwicklung der Anlagen zur Nutzung von Stroh und Getreideganzpflanzen.
- Positive Effekte könnten zudem durch die Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten für Biogas geschaffen werden, indem eine Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz ermöglicht wird.
- Die technischen Nutzungsmöglichkeiten fester Biomasse für den Kraftstoffsektor stehen erst am Anfang. Hier ist noch ein erhebliches Forschungspotenzial vorhanden. Unter dem Aspekt der großen Importabhängigkeit bei Mineralöl von annähernd 100 % kann perspektivisch hier auch ein Beitrag zur Versorgungssicherheit geleistet werden.
- Im Hinblick auf den Energiepflanzenanbau lassen sich durch die Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen besonders hohe Klimagasminderungen erzielen. Um diesen Nutzungspfad der Biomasse zu entwickeln, erscheint jedenfalls anfänglich eine Förderung für den Anbau auf Stilllegungsflächen der Landwirtschaft sinnvoll. Neue Anbausysteme und -kulturen können zudem zu einer Ertragserhöhung bei allen Biomassefraktionen beitragen und entsprechende Entwicklungen wären zu fördern.
- Die energetische Nutzung von Biomasse kann einen wachsenden Beitrag zur Energieversorgung und Klimagasminderung leisten. Hierzu fehlen allerdings noch geeignete und systemübergreifende Konzepte zur Integration in das Energiesystem.

Anhang

Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Vollständige Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland von 1991 bis 1999 und vorläufige Energiebilanzen für 2000 bis 2002 sowie Auswertungstabellen bis 2005.

Nitzschke, V.; Barth, D.: Agrilexikon. information.medien.agrar e. V., Bonn 2004.

AIECE: Vereinigung Europäischer Konjunkturinstitute: Pressemitteilung "World Commodity Prices 2005 to mid 2007". Datum der Veröffentlichung unbekannt.

ASUE: Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Broschüren zur KWK-Nutzung, Kaiserslautern, 2001.

Altholzverordnung: Verordnung über die Entsorgung von Altholz, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2002, Berlin.

BAFA 2005: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Download der monatlichen Mineralölstatistiken (www.bafa.de). Eschborn, Oktober 2005.

BGR 2003: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2002. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Heft XXVIII. Hannover 2003.

BGR 2004: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2003. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Heft XXVII. Hannover 2004.

Biomassenutzungsstrategien: Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext, 2. Zwischenbericht, Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, 2004.

BMU: Erste vorläufige Abschätzung zur Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2004 in Deutschland, Stand Februar 2005, Internet-Zugriffsdatum: 21.02.2005.

BMWA 2003: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit: Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke. Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppe. Berlin 2003.

BMWA 2004: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit: Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung 2004/2005, Download http://www.bmwa.bund.de.

BMWi 2006: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung (Stand Mai 2006), Download http://www.bmwi.bund.de.

BMVEL 2002: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Agenda 2000 – Pflanzlicher Bereich, Agrarumweltmaßnahmen. Bonn 2002.

BMVEL 2005: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft: Meilensteine der Agrarpolitik, Umsetzung der europäischen Agrarreform in Deutschland, Berlin 2005.

Bockey, D: Persönliche Mitteilung, ufop, Berlin, Februar 2005.

ecoinvent: Swiss Centre for Life Cycle Inventories: The Life Cycle Inventory Data Version 1.1. 2004.

DSV 2005: Deutsche Saatveredelung AG, Innovationen 2/2005, Raps-Spezial, Gelsenkirchen, 2005.

EIA 2004a: Energy Information Administration: Short Term Energy Outlook and Winter Fuels Outlook. Washington, Oktober 2005.

EIA 2004b: Energy Information Administration: Annual Energy Outlook 2005 with Projections to 2025. Washington 2005.

ERI 2001: Energieressourcen-Institut e.V.; Prognos AG: Position der Braunkohle in einer nachhaltigen Energiepolitik. Cottbus/Berlin 2001.

EU 2000: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Grünbuch – Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit. Brüssel 2000.

EU 2003a: European Commission – Directorate-General for Energy and Transport: European Energy and Transport Trends to 2003. Brüssel 2003.

EU 2003b: European Commission: World Energy Technology and Climate Policy Outlook 2030. Brüssel 2003.

EU 2003c: European Commission : Climate Policy Outlook 2030. Brüssel 2003.

EU-Kraftstoffdirektive 98/70/EG: Direktive über die Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen, Europäisches Parlament, Brüssel 1998.

EWI 2005: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln; Prognos AG: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Köln/Basel 2005.

FAO: Food And Agriculture Organization Of The United Nations, Statistik zu Anbauflächen und Produktionsmengen, Internetzugang: http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture.

Fischer, J.: Pellets in Deutschland: Markt, Technik, Praxis. Clean Energy Power Congress. Berlin, 26.01.2005.

FNR 2004: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow 2004.

Fortschrittsbericht 2004: Perspektiven für Deutschland, Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Veröffentlichung der Bundesregierung, Berlin, Oktober 2004.

Freibauer, A.; Kaltschmitt, M.: Gasförmige Stickstoffemissionen im Lebensweg von Getreide zur Energiebereitstellung. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 1998, Bd. 10/S.353-365.

Frühwald, A., Scharai-Rad, M.; Hasch, J.: Ökologische Bewertung von Holzwerkstoffen, Hamburg, 2000.

Gemis: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme, Untersuchung von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung, Öko-Institut e.V. und Gesamthochschule Kassel (GhK), 2004.**Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.):** Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 3. Münster 2002.

IE 2003: Institut für Energetik und Umwelt: Monitoring zur Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) aus Umweltsicht. Leipzig, 2003.

IE 2004: Institut für Energetik und Umwelt: Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. 2. Zwischenbericht. Leipzig, 2004.

IE 2005: Institut für Energetik und Umwelt: Risiken bei Energierohstoffen. Leipzig, 2005.

IE 2005a: Institut für Energetik und Umwelt; Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre an der Universität Hohenheim; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft; Institut für Ökonomie, Hamburg; Öko-Institut, Darmstadt: Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext. Leipzig 2005, noch unveröffentlicht.

IEA 2004: International Energy Agency: World Energy Outlook 2004. Paris 2004.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Third Assessment Report (TAR). Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

ISO 14040: DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006.

ISO 14044: DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen Techniken und Verfahren. Berlin 2001.

Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G.A. (Hrsg.): Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung; Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1997.

Kaltschmitt, M.; Vogel, A.: Stand und Perspektiven der Energiegewinnung aus Biomasse. In: „EEG und Emissionshandel – Neue Chancen für Biomassenutzung und Abfallwirtschaft“. Schriftenreihe des Arbeitskreises für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen (ANS), Band 45. Braunschweig 2004.

Kaske, A.: Leistungen unterschiedlich bewirtschafteter Futterleguminosenbestände und deren Auswirkungen auf Ertrag und ausgewählte Kenngrößen des N-Haushaltes der Folgefrucht Winterweizen. Schriftenreihe Institut Pflanzenbau u. Pflanzenzüchtung Nr. 17. 2000.

KTBL 2002: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Betriebplanung 2002/2003, Darmstadt 2002.

Lenz, V.; Kaltschmitt, M. 2006: Erneuerbare Energien. In: BWK - Das Energiemagazin, 4/2006. Düsseldorf 2006.

MWV 2004: Mineralölwirtschaftsverband e. V.: Mineralölzahlen 2004, MWV-Prognose 2020 für die Bundesrepublik Deutschland, Hamburg, 14. Mai 2004.

MWV 2006: Mineralölwirtschaftsverband e. V.: Mineralölzahlen 2005, MWV-Prognose 2020 für die Bundesrepublik Deutschland, Hamburg, 2006.

Nill, M.: Die zukünftige Entwicklung von Stromerzeugungstechniken. Eine ökologische Analyse vor dem Hintergrund technischer und ökonomischer Zusammenhänge. Düsseldorf 2004.

Oechsner, H., A. LEMMER und C. NEUBERG, 2003: Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. In: Landtechnik, H. 3, 2003

Pflanzliche Erzeugung: Pflanzliche Erzeugung, Die Landwirtschaft Band 1, BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 1998.

Presseportal: BMVEL, Meilensteine der Agrarpolitik, Umsetzung der europäischen Agrarreform in Deutschland, Berlin, 2005.

Prognos 2004: Prognos AG; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung: Analyse der Wirksamkeit von CO_2-Minderungsmaßnahmen im Energiebereich und ihre Weiterentwicklung. Basel/Stuttgart 2004.

Retzlaff, K.: Persönliche Mitteilung. Verband der Biodieselanlagenbetreiber, Berlin, Februar 2005.

Richtlinie 2003/30/EG: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur "Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor", Brüssel, 2003.

Ristau, O.: Spanier liefern Bioethanol. neue energie 13 (2004), 3, S. 26.

Schmitz, N. (Hrsg.): Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 21. Münster 2003.

Schneider, S.; Kaltschmitt, M. 2005: Erneuerbare Energien. In: BWK - Das Energiemagazin, 4/2005. Düsseldorf 2005.

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2003. Wiesbaden, 2003.

TLL: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft: Energetische Verwertung von Getreide- und Halmgutpellets. Unveröffentlichter Endbericht im Auftrag der FNR. 2005.

UN 2004: United Nations (Timber Branch): Forest Products Statistics 1998-2002 (Provisional), Timber Bulletin ECE/TIM/BULL/56/2, www.unece.org/trade timber/database/fps98_02.xls - - Zugriff: 11.08.2004.

UFOP 2005: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., www.ufop.de, Zugriff Nov. 2005.

Vattenfall 2005: Vattenfall Europe AG: Vattenfall baut Pilotanlage für CO_2-freies Kraftwerk. Pressemitteilung und Presse-Charts vom 19. Mai 2005.

VDA: Verband der Automobilindustrie, www.vda.de, Frankfurt/M, 2005.

VDB: Biodieselvermarktung Deutschland und Europa; Detlef Evers; Mitglied des Vorstandes des VDB; 17.03.2005.

Vetter: Energiepflanzen aus anbautechnischer und ökonomischer Sicht; Dr. habil. Armin Vetter, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 2004

Viessmann: Internetbroschüre, VITOCROSSAL 300, 2005.

Volkswagen AG: Entwicklung neuer Motoren für synthetische Kraftstoffe. Pressemitteilung, Wolfsburg, 7. November 2003, (Zugriffsdatum: 22.02.2005).

Weber 2004: Bioethanol Herstellung in Deutschland und Brasilien - ein ökonomischer, ökologischer und technischer Vergleich; Michael Weber; Institut für Energetik und Umwelt 2004.

Wilfert, Schattauer 2002: Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Hannover/Leipzig, 2002.

Wittke, F.; Ziesing, H.-J.: Primärenergieverbrauch in Deutschland von hohen Energiepreissteigerungen und konjunktureller Belebung geprägt. In: DIW-Wochenbericht (72) 2005, 7, S. 117-130.

WBGU 2003: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Sequestierung von CO_2: Technologien, potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen. Heidelberg 2003.

Wuppertal 2004: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Klimagasemissionen des russischen Erdgas-Export-Pipeline-Systems. Wuppertal 2004.

Wuppertal 2005: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Band 2: Biomassepotenziale in Deutschland, Nutzungstechniken und ökonomisch-ökologische Bewertung ausgewählter Nutzungspfade Unveröffentlichter Endbericht im Auftrag von BGW und DVGW. 2005.

Definition ausgewählter Energiebegriffe

Zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurde bereits der Begriff „Energie“ (*griechisch: energeia = wirkende Kraft*) eingeführt. Mit diesem Begriff wird die Arbeitsfähigkeit eines technischen oder auch nichttechnischen Systems beschrieben. Die sogenannten **Hauptenergieformen** sind die

- mechanische,
- thermische,
- chemische,
- elektromagnetische sowie
- nukleare

Energie. Obwohl keine Energie verbraucht werden kann, wandelt sie sich doch mit jeder Aktivität in eine andere Energieform um. Für technische Zwecke sind aber nicht alle Energieformen gleichermaßen wertvoll.

Energie wird mittels Energieträgern transportiert oder gespeichert. Unter einem **Energieträger** wird ein Medium verstanden, aus dem direkt oder durch Umwandlung Energie bereitgestellt werden kann (z. B. Energierohstoffe wie Erdöl und Kohle oder die Sonnenstrahlung und Wasser).

Energiewandlungstechniken: Auf dem Weg von der Förderung eines Energierohstoffes bzw. eines Energieträgers bis zur gewünschten Dienstleistung beim Verbraucher entstehen verschiedene Umwandlungsverluste. Innerhalb dieser Energiewandlungskette steigt der wirtschaftliche bzw. technische Wert („Veredelung“) der Energie. Es wird zwischen verschiedenen Energieformen unterschieden (Abb. 0-1). Diese werden nachfolgend erläutert.

- **Primärenergie** sind alle Energien, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. Es wird zwischen den an menschlichen Maßstäben gemessen unerschöpflichen bzw. erneuerbaren (z. B. Solarstrahlung, Windenergie) sowie den erschöpflichen nuklearen und fossilen Energien (z. B. Rohsteinkohle, Rohöl) unterschieden.
- Die **Sekundärenergie** wird durch einen oder mehrere Umwandlungsprozesse aus Primärenergie gewonnen. Je nach späterem Verwendungszweck wird mit diesen Prozessen eine weitere Anwendung und Verteilung vereinfacht oder erst ermöglicht. Dieser Veredelungsprozess von der Primär- zur Sekundärenergie ist mit Umwandlungsverlusten verbunden (z. B. Abwärmeverluste bei der Stromerzeugung).

- Nach Abzug der Transportverluste steht die **Endenergie** beim Endverbraucher zur Verfügung. Die Endenergie umfasst nur die gehandelten Energien, die der Erzeugung bzw. Umwandlung von Nutzenergie dienen (z. B. Fernwärme, Holzpellets).
- Als **Nutzenergie** wird letztlich die Energieform bezeichnet, die der Verbraucher benötigt. Dazu zählen z. B. Wärme, Antriebsenergie und Licht. Die Nutzenergie muss in der Regel zeitgleich und am Ort des Bedarfs verlustbehaftet aus Endenergie erzeugt werden.

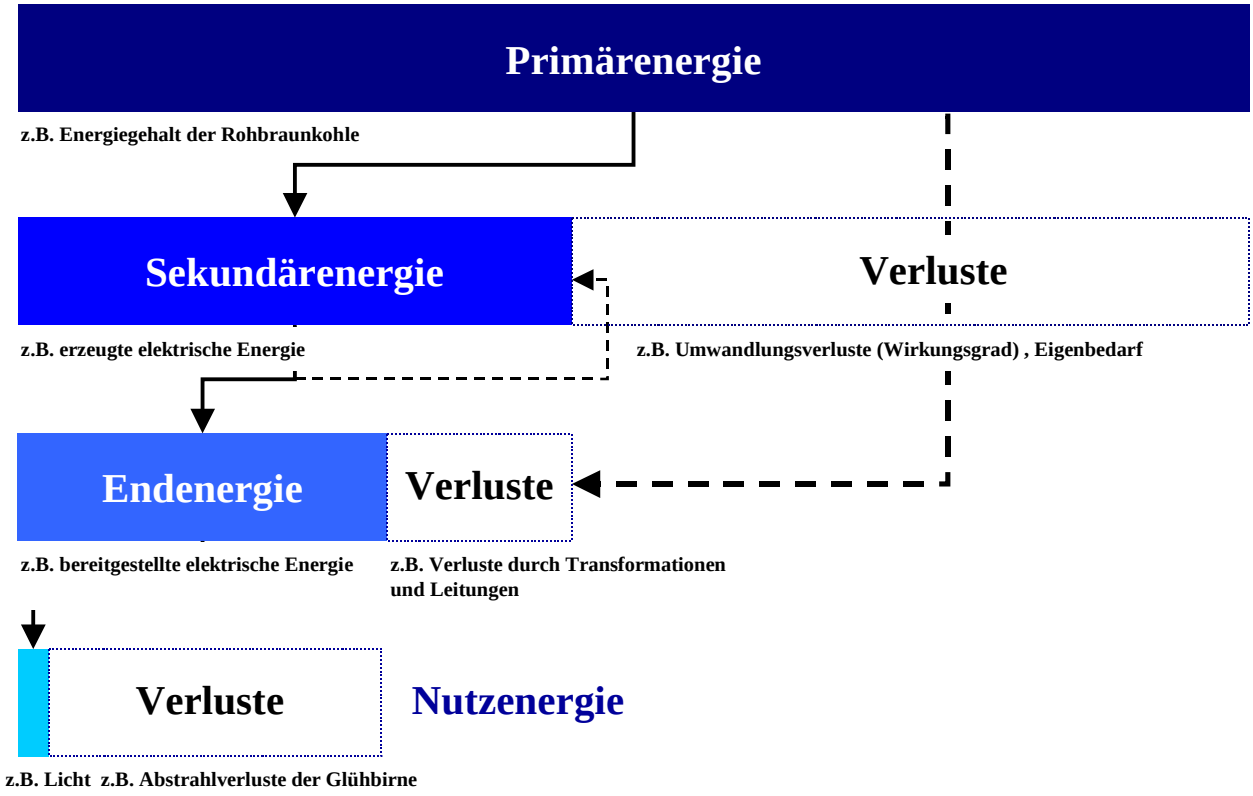


Abb. 0-1: Stufen der Energiewandlungskette

Definition von Energiereserven und -ressourcen

- **Reserven** sind Vorkommen von Energierohstoffen, die mit großer Genauigkeit erfasst und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich abbaubar sind. Reserven sind eine Teilmenge der Ressourcen.
- **Ressourcen** sind geologisch nachgewiesene oder noch nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche Vorkommen, die derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind. Die Einteilung wird in drei Kategorien von wenig wahrscheinlich bis sehr wahrscheinlich klassifiziert. Die Ressourcen sind Vorkommen, die mit zukünftiger Technik unabhängig von der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit vermutlich abbaubar sind.
- Das **Volumen der Reserven** unterliegt einer kontinuierlichen Schwankung, da hierauf einerseits der Verbrauch einen Einfluss hat und anderseits durch die Höhe der Energieträgerpreise stetig Anteile in Ressourcen übergehen (sinkende Energiepreise) oder aus einem Teil der Ressourcen wieder Reserven werden (steigende Energiepreise).
- Neben den konventionellen Kohlenwasserstoffen beinhalten Reserven und Ressourcen die jeweiligen Anteile an **nicht konventionellem** Erdöl (Schweröl, Schwerstöl, Ölsand, Ölschiefer) und Erdgas (Gashydrate, Kohle-Flözgas, dichte Speicher, Aquifere).

Definition der Potenzialbegriffe

- Das **theoretische Potenzial** ergibt sich aus dem physikalischen Angebot der Energiequellen (z. B. sämtliche Biomasse aus Pflanzen und Tieren) und stellt damit eine theoretische Obergrenze des verfügbaren Energieangebots dar. Wegen grundsätzlich unüberwindbarer technischer, ökologischer und praktischer Schranken kann es zumeist nur zu sehr geringen Anteilen erschlossen werden und ist deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit des Energieangebots im Allgemeinen 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** zur Nutzung der Energie wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der unter den aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Um die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des betrachteten Energieträgers bzw. -systems beurteilen zu können, müssen die konkurrierenden anderen Energiesysteme zum Vergleich herangezogen werden. Das wirtschaftliche Potenzial zur Nutzung z. B. der Bioenergie wird damit sowohl von den konventionellen Energiesystemen als auch den Energieträgerpreisen beeinflusst.
- Das **erschließbare Potenzial** beschreibt, welcher Beitrag z. B. durch die Bioenergie tatsächlich erwartet werden kann. Es ist in der Regel zumindest zeitweise geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da auch das wirtschaftliche Potenzial nicht sofort (z. B. wegen begrenzter Herstellkapazitäten oder mangelnder Information) und nur sehr langfristig vollständig erschlossen werden kann.

Glossar

Abgasturbolader ist eine Vorrichtung, welche die in den Abgasen eines Motors enthaltene kinetische Energie nutzt, um dem Motor die Frischluft unter erhöhtem Druck zuzuführen.

Absätzige Beschickung ist eine nicht kontinuierliche Zuführung von Brennstoff in eine Feuerungsanlage.

Altholz Holzbauteile, -produkte und -materialien aus Gebäudeabbrüchen, Umbauten, Renovationen (z. B. Balken, Böden, Decken, Treppen, Fenster, Türen, Tische, Schränke, Stühle, Kisten, Paletten, Schalungen und Gerüste). Altholz kann naturbelassen, behandelt (z. B. Eisenbahnschwellen, Telefonmasten) und beschichtet (z. B. Furniere, Melaminbeschichtungen) sein. Je nach Behandlung und Beschichtung kann Altholz in unterschiedliche Klassen unterteilt werden, die nur in bestimmten Feuerungsanlagen verbrannt werden dürfen.

Amortisationsdauer Zeitpunkt, zu dem die mit einer Investition verbundenen Auszahlungen einschließlich des Investitionsbetrages durch die dadurch verursachten Einzahlungen gedeckt werden.

Annuitätenmethode Dynamisches finanzmathematisches Verfahren der Investitionsrechnung.

Asche Bei der restlosen Verbrennung (Veraschen) von organischen Substanzen zurückbleibende anorganische Bestandteile. Es handelt sich hierbei um ein Gemisch von Carbonaten, Sulfaten, Phosphaten, Chloriden und Silicaten der Alkali- und Erdalkalimetalle sowie Eisenoxiden u.a. Aufgrund ihres hohen Mineralstoffanteils können Holzaschen als Düngemittel verwendet werden.

Aschegehalt ist die Menge an Verbrennungsrückstand, die beim Glühen des Brennstoffes unter festgesetzten Bedingungen entsteht, zumeist angegeben in Gewichts-Prozent. Bei vollständiger Verbrennung von Holz bleiben je 100 kg Brennstoff zwischen 0,2 und 0,6 kg Asche zurück.

Atmosphäre Die Atmosphäre ist die Lufthülle der Erde, sie wird in Schichten unterteilt. Die untere ist die Troposphäre, die sich bis in eine Höhe von etwa 12 km ausdehnt. Trockene Luft der Troposphäre setzt sich aus 78 % Stickstoff (N_2), 21 % Sauerstoff (O_2), 0,03 % Kohlenstoffdioxid (CO_2) und 0,97 % Edelgasen zusammen. Die Troposphäre enthält den größten Teil des atmosphärischen Wasserdampfs. Darüber befindet sich die Stratosphäre, die sich bis auf 50 km Höhe aus-

dehnt. Sie enthält die für das Leben auf der Erde wichtige, weil vor kurzwelliger UV-Strahlung schützende Ozon-Schicht, die u.a. durch Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) – z. B. als Treibgas in Sprays, als Kältemittel oder andere Emissionen - gefährdet wird.

atro Abkürzung für "absolut trocken". Biomasse in absolut trockenem (d. h. wasserfreiem) Zustand kann nur durch künstliche Trocknung erreicht werden. Als Synonym wird auch der Begriff "wasserfrei" (wf) verwendet.

Auflage ist eine Holzmenge oder Charge, die bei handbeschickten (im Ggs. zu automatisch beschickten) Feuerungen auf den Feuerungsrost aufgelegt wird.

Auswinterung Winterliche Pflanzenverluste, die meist krankheits- oder witterungsbedingt sind.

Bagasse ist ein faserhaltiger Rückstand bei der Produktion von Zucker.

Barrel ist als Volumenmaß für Rohöl bekannt. Das so genannte "Petrol Barrel" stammt ursprünglich aus den USA, wobei ein Petrol Barrel laut Definition einem Volumen von 159 Liter entspricht. Heizöl oder Motorkraftstoffe (z.B. Diesel) werden häufig in Barrel bzw. in Tonnen angegeben. Bei der Umrechnung von Barrel in Tonnen ist die Dichte des Öls bzw. des Ölproduktes als Korrekturfaktor zu berücksichtigen.

Biodiesel Trivialname für Pflanzenölmethylester (PME). In Deutschland wird überwiegend Rapsölmethylester (RME) als Biodiesel eingesetzt. RME wird aus Rapsöl gewonnen, besitzt ähnliche Eigenschaften wie konventioneller Dieselkraftstoff und kann daher in fast allen herkömmlichen Dieselmotoren eingesetzt werden.

Biogas Entsteht durch anaeroben Abbau organischer Substanz und besteht zum überwiegenden Teil aus Methan. Biogas lässt sich durch Verbrennung in Gasmotoren (Kraft-Wärme-Kopplung) zur Energiegewinnung einsetzen.

Biomasse Gesamtheit der durch Pflanzen und Tiere erzeugten organischen Substanz. Bei der Energiegewinnung aus Biomasse wird unterschieden zwischen speziell zur Energiegewinnung angebauten Pflanzen (Energiepflanzen), land- bzw. forstwirtschaftlichen Rückständen und/oder Nebenprodukten (z. B. Stroh, Gülle, Waldrestholz), Produkten der Landschaftspflege (z. B. Aufwuchs von Landschaftspflegeflächen), organischen Rückständen zur Verwertung bzw. Entsorgung aus industriellen oder (haus)wirtschaftlichen Prozessen (z. B. Bioabfall, Klärschlamm) oder um organische Produkte nach der Endnutzung (z. B. Altholz). Es kann sich dabei

um Festbrennstoffe aus Lignozellulose (z. B. um schnellwachsende Baumarten), um zucker-, stärke- oder ölhaltige Pflanzen (z. B. Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps) zur Erzeugung pflanzenbürtiger Kraftstoffe (z. B. Ethanol, Pflanzenöl, Pflanzenölmethylester) oder um gasförmige Energieträger (z. B. Biogas aus Gülle) zur Wärme- und Stromerzeugung handeln.

Biosphäre Sammelbegriff für alle mit lebenden Organismen besiedelbaren Schichten der Erde.

Blockheizkraftwerk (BHKW) Anlage zur lokalen Erzeugung von Energie (Wärme und Strom) nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Mit einem stationären Verbrennungsmotor, einer kleinen Gasturbine oder einer Brennstoffzelle wird Strom erzeugt. Die dabei entstehende Abwärme wird zur Warmwasserbereitung und zu Heizzwecken genutzt. Als Brennstoff kann beispielsweise Dieselkraftstoff, Erdgas oder Pflanzenöl eingesetzt werden.

BoB-Betrieb Betrieb eines Kessels ohne ständige Beaufsichtigung nach TRD 604; ermöglicht ein Inspektionsintervall von 24 bzw. 72 h.

Brennholz Holz (mit oder ohne Rinde), das zum Einsatz als Brennstoff bestimmt ist. Dazu gehören neben dem 1 m langen Brennholz (Scheitholz, Prügel, Reisprügel) auch Schwarten, Spreißel, Hackholz.

Brennwert, Ho (früher oberer Heizwert) Als Brennwert (Symbol Ho) wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freiwerdenden fühlbaren Wärmemenge und der Masse dieser Brennstoffmenge bezeichnet, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser flüssig vorliegt und wenn die Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die Temperatur der entstandenen Produkte nach der Verbrennung den jeweils festgelegten gleichen Wert hat. Das vor dem Verbrennen im Brennstoff vorhandene Wasser und das beim Verbrennen der wasserstoffhaltigen Verbindungen des Brennstoffs gebildete Wasser muss nach der Verbrennung in flüssigem Zustand und die Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff und Schwefel gasförmig vorliegen. Eine Oxidation des Stickstoffs darf nicht stattfinden. Als bezogene Größen haben der spezifische bzw. der molare Heizwert die Dimension kJ/kg bzw. kJ/mol und der auf das Normvolumen bezogene die Dimension kJ/m^3.

Brutto-Inlandsprodukt (BIP) Maß für die im Inland entstandene wirtschaftliche Leistung; inflationsbereinigter Wert aller in einer Berichtsperiode im Inland produ-

zierten Waren und Dienstleistungen nach Abzug des Wertes der im Produktionsprozess als Vorleistungen verbrauchten Güter.

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) Zweck des BImSchG ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmo-sphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen (wie Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge) zu schützen. Das BImSchG wurde zuletzt im September 2002 neu gefasst und im Dezember 2004 geändert. Es enthält Vorgaben und Vorschriften u. a. für die Errichtung und den Betrieb von Feuerungsanlagen. Eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung nach dem BImSchG ist für alle Anlagen erforderlich, die "in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen".

C3-Pflanzen Pflanzen der gemäßigten Breiten (z. B. Getreide, Raps) mit einem C3-Photosynthesemechanismus, bei denen als erstes fassbares Produkt nach der Inkorporation des CO_2 in der 3-Phosphorglycerinsäure eine Verbindung entsteht, die drei C-Atome enthält.

C4-Pflanzen Subtropische Pflanzen (z. B. Chinaschilf, Mais) mit einem C4-Photosynthesemechanismus, bei denen als erstes fassbares Produkt C4-Dicarbonsäure, die aus vier C-Atomen zusammengesetzt ist, entsteht. Sie benötigen je gebildetem kg Pflanzensubstanz weniger Wasser als C3-Pflanzen und können bei gleicher Lichteinstrahlung mehr Masse produzieren. Sie sind im Vergleich mit den heimischen C3-Pflanzen gekennzeichnet durch höhere Erträge in klimatisch wärmeren Gebieten, in klimatisch weniger begünstigten Gebieten sind C4-Pflanzen aber weit unterlegen.

Charge Auflage

Chinaschilf Trivialname für Miscanthus.

Darrdichte Rohdichte bei einem Wassergehalt von 0 %.

Derbholz Oberirdische Holzmasse ab 8 cm (früher 7 cm) Zopfstärke in Rinde. Das bei der Fällung am Stock bleibende Schaftholz zählt nicht dazu.

Elektrofilter In einem Elektrofilter werden feste oder flüssige Teilchen mit Hilfe elektrischer Kräfte aus einem Gasstrom entfernt. Sie sind besonders geeignet zur Entstaubung von großen Volumenströmen bei niedrigem Druckverlust.

Emissionen nennt man Gase, Staub, Geräusche, Strahlen, Wärme und Erschütterungen die von festen oder beweglichen Anlagen (Maschinen, Kraftwerken, Autos)

oder Stoffen (Abfall, Chemikalien usw.) an die Umgebung (Umwelt) abgegeben werden. Zum Schutz von Menschen und Umwelt werden in Rechtsvorschriften (Technischen Anleitungen, z. B. TA Luft) Emissionsgrenzwerte festgelegt. Emissionen, die auf Mensch und Tier, Natur und Umwelt, Luft, Wasser oder Boden einwirken, werden an dem Ort, an dem sie eine Wirkung entfalten, Immissionen genannt. Das Auftreten einer Immission unterscheidet sich meist erheblich von der Emission (z. B. wegen Verdünnung in der Atmosphäre oder biologischem Abbau im Wasser).

Endenergie Energieträger und -formen, die dem Endverbraucher zur Verfügung stehen.

Energiepflanzen werden zum Zwecke der Energiegewinnung (z. B. Verbrennung) angebaut. Als Energierohstoff können die ganzen Pflanzen, Pflanzenteile oder Pflanzenabfälle eingesetzt werden.

Energiepolitik Die Summe der Maßnahmen, die von staatlicher Seite ergriffen werden, um Art und Umfang der Produktion, der Verteilung und des Verbrauchs von Energie zu beeinflussen. Beispiele sind Regelungen zur Sicherstellung einer umweltverträglichen Energieversorgung, die Besteuerung bestimmter Energien zur Preisbeeinflussung, das Einwirken auf die Wahl von Energieträgern durch Emissionsobergrenzen sowie internationale Verträge über den Im- und Export von Energieträgern. In ihren Auswirkungen betrifft die Energiepolitik jeden Bürger und jedes Unternehmen und wirkt in praktisch jeden Lebensbereich hinein. Sie ist eines der zentralen Felder auch der Umweltpolitik.

Energieträger Stoffe oder physikalische Erscheinungen, in denen Energie gespeichert ist.

Erdgas Brennbare, in der Erdkruste vorkommende, hauptsächlich aus gesättigten Kohlenwasserstoffen bestehende Gase, die je nach ihrer Herkunft unterschiedliche Zusammensetzung aufweisen. In erster Linie besteht Erdgas aus Methan (ca. 85 %). Der mittlere Heizwert (Hu) liegt zwischen 32 und 38 MJ/m^3. Erdgas gilt als umweltfreundlicher fossiler Brennstoff wegen der geringen Schwefeldioxid- und Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei seiner Verbrennung.

Erdöl ist einer der wichtigsten fossilen Rohstoffe, der zur Erzeugung von Benzinen, Dieselkraftstoffen, Heizöl und Kunststoffen verwendet wird.

Erneuerbare Energien sind Energieträger, die "unendlich" lange zur Verfügung stehen, im Unterschied zu den fossilen Energieträgern (wie Kohle, Erdöl, Erdgas oder

spaltbare Elemente), die an begrenzte Stoffvorräte gebunden sind. Zu den Erneuerbaren Energien zählen u. a. Sonnenenergie (Solarthermie, Photovoltaik), Wind- und Wasserkraft, Geothermie (Erdwärme) und die Energie aus der Verbrennung von Biomasse.

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Durch das EEG werden alle deutschen Netzbetreiber verpflichtet, den regenerativ erzeugten Stroms abzunehmen und zu festgelegten Sätzen zu vergüten. Alle Stromlieferanten, die Endkunden beliefern sind verpflichtet diesen Strom aufzukaufen. Mit diesem Gesetz soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Energieversorgung bis 2010 verdoppelt werden.

Erweichungspunkt Erste Anzeichen des Erweichens der Asche bei hohen Temperaturen (Oberflächenveränderungen, Rundwerden der Kanten, Schrumpfen).

Feinhackgut Gehäckseltes Holz, das - von wenigen Grobanteilen abgesehen - aus Stücklängen unter 3 cm besteht.

Feinstflug- oder Gewebeasche Die Aschefraktion, die in (den Multizyklonen meist nachgeschalteten) Elektro- oder Gewebefiltern abgeschieden wird bzw. als Kondensatschlamm in Rauchgaskondensationsanlagen anfällt. Bei Biomasseheizwerken ohne entsprechende Apparate zur Feinstflugaschenabscheidung verbleibt diese als Reststaub im Rauchgas.

Festmeter (Fm) In der Forst- und Holzwirtschaft übliche Maßeinheit für die Holzmasse (Stammholz), die dem Rauminhalt eines Kubikmeters (m^3) entspricht.

Feuerungsanlagen sind Einrichtungen zur Erzeugung von Wärme durch Verbrennung von festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen. Sie dienen zur Dampferzeugung oder Erwärmung von Wasser oder sonstigen Wärmeträgermedien für Industrie, Gewerbe oder Gebäudeheizungen. An Reststoffen aus Feuerungsanlagen fallen vor allem Aschen (Schlacken) und Filterstäube an.

Filter Technische Anlage zur Entfernung oder Verringerung von umweltrelevanten Emissionen (insbesondere Partikel). Üblicherweise werden in der Abluftreinigung Elektro-, Gewebe- und Keramikfilter verwendet.

Flammpunkt u.a. die niedrigste Temperatur einer brennbaren Flüssigkeit, bei der sich unter genormten Bedingungen ein fremdentzündbares Dampf/Luft-Gemisch bildet. Wichtig für die Lagerungs- und Transportauflagen.

Fließpunkt Unspezifische, nicht durch Normen abgedeckte Bezeichnung für diejenige Temperatur, bei der ein Feststoff (Probekörper) unter gegebenen Messbedingungen zu fließen beginnt bzw. auf ein Drittel seiner Probenhöhe gesunken ist.

Flüchtige Bestandteile Gasförmige Verbindungen, die unter festgelegten Bedingungen beim Erhitzen und Zersetzen organischer Brennstoffe entweichen.

Flugstaub und Flugasche Bezeichnung für ein Verbrennungsprodukt vornehmlich aus Feststofffeuerungen, das von Verbrennungsgasen mitgeführt bzw. mechanisch mitgerissen wird oder beim Abkühlen aus dem Dampfzustand kondensiert. Hierbei kann es sich um Asche, Staub und Schwebstoffe handeln. Mit Hilfe moderner Filtertechniken (z. B. Elektro- oder Gewebefilter) kann Flugstaub aus dem Abgas abgeschieden werden, er wird zur Flugasche. Die Flugasche enthält überwiegend SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, K_2O, P_2O_5 sowie ziemlich alle anderen Metalle einschließlich ihrer natürlich vorkommenden radioaktiven Isotope. Je nach Filtertechnik kann mit dem Rauchgas verbliebener Reststaub durch den Kamin ausgetragen werden.

Fossile Brennstoffe bzw. Energieträger. In der erdgeschichtlichen Vergangenheit aus Pflanzen entstandene feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe wie Kohle, Torf, Erdöl und Erdgas.

Fraktionierung Stufenweise Trennung eines Stoffgemisches in seine Bestandteile (Fraktionen) durch verschiedene Trennverfahren (z. B. Extraktion, Sedimentation, Siebung, Flotation, Kristallisation).

Gewebefilter sind Oberflächenfilter, die aus lose aufgeschütteten oder fest miteinander verbundenen Faserschichten oder Körnern bestehen und zur Entstaubung eingesetzt werden. Beim Gewebefilter sollen möglichst wenig Staubpartikel aus dem Abgasstrom in das Filtermedium eindringen. Auf der Filteroberfläche entsteht mit der Zeit ein Staubkuchen, der das eigentliche, hochwirksame Filtermedium darstellt. Durch das allmähliche Anwachsen der Filterschicht entsteht ein Druckverlust im Abgasstrom. Deshalb muss der Staubkuchen von Zeit zu Zeit vom Filtermedium entfernt werden, z.B. durch automatische Druckimpulse.

Glühverlust Bezeichnung für die Gewichts-Differenz zwischen Abdampf- und Glührückstand bzw. zwischen Trockengewicht und Gewicht des Glührückstandes, je nachdem, ob man von flüssigen oder festen Stoffen ausgeht. Meist wird dieser Begriff verwendet für die Massendifferenz vor und nach der Konditionierung einer Probe während zwei Stunden bei 550 °C bezogen auf die Ausgangsmasse. Der

Glühverlust von Staub ist ein grobes Maß für den Gehalt an organischen Stoffen und gibt einen Hinweis auf die Vollständigkeit der Verbrennung.

Grob- oder Rostasche Im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage anfallende Asche, die neben der Brennstoffasche auch mineralische Verunreinigungen des Brennstoffs (z. B. Sand, Erde, Steine) enthält. Insbesondere beim Einsatz von Rinde und Stroh als Brennstoff kann die Grobasche gesinterte Aschenteile und Schlackebrocken enthalten.

Grobhackgut Holzhackgut überwiegend mit Stücklängen über 3 cm.

Hackgut Maschinell zerkleinertes Holz mit und ohne Rinde bis zu einer maximalen Stücklänge von 15 cm.

Hackholz In manipulierbare Längen eingekürztes, (grob-)entastetes Derb- und/oder Reisholz, das zur Hackguterzeugung bestimmt ist.

Hackschnitzel, **schwarz** Rindenhaltige Hackschnitzel.

Hackschnitzel, weiß Hackgut ohne Rinde.

Handbeschickung die manuelle Zuführung von Holz zu einer Feuerungsanlage im Ggs. zu einer automatischen Beschickung mittels Brennstoffföderein richtungen

Hartholz Holz mit einer mittleren Darrdichte größer 550 kg/m^3 (Eiche, Buche, Birke, Ulme Esche, Ahorn, Schwarzkiefer)

Heizwert Hu (früher unterer Heizwert) Als Heizwert (Symbol Hu) wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freiwerdende Wärmemenge und der Masse dieser Brennstoffmenge bezeichnet, wenn das bei der Verbrennung gebildete Wasser dampfförmig vorliegt und wenn die Temperatur des Brennstoffes vor der Verbrennung und die Temperatur der entstandenen Produkte nach der Verbrennung den jeweils festgelegten gleichen Wert hat. Die Temperatur des Brennstoffs vor dem Verbrennen und die der Verbrennungsprodukte muss 25°C betragen.

Holz-Briketts, -Pellets oder -Presslinge werden aus Schleifstaub und/oder Sägemehl durch mechanischen Druck hergestellt.

Holzfeuchte Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserfreien Brennstoffes.

Hydraulikstoker Maschinelle Vorrichtung, die den Festbrennstoff dosiert in den Feuerraum vorschiebt. Ein Flammenrückschlag aus dem Kesselraum wird verhin-

dert, indem z.T. mehrere Klappen (sogenannte Rückschlagklappen) dem Stoker vorgelagert sind.

Immission Teil der Emission schädlicher Stoffe (Abgase aus Industrie, Straßenverkehr und Heizanlagen) sowie von Geräuschen, Erschütterungen, Gerüchen, Licht, Wärme und Strahlen, der auf Menschen, Tiere und Pflanzen sowie Sachgüter einwirkt. Ziel des gesetzlich geregelten Immissionsschutzes ist es, diese Immissionen so gering wie möglich zu halten. Dafür sind Immissionswerte festgelegt. Zentrale Vorschrift ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit seinen Verordnungen.

Industrieholz, Rohholz, das mechanisch oder chemisch aufgeschlossen werden soll.

Industriepflanzen Bei Industriepflanzen werden Inhaltsstoffe (z.B. Öle, Fette, Stärke) oder die Pflanzenfasern einer stofflichen Verwertung zugeführt. Voraussetzung ist eine Verwendung im Non-food-Bereich.

Industrierestholz fällt als Produktionsrückstand bei der Holzbe- und -verarbeitung an. Es handelt sich um meist unbehandelte stückige Holzteile wie Holzschnitzel, Kappholz oder Ablängstücke aus Massivholz, Schwarten und Spreißeln. Industrierestholz fällt vor allem bei Zimmereien, Schreinereien, Möbel- und Fertighausherstellern an.

Jahresdauerlinie (für Wärmebedarf) Graphische Darstellung der Summenhäufigkeit der Wärmeleistung, die anzeigt, wie lange eine bestimmte Wärmeleistung jährlich auftritt bzw. überschritten wird.

Kapitalwertmethode Dynamisches finanzmathematisches Verfahren der Investitionsrechnung, das als Entscheidungsgrundlage den finanziellen Wert einer Investition nutzt.

Kappholz Kurze Holzstücke (mit oder ohne Rinde), die beim Abschneiden der Enden von Rund- oder Schnittholz anfallen.

Kessel- oder Wärmeübertragerasche An Heißwasserkesseln oder Wärmeübertragerrohren durch Kondensation und/oder Desublimierung von Alkalichloriden anfallende Asche. Die Ascheanlagerungen können durch Verwendung von Brennstoffen mit geringen Konzentrationen an K, Na, Cl und S sowie durch automatische Abreinigungseinrichtungen (z. B. durch Druckluftstöße) weitgehend verhindert werden.

Kohlenstoffdioxid (CO_2) Farbloses, nicht brennbares, geruchloses und ungiftiges Gas, das mit ca. 0,03 % natürlicher Bestandteil der Erdatmosphäre ist. CO_2 ist für langwellige Wärmestrahlen "undurchlässig". Somit verhindert es eine gleichgewichtige Abstrahlung der auf die Erde treffenden Sonnenstrahlen und ermöglicht damit die zum Leben notwendigen Temperaturen auf der Erdoberfläche bzw. in der Biosphäre. Als energetisch stabilste Kohlenstoff-Verbindung ist das CO_2 die Schlüsselverbindung im Kohlenstoff-Kreislauf der Natur. Durch Assimilation wird es zusammen mit Wasser von Pflanzen mit Hilfe der Sonnenenergie bei der Photosynthese in energiereichere Kohlenhydrate überführt, wobei Sauerstoff frei wird. CO_2 dient damit als Grundsubstanz zum Aufbau aller organischen Verbindungen. Die Kohlenhydrate werden von tierischen Organismen als energieliefernde Substrate für deren Stoffwechsel aufgenommen, zu CO_2 und Wasser abgebaut und durch Atmung an die Außenluft abgegeben bzw. in Biomasse umgewandelt. Absterbende tierische und pflanzliche Organismen liefern beim aeroben Abbau ebenfalls CO_2, das entweder in die Atmosphäre abgegeben oder in Wasser gelöst wird, aus dem es als Carbonat-Gestein sedimentieren oder mit dem der Atmosphäre ausgetauscht werden kann.

Auch bei der energetischen Nutzung fossiler Energieträger (z. B. Kohle) wird CO_2 freigesetzt. Bei Verbrennung fossiler Energieträger reichert sich das vor Urzeiten fossil gebundene Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre über den natürlichen Gehalt hinaus an und kann zur Erwärmung des Erdklimas beitragen.

Kohlenstoffmonoxid (CO) Reiz-, farb- und geruchsloses Gas, das bei unvollständiger Verbrennung von organischen Verbindungen entsteht. Es wird in der Luft schnell zu Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Es wirkt gesundheitsgefährdend, da es die Sauerstoffaufnahme des Blutes verhindert.

Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) Bezeichnung für organische Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Nach Art des Kohlenstoff-Gerüstes unterscheidet man zwischen azyklischen und zyklischen Kohlenwasserstoffen. Die azyklischen (auch aliphatische Kohlenwasserstoffe bezeichnet) beinhalten die wichtige Klasse der Alkane (Paraffine). Bei den zyklischen Kohlenwasserstoffen unterscheidet man zwischen den alizyklischen und den aromatischen (Aromaten) mit Benzol als typischem Vertreter. Aliphatische Kohlenwasserstoffe sind in der Regel nicht bzw. gering toxisch. Anders verhält es sich dagegen mit den aromatischen, beispielsweise mit Benzol, das als karzinogen eingestuft wird. Ein großes Gefährdungspotential geht auch von den polyzyklischen aromatischen Kohlenwas-

serstoffen (PAK bzw. PAH) aus, von denen einige ebenfalls karzinogene und auch mutagene Eigenschaften besitzen.

Konversion/Biokonversion Als Konversion bezeichnet man im energetischen Sinne die Umwandlung und Veredelung von Brennstoffen in feste, flüssige und gasförmige Energieträger oder in Endenergieformen. Bei der Biokonversion ist der Ausgangsstoff stets Biomasse, die entweder unmittelbar als terrestrische oder aquatische Biomasse, so wie sie in der Natur vorkommt, oder aber in Form von Rückstands- und Abfallbiomasse genutzt werden kann. Dazu dienen verschiedene Verfahren, die in physikalische, thermochemische und biologische Verfahren gegliedert werden.

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Energieerzeugungs- und Umwandlungsverfahren, bei dem gleichzeitig Strom und Wärme bereitgestellt wird. Durch die Nutzung der Abwärme, die beim Stromerzeugungsprozess in herkömmlichen Kraftwerken ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird, lässt sich der Energienutzungsgrad durch KWK entscheidend erhöhen (von 30 bis 45 % auf 80 bis 90 %). In Heizkraftwerken wird mit KWK gearbeitet.

Kraftwerk (Wärmekraftwerk) Anlage zur Umwandlung von Brennstoffenergie in Wärme (hoher Temperatur) und anschließend in elektrische Energie.

Kurzumtriebsplantage Plantagen, in denen schnellwachsende Baumarten wie Pappeln, Aspen und Weiden angebaut und in regelmäßigen Intervallen (alle 3-5 Jahre) mit vollautomatischen Erntemaschinen abgeerntet werden. Sie werden als Biomasselieferanten zur Energiegewinnung genutzt. Aus den verbleibenden Stöcken und Wurzeln kommt der Neuaustrieb für die nächste Ernte.

Lignin Ein hochpolymerer, aromatischer Pflanzenstoff, der in verholzenden Pflanzen die Räume zwischen den Zellmembranen ausfüllt und zu Holz werden lässt (Lignifizierung bzw. Verholzung). Auf diese Weise entsteht ein Mischkörper aus druckfestem Lignin und zugfester Zellulose. Lignin ist noch an andere Polysaccharide (Polyosen) gebunden.

Lignozellulosepflanzen Holz- oder grasartige Pflanzen mit hohen Anteilen an Ligninen und Zellulose in der Biomasse.

lutro Abkürzung für "lufttrocken": Gleichgewichtszustand zwischen Holzfeuchtigkeit und relativer Luftfeuchtigkeit, also kein statischer Zustand, sondern wechselnd, je nach Wechsel der relativen Luftfeuchtigkeit.

Maßeinheiten für Energie Nach dem Internationalen Einheitensystem (SI) ist "Joule" (J) die Einheit für Energie, Arbeit und Wärmemenge, "Watt" (W) die Einheit für Leistung, Energiestrom und Wärmestrom. Ein Joule stellt diejenige Arbeit dar, die bei einer Leistung von einem W während einer Sekunde produziert und/oder verbraucht wird.

Methan (CH_4) Farbloses, geruchloses, mit bläulicher Flamme brennendes Gas mit einem Heizwert von 36 MJ. Methan-Luft-Gemische mit 5 bis 15 Vol.-% Methan sind explosiv. Methan findet sich im Kokereigas und im Erdgas, das zugleich die wichtigste Quelle darstellt. Methan ist ein klimarelevantes Gas. Sein Gehalt in der Atmosphäre beträgt ca. 1,3 ppm, er hat sich seit 1950 etwa verdoppelt. Methanquellen sind fossile Brennstoffe sowie der Zellulose-Abbau (Methan-Gärung) durch anaerobe Bakterien. Es entsteht weiterhin in Kläranlagen in den Faulbehältern (Biogas), in Sümpfen (Sumpfgas), in den Darmgasen besonders von Wiederkäuern, aber auch des Menschen, in Reisfeldern und marinen Sedimenten. Hohe Methanzuflüsse schreibt man auch Undichtigkeiten der Ergasfernleitungen zu.

Miscanthus x giganteus (auch Chinaschilf genannt) liefert einen schnell nachwachsenden Holz ähnlichen Rohstoff. Die mehrjährige Pflanze ist bereits industriell im Einsatz und kann die Winteranfälligkeit im ersten Jahr überwinden. Sie kann auf großen Flächen in vereinfachter Form gepflanzt werden, benötigt in den ersten 2 Jahren intensive Handarbeit (Unkraut jäten) und jährlich ausreichend (400–600 l) Wasser. Sie erzeugt ihren Stickstoff selbst.

Nachwachsende Rohstoffe Sammelbegriff für land- und forstwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe wie Holz, Flachs, Raps, Zuckerstoffe und Stärke aus Rüben, Kartoffeln oder Mais, die nach der Aufbereitung einer weiteren technischen oder energetischen Anwendung zugeführt werden können. Auch tierische Rohstoffe wie Wolle und Leder lassen sich im weitesten Sinne zu dieser Kategorie zählen. Entscheidender Vorteil nachwachsender Rohstoffe im Vergleich beispielsweise zu Rohstoffen fossilen Ursprungs ist, dass sie prinzipiell unbegrenzt zur Verfügung stehen. Ein anderer Pluspunkt ist ihre CO_2-Neutralität bei der Verbrennung. Dies erklärt sich dadurch, dass das bei der Verbrennung von pflanzlichen Rohstoffen freiwerdende Kohlenstoffdioxid vorher von der Pflanze gebunden wurde. Die heute populärste Anwendung von nachwachsenden Rohstoffen ist der Einsatz von Holz in Feuerungen. Aber auch die chemische Industrie zeigt sich mehr und mehr interessiert, für die Bereitstellung ihrer Grundstoffe auf nachwachsende Rohstoffe zurückzugreifen und tut dies bereits heute in ganz beachtlichem Umfang. Auch wenn gerade in den

letzten Jahren neue Produkte aus Nachwachsenden Rohstoffen auf den Markt gekommen sind - man denke nur an biologisch abbaubare Folien und Verpackungen - steht diese Branche erst am Anfang ihrer Entwicklung. Sicher ist es notwendig, in jedem Einzelfall zu prüfen, ob der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen ökologisch wie ökonomisch wirklich sinnvoll ist; nicht in jedem Fall stellt ihr Einsatz nämlich die bessere Variante dar.

Nettoenergiebilanz Gegenüberstellung aller Energiemengen, die für den Bau, den Betrieb und die Beseitigung eines Energiesystems benötigt werden, und derjenigen Energien, die von dem System im Laufe seiner Lebensdauer bereitgestellt werden. Ein Energiewandler mit negativer Energiebilanz verbraucht mehr Energie, als er bereitstellt.

Niederkaloriges Gas Bei der Vergasung von Biomasse mit Luft als Vergasungsmittel wird ein kohlenstoffmonoxidreiches Gas erzeugt, das einen kalorischen Wert von 3 bis 5 MJ/m^3 aufweist. Es wird wegen seines niedrigen Heizwertes auch als Schwachgas bezeichnet. Es kann nach einer Gasreinigung und ggf. Gasabkühlung in Motoren genutzt oder in Gasturbinen eingesetzt werden. Für Gasturbinen mit nachgeschalteter Dampfturbine (GuD-Anlagen) sind mittelkalorige Gase (12 bis 15 MJ/m^3) günstiger. Diese sogenannten Synthesegase können durch Verwendung von Sauerstoff als Vergasungsmittel gewonnen werden.

NO_X Chemische Bezeichnung für Stickstoffoxide mit verschiedenen O-Gehalten.

Nutzenergie Anteil der Endenergie, der beim Verbraucher für den jeweiligen Nutzungszweck zur Verfügung steht und den dieser für die angestrebte Nutzung einsetzt (z. B. Licht für die Beleuchtung, mechanische Arbeit von Motoren, Wärme für die Raumheizung).

Nutzungsgrad Verhältnis der in einem Zeitraum (z. B. Jahr) nutzbar abgegebenen Energie zur gesamten zugeführten Energie.

Organische Rückstände fallen bei der Land- und Forstwirtschaft, der Industrie und den Haushalten an. Es zählen dazu: Abfall- und Restholz, Stroh, Gras, Laub, Dung, Klärschlamm und organischer Müll.

Organische Verbindungen Chemische Verbindungen mit einem Kohlenstoff-Grundgerüst, aus denen die belebte Natur aufgebaut ist. Etwa 90 % der organischen Verbindungen bestehen aus C, H und O in wechselnden Mengenverhältnissen; Verbindungen, die nur aus C und H bestehen, heißen Kohlenwasserstoffe. Zahlreiche organische Verbindungen enthalten auch noch N, während S, P und die

Halogene wesentlich seltener anzutreffen sind. Die Vielfalt und Vielzahl der organischen Verbindungen ist auf die besondere Fähigkeit der Kohlenstoff-Atome zurückzuführen, untereinander Ketten und/oder Ringe zu bilden. Viele organische Verbindungen unterscheiden sich in ihrem Verhalten in der Umwelt und ihren Wirkungen auf Lebewesen erheblich. Besonders gefährlich sind Emissionen von solchen organischen Verbindungen, die in der Natur nicht abgebaut werden und sich im Organismus bzw. in der Umwelt anreichern.

Pflanzenölmethylester (PME) Biodiesel

Pflanzenschutzmittel (PSM) Dienen zum Schutz von Kulturpflanzen. Man unterscheidet: Insektizide (gegen Insekten), Fungizide (gegen Pilze) und Herbizide (gegen Wildkräuter), die in grundlegende Stoffwechselvorgänge eingreifen. Problematisch für den Umweltschutz ist die Tatsache, dass nur ein Teil der Pflanzenschutzmittel sein Ziel erreicht. Der andere kann in den Boden eindringen und durch Auswaschung ins Grundwasser gelangen.

pH-Wert Maßzahl für die basischen oder sauren Eigenschaften einer Lösung (pH 7 = neutral; <7 = sauer; >7 = basisch).

Photosynthese Bildung von Kohlenhydraten (Zuckern) aus Kohlenstoffdioxid und Wasser, die in grünen Pflanzen im Sonnenlicht erfolgt, wobei unter Mitwirkung von Chlorophyll Sonnenenergie in chemische Energie umgewandelt wird. Damit ist die Photosynthese die grundlegende Stoffwechselreaktion der Pflanzen und einer der wichtigsten biologischen Energie-Direktumwandlungs-Prozesse.

Potential, erschließbares Das wirtschaftlich erschließbare Potential beschreibt den Anteil des wirtschaftlichen Potentials, der unter realen Bedingungen erschlossen werden kann. Deshalb ist das erschließbare im Regelfall kleiner als das wirtschaftliche Potential. Es kann dann größer sein, wenn durch administrative Maßnahmen (z. B. Förderprogramme) eine Möglichkeit zur Nutzung regenerativer Energien unterstützt wird.

Potential, technisches Das technische Potential beschreibt den Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Zusätzlich dazu werden die gegebenen strukturellen und ökologischen Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben berücksichtigt, da sie letztlich auch - ähnlich den technisch bedingten Eingrenzungen - "unüberwindbar" sind. Es beschreibt damit den zeit- und ortsabhängigen, primär aus technischer Sicht möglichen Beitrag einer regenerativen Energie zur Deckung der Energienachfrage. Da es

wesentlich durch die technischen Randbedingungen bestimmt wird, ist es im Unterschied beispielsweise zu dem wirtschaftlichen Potential deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen unterworfen. Das technische Potential wird immer in absoluten Werten angegeben, d. h., dass der heute bereits genutzte Anteil der jeweiligen Energieform darin enthalten ist.

Potential, theoretisches Das theoretische Potential beschreibt das in einer gegebenen Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot (z. B. die in der gesamten Pflanzenmasse gespeicherte Energie). Es wird allein durch die gegebenen physikalischen Nutzungsgrenzen bestimmt und markiert damit die Obergrenze des theoretisch realisierbaren Beitrages zur Energiebereitstellung. Wegen unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken kann das theoretische Potential meist nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden. Ihm kommt deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit erneuerbarer Energien keine praktische Relevanz zu.

Potential, wirtschaftliches Das wirtschaftliche Potential beschreibt den ebenfalls zeit- und ortsabhängigen Anteil des technischen Potentials, der im jeweils betrachteten Energiesystem wirtschaftlich erschlossen werden kann. Da es sehr unterschiedliche Möglichkeiten gibt, die Wirtschaftlichkeit einer Technik zur Deckung der Energienachfrage zu bestimmen, existieren immer eine Vielzahl unterschiedlichster wirtschaftlicher Potentiale. Zusätzlich dazu kommen noch sich laufend ändernde wirtschaftliche Randbedingungen (z. B. Ölpreisänderung, Veränderung der steuerlichen Abschreibmöglichkeiten).

Presslinge Aus Holz- und/oder Rindenteilchen erzeugte Pressformen (z.B. Briketts, Pellets) verschiedener Größe, die mit oder ohne Bindemittel hergestellt werden.

Primärenergie Primär- oder Rohenergie ist der Energiegehalt von Primärenergieträgern

Primärenergieträger sind Energieträger, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurden. Primärenergieträger sind sowohl fossile Brennstoffe wie Stein- und Braunkohle, Erdöl und Erdgas sowie Kernbrennstoffe als auch erneuerbare Energien wie Wasserkraft, Sonnenenergie, Windkraft und Erdwärme.

Primärluft bei modernen Feuerungsanlagen erfolgt die Zuführung der benötigten Verbrennungsluft in mehreren Stufen. Man spricht von Primär- und Sekundärluft (zum Teil auch Tertiär-), welche räumlich getrennt in dosierter Menge dem

Verbrennungsprozess zugeführt wird. Damit soll ein optimaler Ausbrand des Brennstoffes garantiert werden.

Prozessenergie Energie meist in Form von Wärme im Temperaturbereich über 100 °C für gewerbliche und industrielle Produktions- und Fertigungsverfahren.

Pyrolyse Prozess der thermischen Zersetzung kohlenstoffhaltiger Abfälle unter Ausschluss von Sauerstoff bei Temperaturen um 500 °C (Niedertemperaturpyrolyse) bzw. 700 bis 900 °C (Hochtemperaturpyrolyse). Abfälle wie Kunststoffe, Gummi oder Altreifen werden in pyrolytischen Verfahren verwertet. Auch feste Biomasse kann einer Pyrolyse zugeführt werden. Als Rückstandsprodukt erhält man, abhängig von den Reaktionsbedingungen, Pyrolysekokse, -öle und -gase.

Rapsölmethylester (RME) Biodiesel

Raummeter (Rm) In der Forst- und Holzwirtschaft übliches Maß für 1 Kubikmeter aufgesetztes oder geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume. Gelegentlich wird für Industrie- und Brennholz auch die Bezeichnung "Ster" oder "Schichtraummeter" verwendet.

Regenerative Energie Energieträger und -formen, die sich ständig auf natürliche Weise erneuern.

Rekultivierung Bearbeitung einer Fläche, die mit mehrjährigen Pflanzenarten wie Weiden oder Chinaschilf bebaut wurde, mit dem Ziel, die Überdauerungsorgane wie Wurzelstöcke oder Rhizome soweit zu zerstören, dass die Fläche wieder in die Bewirtschaftung mit anderen Kulturen genommen werden kann.

Restholz Fällt in Sägewerken (Rinde, Vollholz, Sägespäne) und weiterverarbeitenden Betrieben (Sägespäne, Hobelspäne, Splitter, stückige Abfälle, Ausschuss, verunreinigte Abfälle) an.

Rinde Ummantelung des Holzkörpers eines Baumstammes.

Rohdichte Quotient aus der Masse eines Holzkörpers und seinem Volumen einschließlich aller Hohlräume (Poren und Gefäße), bezogen auf einen bestimmten Wassergehalt.

Rohfaser Der in Säuren und Laugen unlösliche fett-, stickstoff- und aschefreie Rückstand einer Substanz. Die Rohfaser umfasst Zellulose, Lignin, Pentosane u.a.

Rohholz Gefälltes, entwipfeltes und entastetes Holz mit oder ohne Rinde, das auch abgelängt und/oder gespalten sein kann, jedoch noch nicht weiter bearbeitet und behandelt ist.

Rundholz Holz, das sich durch Querschneiden von Stamm und Ästen ergibt.

Sägespäne beim Sägen von Holz anfallende Späne bis ca. 0,5 cm.

Sauerstoff (O_2) Natürlicher Bestandteil der Atmosphäre. Farb- und geruchloses Gas, das mit fast allen Elementen außer Edelgasen reagiert. Seine Reaktionsprodukte nennt man Oxide. Sauerstoff ist lebensnotwendig für alle Lebewesen auf der Erde.

Schichtraummeter Raummeter geschichteter Holzteile. Abkürzung: Rm, rm.

Schichtholz Sortiment aus Rund- und/oder Spaltholz, das nach Masse oder Stapelvolumen gemessen wird.

Schlacke Fester Verbrennungsrückstand; Asche, die geschmolzen war und wieder erstarrt ist.

Schüttraummeter Ein Kubikmeter Schüttgut (z. B. Hackgut, Sägespäne oder andere Granulate). Abkürzung: S-m^3, Srm, SRm.

Schüttkubikmeter Schüttraummeter

Schwachgas niederkaloriges Gas

Schwarten Beim Einschneiden von Rundholz anfallende Randzonen

Schwefeldioxid (SO_2) ist ein farbloses, stechend riechendes Gas. Es entsteht überwiegend als unerwünschtes Nebenprodukt bei der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Energieträger wie Kohle oder Öl. SO_2 ist in der Atmosphäre einer Reihe von Umwandlungsprozessen unterworfen, als deren Folge beispielsweise schweflige Säure, Schwefelsäure, Sulfite, Sulfate u. a. Stoffe entstehen können. Diese führen vermischt mit Wasser und Salpetersäure (Stickstoffoxide) zur Bildung des sauren Regen, der für das Waldsterben mitverantwortlich ist. Natürliche Vorkommen an Schwefeldioxid finden sich u. a. in vulkanischen Gasen und teilweise im Erdgas. Gesetzliche Maßnahmen zur Entschwefelung von Verbrennungsanlagen sind im wesentlichen im Bundesimmissionsschutzgesetz (BimSchG) und in der Großfeuerungsanlagenverordnung (TA-Luft) festgeschrieben. Es wurde erreicht, dass die SO_2 -Emissionen in Deutschland von rund 3,7 Mio t im Jahre 1970 auf etwa 1 Mio t im Jahre 1990 zurückgingen.

Schwermetalle kommen in der Natur (Gesteine, Böden, Wasser, Pflanzen) nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Die Quellen für die Schwermetall-Immissionen sind teils natürlichen Ursprungs (Vulkane, Verwitterung), teils anthropogen als Folge der Industrialisierung. Schwermetalle werden bei Verhüttungs- und Wärmegewinnungsprozessen, im Kraftfahrzeugverkehr, durch Korrosion technischer Bauwerke, im Bergbau und bei der Abfallbehandlung freigesetzt. In Böden können sich Schwermetalle durch Verwitterung, Immissionen und Abfallstoffe anreichern. Einige sind als Spuren- oder Mikronährstoffe für den Stoffwechsel von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren essentiell. Andererseits entfalten zahlreiche Schwermetalle, nicht nur als elementarer Staub, sondern besonders in Form der löslichen Salze schon in sehr geringen Konzentrationen toxische Wirkungen. Als giftig gelten insbesondere Blei, Cadmium und Quecksilber.

Sekundärluft Primärluft

Sinterpunkt Zusammenkleben der Aschepartikel an ihren Grenzflächen tritt auf.

Spänebrenner Verbrennungseinrichtung, zum Einsatz von Holzspänen als Brennstoff.

Spaltholz Holz, das sich durch Spalten von Rundholz ergibt.

Staub/Partikel In der Luft verteilte feste Teilchen aus natürlichen oder vom Menschen zu verantwortenden Quellen. Feinstaub mit einer Teilchengröße unter fünf Mikrometern bleibt bis zu 14 Tagen in der Atmosphäre und kann in dieser Zeit über große Strecken transportiert werden.

Steinkohleneinheit (SKE) Maß für den Energiegehalt fossiler Brennstoffe. Normiert wird auf den Heizwert von Steinkohle. 1 kg SKE entspricht dabei 29 308 kJ

Ster Raummeter (Rm)

Stickstoffoxide (NO_X) Sammelbegriff für alle Oxide des Stickstoffs wie z.B. Stickstoffmonoxid NO, Distickstoffoxid N_2O und Stickstoffdioxid NO_2. Stickstoffoxide greifen die Schleimhäute der Atmungsorgane an und begünstigen Atemwegserkrankungen. In der Luft reagieren die Stickoxide in Verbindung mit Wasser zu Salpetersäure, sind für den Sauren Regen mitverantwortlich und sind damit auch für Pflanzen schädlich. Stickstoffoxide tragen auch in komplizierter Weise zur Entstehung des photochemischen Smogs bei (Ozon). Stickstoffoxide entstehen vor allem als ungewollte Nebenprodukte bei Verbrennungsprozessen mit hohen Temperaturen sowohl in Kraftfahrzeugmotoren und Kraftwerken wie auch in der chemi-

schen Industrie bei der Düngemittelherstellung. In der Natur entsteht NO_X aus durch Bodenbakterien produziertem N_2O (Denitrifikation), insbesondere beträgt die N_2O-Produktion tropischer Regenböden etwa das 10fache normaler Böden. Das klimarelevante N_2O entsteht auch als Nebenprodukt bei der Denitrifikation (besonders bei starker Stickstoff-Düngung) und z.T. auch bei der Nitrifikation.

Stilllegungsflächen Landwirtschaftliche Flächen, die zeitweise nicht für die Nahrungsmittelproduktion verwendet werden. Ziel ist es, die Überschusssituation auf dem Nahrungsmittelsektor zu entschärfen. Nachwachsende Rohstoffe dürfen auf stillgelegten Flächen angebaut werden.

Stromkennzahl (von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) Verhältnis von elektrischer Leistung zu Wärmeleistung

Stückholz Ofenfertiges Holz: für den Einsatz als Brennstoff aufbereitetes Holz

- **kurzes Stückholz** Stücklänge über 15 cm bis ca. 50 cm
- **langes Stückholz** Stücklänge über 50 cm bis ca. 100 cm.

TA Luft Die Technische Anleitung (TA) zur Reinhaltung der Luft (TA Luft): Innerhalb des BImSchG und deren Verwaltungsvorschriften richtet sich die TA Luft in erster Linie an die Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen. Die Betreiber solcher Anlagen haben nach den Grundsätzen des BImSchG zu handeln und Anlagen nach dem Stand der Technik zu erstellen oder zu betreiben. Grenzwerte, Emissions- und Immissionswerte und im besonderen Schwellenwerte sind unbedingt einzuhalten. Für ältere Anlagen sieht der Gesetzgeber ein Altanlagensanierungskonzept vor. Die TA Luft enthält u.a. auch allgemeine Emissionswerte für staub- und gasförmige Stoffe.

Teillastfähigkeit das Vermögen einer technischen Anlage nicht nur im Auslegungs-Leistungsbereich zu funktionieren, sondern auch in kleineren Leistungsbereichen betrieben werden zu können.

Treibhauseffekt bezeichnet die Eigenschaft der Atmosphäre, einfallendes sichtbares Licht weitgehend durchzulassen, die längerwellige Rückstrahlung (IR-Strahlung) der Erdoberfläche aber stärker zu absorbieren. Der natürliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre hebt die durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche von ca. –18 auf ca. +15 °C . Damit verhält sich die Atmosphäre ähnlich wie das Glasdach eines Treibhauses. Der natürliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre geht zu zwei Dritteln auf Wasserdampf, zu einem Viertel auf Kohlenstoffdioxid, zu ca. 2 % auf

Methan und zu rund einem Zehntel auf andere Klimawirksame Atmosphärenbestandteile zurück.

Wird heute vom Treibhauseffekt gesprochen, ist oft eine weitere Erwärmung gemeint, die aufgrund der Konzentrationszunahme von Kohlenstoffdioxid, Methan, FCKW, Distickstoffoxid sowie anderen Spurengasen postuliert wird. Dabei sagen die meisten Modelle bei weiter anwachsender Bevölkerung in den nächsten 50 Jahren eine globale Temperaturerhöhung um 1,5 bis 4,5 °C voraus, je nach Annahme über die Emissionen, ihre Wirkungen und die Wechselwirkungen mit anderen Umweltkompartimenten. Folgen von Temperaturerhöhungen sind z. B. das Steigen des Meerwasserspiegels durch das Abtauen des Polkappeneises oder eine Verschiebung der Klimazonen.

Trockensubstanz Nach dem Trocknen unter bestimmten Bedingungen verbleibender wasserfreier Anteil eines Stoffes. Die beim Trocknen eintretende Gewichtsabnahme eines Stoffes wird als Trockenverlust bezeichnet. Pflanzliche Frischsubstanz abzüglich (Roh)Wasser umfasst sowohl organische als auch anorganische Stoffe.

Umesterung Verfahren zur Umwandlung von Fetten zu Fettsäureester (Rapsölmethylester)

Umtriebszeit Zeitdauer zwischen zwei Ernten bei mehrjährigen Pflanzenarten wie z. B. Weiden und Pappeln.

Unterer Abbrand Der Abbrand der Brennstoffcharge in einer Feuerungsanlage (Scheitholzfeuerung) erfolgt am unteren Ende (Rand) der Charge, die Charge rutscht aufgrund der Schwerkraft nach.

Volllastbenutzungsdauer Quotient aus der jährlich erzeugten Energie (z. B. Wärmemenge) und der Nennleistung einer Anlage zur Energieumwandlung.

Waldrestholz Naturbelassenes und daher unbelastetes Holz, das direkt aus den Forsten stammt. Sowohl Stämme als auch daraus gewonnene Hackschnitzel werden als Waldrestholz bezeichnet.

Wassergehalt Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserhaltigen Brennstoffes.

Weichholz Holz mit einer mittleren Darrdichte bis 550 kg/m^3 (Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Erle, Weide und Pappel)

Wirkungsgrad Der Wirkungsgrad einer technischen Anlage (z.B. Kraftwerk) ist ein Maß für das Verhältnis des erreichten Nutzens gegenüber dem eingesetzten Aufwand bzw. das Verhältnis (der Quotient) aus nutzbarer Energie zu eingesetzter Energie.

Zellulose (Cellulose) ist sowohl von der Menge als auch von ihrer Verbreitung her das häufigste und bedeutendste Biopolymer in der Natur. Zellulose ist ein wasserunlösliches Polysaccharid der formalen Bruttozusammensetzung ($C_6H_{10}O_5$). Nahezu alle Zellwände der lebenden und abgestorbenen Pflanzenteile bestehen aus Zellulose; diese verleiht den Pflanzen Festigkeit und macht sie gegen den Einfluss des Regens unempfindlich. Die Zellulose der verwesenden Pflanzenteile wird durch Bakterien und Pilze unter Aufbau körpereigener Stoffe zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut. Im Holz ist die Zellulose (40 bis 50%) mit Lignin (20 bis 30%) und anderen Begleitsubstanzen (10 bis 30% Polyosen und andere Zellulosefreie Bestandteile sowie ca. 1% Mineralstoffe) vergesellschaftet.

Zyklon Zyklone sind Fliehkraftabscheider (Trägheitsentstauber), die Stäube aus der Luft oder aus Suspensionen entfernen.

Zyklonflugasche Als feine Partikel in den Rauchgasen mitgeführte feste, überwiegend anorganische Brennstoffbestandteile, die als Stäube im Wendekammer- und Wärmeübertragerbereich der Feuerung sowie in, dem Kessel nachgeschalteten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) anfallen.

Einheiten und Umrechnungsfaktoren

Verwendete Vorsätze und Vorsatzzeichen

Hekto-	h	10^2	Hundert
Kilo-	k	10^3	Tausend
Mega-	M	10^6	Million
Giga-	G	10^9	Milliarde
Tera-	T	10^{12}	Billion
Peta-	P	10^{15}	Billiarde
Exa-	E	10^{18}	Trillion

Umrechnung von Einheiten

	m³	**l**	**barrel** [1)]
1 m³	1	1 000	6,3
1 l	0,001	1	0,0063
1 barrel	0,159	159	1

1) siehe Glossar Seite 149

Umrechenfaktoren von Energieeinheiten

	kJ [1)]	**kcal**	**kWh**	**kg SKE** [2)]	**kg RÖE** [3)]	**barrel** [4)]	**m³ Erdgas**
1 kJ	**1**	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	$1{,}76\ 10^{-7}$	0,000032
1 kcal	4,1868	**1**	0,001163	0,000143	0,0001	$7{,}35\ 10^{-7}$	0,00013
1 kWh	3 600	860	**1**	0,123	0,086	0,000063	0,113
1 kg SKE	29 308	7 000	8,14	**1**	0,70	0,0052	0,924
1 kg RÖE	41 868	10 000	11,63	1,428	**1**	0,0074	1,319
1 barrel	5 694 048	1 360 000	1 582	194,21	136	**1**	179,42
1 m³ Erdgas	31 736	7 580	8,816	1,082	0,758	0,0056	**1**

1) Siehe Glossar Seite 159
2) SKE: Steinkohleeinheiten
3) RÖE: Rohöleinheiten
4) Siehe Glossar Seite 149