

Klimaschutzszenarien 2050 – Herausforderungen für die Abfallwirtschaft

U. Lahl & B. Zeschmar-Lahl

BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH, Oyten, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Industriestaaten werden bis 2050 eine 80 – 85%ige Reduzierung ihrer THG-Emissionen bezogen auf 1990 erreichen müssen. Dieser Zielkorridor wird auch auf die stoffliche Verwendung von Kohlenstoff Auswirkungen haben. Die Autoren zeigen, dass die stofflichen Kohlenstoff-Verbräuche schon heute eine vergleichbare Höhe aufweisen wie die energetische Nutzung von Kohlenstoff, wobei erstere zukünftig an Bedeutung gewinnen werden. Einer der wesentlichen „Organisatoren“ für diese Kreisläufe wird die Abfallwirtschaft sein. Die Autoren skizzieren den gegenwärtigen Kenntnisstand und leiten den zukünftigen Handlungs- und Forschungsbedarf für dieses Aufgabenspektrum ab.

1 EINLEITUNG

Das 2-Grad-Ziel lautet, nicht mehr als 450 ppm CO₂ in der Atmosphäre. Wie kann das gehen? Die internationale Verständigung lautet: Global eine Halbierung der Emissionen an Treibhausgasen bis 2050, Bezugsjahr ist 1990, wobei dies noch in der Diskussion ist. Die Industriestaaten sollen ihre Emissionen um 80% senken, manche Autoren nennen gar 95%. Was das für die Abfallwirtschaft in Deutschland bedeuten könnte, wird im Folgenden diskutiert.

2 HEUTIGER BEITRAG DES ABFALLSEKTORS ZUM KLIMASCHUTZ

Unbehandelter Hausmüll in Deutschland besteht, auch wenn sich die Zusammensetzung seit 1980 verändert hat, immer noch zu über 50 Gew.-% aus organischen Bestandteilen wie Bioabfall, Papier und Pappe, Kunststoffe, Windeln und ähnlichem.

2.1 Die Abfallablagerung

Bei Ablagerung auf einer Deponie werden die leicht abbaubaren organischen Verbindungen im Abfall relativ schnell, die schwer abbaubaren dagegen erst im Laufe der Zeit abgebaut. Dieser Abbau findet im Deponiekörper zumeist unter Abwesenheit von Sauerstoff (d.h. anaerob) statt, wobei Methan gebildet wird. Dessen Treibhauspotenzial (GWP₁₀₀) wurde vor wenigen Jahren mit 21 angegeben, dann mit 23, heute liegt es bei 25. D.h. Methan ist 25 Mal so klimawirksam wie CO₂ aus fossilen Quellen. Und das gilt auch für Methan, das aus dem anaeroben Abbau von Biomasse stammt.

Methan aus Deponien stellt in Deutschland die mit Abstand wichtigste Einzelquelle an Treibhausgasen dar. Zwar wurde die Deponierung von unbehandeltem Siedlungsabfall Mitte der 1990er Jahre verboten, doch erst durch die Abfallablagerungsverordnung von 2001 wurde das Ende der Deponierung ohne Vorbehandlung zum 01.06.2005 wirklich durchgesetzt. So konnten, wie Tab. 1 zeigt, die direkten Treibhausgasemissionen aus dem Abfallsektor von 1990 – 2007 um 40,4 auf 11,5 Mio. Mg CO_{2eq} entsprechend rund 71,5% gesenkt werden.

Die Abfallwirtschaft hat den größten prozentualen Beitrag zum Klimaschutz mit einem Rückgang der THG-Emissionen von über 70% bezogen auf den Ausgangswert 1990 geleistet. Absolut entspricht diese Reduktion von ca. 28,9 Mio. Mg CO_{2eq} beinahe 12% der Gesamtreduktion in Höhe von 246,9 Mio. Mg. Der wichtigste Effekt ist dabei die Reduzierung der deponie-

bürtigen Methanemissionen. Insgesamt wurden die Methanemissionen aus Deponien von 1,7 Mio. Mg im Jahr 1990 auf unter 0,4 Mio. Mg im Jahr 2007 reduziert. „Diese rückläufigen Methanemissionen der Quellgruppe 6.A.1 entsprechen 27 Mio. Tonnen/Jahr CO₂-Äquivalente und damit einer Minderung der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands um ca. 3%. Die Erfahrungen der deutschen Abfallwirtschaft zeigen, dass die Reduktion der abgelagerten Mengen biologisch abbaubarer Abfälle deutlich höhere Beiträge zum Klimaschutz erbringen kann als Fassung und Behandlung des Deponiegases.“ (Umweltbundesamt 2009a).

Tab. 1: Entwicklung der THG-Emissionen in Deutschland, in CO₂-Äquivalenten (Umweltbundesamt 2009a)

Quellgruppen	THG [Mio. Tonnen CO _{2eq}]						Veränderung 1990 – 2007
	1990	1995	2000	2005	2006	2007	
Energie	987,9	870,4	826,1	791,8	803,3	773,7	-21,7%
Industrieprozesse	119,8	121,2	100,8	107,8	109,0	116,1	-3,1%
Lösemittel, etc.	5,4	4,5	3,7	3,4	3,3	3,3	-38,9%
Landwirtschaft	61,6	54,4	55,4	52,8	52,1	51,5	-16,4%
Landnutzungsänd.	-28,2	-30,9	-32,1	-21,8	-15,6	-16,1	-42,9%
Abfall	40,4	34,3	22,1	13,1	12,3	11,5	-71,5%
Summe	1.186,9	1.053,9	976,0	947,1	964,4	940,0	-20,8%

Somit ist die Einstellung der Deponierung von Hausmüll und Gewerbeabfall in Deutschland die mit Abstand wichtigste Einzelmaßnahme, um die Verpflichtung des Kyoto-Protokolls zu erbringen. Allerdings verfügen die noch bis Juni 2005 verfüllten Deponien immer noch über ein erhebliches Methanemissionspotenzial. So zeigt die Treibhausgasbilanz für das Jahr 2008, dass die Restemissionen der Abfalldeponierung von gut 7,5 Mio. Mg CO_{2eq} aus Methan immer noch dominierend in diesem Sektor sind (Umweltbundesamt 2009b). Die restlichen klimarelevanten Emissionen (hier Distickstoffoxid = Lachgas) in Tab. 2 stammen vor allem aus dem Abwasserbereich und aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung sowie der Kompostierung.

Tab. 2: Treibhausgasemissionen (THG) in Äquivalenten, ohne CO₂ aus Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, für das Jahr 2008 (Umweltbundesamt 2009b)

2008	THG-Emissionen		CH ₄ -Emissionen		N ₂ O-Emissionen	
	Absolut [1.000 Mg CO _{2eq}]	in %	Absolut [1.000 Mg CO _{2eq}]	in %	Absolut [1.000 Mg CO _{2eq}]	in %
	Insgesamt	958.850	100,00%	47.745	4,98%	60.166
6. Abfall	10.859	1,13%	8.186	0,85%	2.673	0,28%
A. Abfalldeponierung	7.518	0,78%	7.518	0,78%		
B. Abwasserbehandlung	2.410	0,25%	100	0,01%	2.310	0,24%
D. M(B)A + Kompostierung	931	0,10%	568	0,06%	363	0,04%

2.2 Die biologische Abfallbehandlung

Wie Tab. 2 zeigt, tragen auch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung und die Kompostierung zur Emission von Treibhausgasen – neben Methan vor allem auch Lachgas – bei. Ihr Beitrag liegt bei knapp 10% der Gesamtemissionen aus dem Abfallsektor. Danach weist insbesondere die Kompostierung ein erhebliches Emissionspotenzial für organische Verbindungen und speziell auch klimarelevante Gase auf. Dies bestätigt auch eine im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführte Untersuchung des Emissionsverhaltens geschlossener bzw. teilgeschlossener Kompostierungs- und Vergärungsanlagen, also der Anlagen mit dem höchsten Emissionsschutzstandard (Cuhls et al. 2009). Danach lagen die Mittelwerte der geschlossenen Kompostanlagen bei 710 g Methan/Mg Bioabfall und bei 68 g Lachgas/Mg Bioabfall, was rechnerisch gut 36 kg CO_{2eq} pro Mg Bioabfall ausmacht. Bei einer offenen Kompostierungsanlage lagen während der Emissionsmessungen allerdings erhebliche Prozessstörungen vor, die insbesondere auf sehr hohe Wassergehalte in den Rottmieten zurückzuführen waren. Mit steigendem Wassergehalt verringerte sich das Luftporenvolumen in den Mieten, so dass sowohl die Luftdurchlässigkeit in der Holzhäckselschicht als auch die Belüftung der Rottmieten unzurei-

chend war. Die Emissionsfaktoren, die in dieser Anlage unter diesen Bedingungen ermittelt wurden, beliefen sich für Methan auf 11.000 g/Mg und für Lachgas auf bis zu 300 g/Mg Bioabfall. Diese Emissionsfaktoren stellen damit mögliche Werte dar, die in Kompostierungsanlagen mit rein aeroben Verfahren bei Fehlsteuerung erreicht werden können. Bei einem Treibhauspotenzial von 25 für Methan und von 298 für Lachgas kann die Emission in dieser Anlage somit rund 360 kg CO₂-Äquivalente pro Mg Bioabfall erreichen (Lahl 2009).

Bei biologischen Abfallbehandlungsanlagen ist die Emission klimarelevanter Gase nur mittelbar über die TA Luft begrenzt. So sind die in Tab. 3 genannten Emissionsbegrenzungen einzuhalten. Dabei stellt Methan in dem Summenparameter Gesamtkohlenstoff die größte organische Einzelkomponente dar. Bezüglich dieser Parameter ergab die oben zitierte Untersuchung biologischer Abfallbehandlungsanlagen Folgendes (Cuhls et al. 2009):

- Für Gesamtkohlenstoff (TOC) zeigt sich, dass von den untersuchten acht Kompostierungsanlagen lediglich drei die Massenstrombegrenzung von 0,5 kg/Stunde einhalten. Die untersuchten fünf Vergärungsanlagen überschreiten bis auf eine alle den Gesamtkohlenstoff-Massenstrom. Die Begrenzung der TOC-Massenkonzentration von 50 mg/m³ wird von allen untersuchten Vergärungsanlagen überschritten (Mittelwert rund 250 mg/m³).
- Bzgl. Ammoniak halten drei der untersuchten acht Kompostierungsanlagen und drei der untersuchten fünf Vergärungsanlagen die Massenstrombegrenzung von 0,15 kg/Stunde ein. Die Massenkonzentration von 30 mg/m³ wurde lediglich von einer Anlage im Reingas überschritten.
- Insgesamt hat nur eine einzige der insgesamt 13 Anlagen des Untersuchungsprogramms die Emissionswerte der TA Luft im Reingas eingehalten.

Diese Werte verdeutlichen zum Einen, welche Bedeutung eine sorgfältige Betriebsführung und deren Kontrolle auf die Emission klimawirksamer Gase hat. Zum Anderen zeigt sich aber auch, dass die Emissionen von Vergärungsanlagen mehr Aufmerksamkeit verdienen als bisher. So sind im NIR THG für Vergärungsanlagen für Bioabfälle bzw. MBA-Fractionen keine Emissionsfaktoren angegeben und in der dazu gehörigen EXCEL-Datei wird explizit darauf hingewiesen, dass die Quellgruppe 6.D „Andere“ lediglich die Abfallbehandlungsverfahren Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung und Kompostierung beinhaltet (Umweltbundesamt 2009b). Von daher ist nicht erkennbar, ob und wie die klimarelevanten Emissionen aus dem nicht-thermischen Anlagenteil von nicht-landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen bzw. Biogasanlagen im NIR berücksichtigt sind.

Klimarelevante Emissionen von Vergärungs- bzw. Biogasanlagen resultieren aus verschiedenen Quellen. Neben dem Umgang mit den Gärresten sind u.a. auch die Dichtigkeit der Anlage, die Fassung und die Reinigung der Abgase maßgeblich für die Höhe der Emissionen. Letztere treten insbesondere dann auf, wenn die emissionsrelevanten Anlagenteile nicht gasdicht ausgebildet sind. Die Übersicht aus dem zweiten Bundesmessprogramm zeigt, dass von den untersuchten rund 60 repräsentativen Biogasanlagen nur die Hälfte diesen Mindestanforderungen entspricht (Lahl 2009). Ein weiteres Problem des Klima- und Immissionsschutzes stellt die Ausbringung der Gärrückstände dar. Hohe Emissionen treten in der Praxis dann auf, wenn die Gärrückstände über ein hohes Emissionspotential verfügen. Dies ist etwa der Fall, wenn die Verweilzeiten in der Vergärung zu kurz sind. Faustgröße aus der Praxis sind 80 – 100 Tage Verweilzeit. Bei den untersuchten Biogasanlagen betrug in der Hälfte der Fälle die Verweilzeit in der Vergärung weniger als 100 und in knapp 20% der Fälle weniger als 50 Tage.

Fazit: Die Verweilzeiten sind häufig viel zu kurz. Daraus resultiert ein hohes Restgaspotenzial in den Gärresten. Dieses wiederum führt zu hohen Emissionen und Nachbarschaftskonflikten, insbesondere bei fehlender Abdeckung der Gärrückstände. Bei den seit 2004 neu gebauten Anlagen sind die Gärrestlager bei immer noch rund 50% offen, bei weniger als 40% sind sie gasdicht abgedeckt (Weiland 2009).

Tab. 3: Verwendete Emissionsfaktoren für NIR THG 1990 – 2007 (Umweltbundesamt 2009a)

Parameter/Begrenzung	TA Luft Nr. 5.2.5 Organische Stoffe (TOC)	TA Luft Nr. 5.2.4 Gasförmige anorganische Stoffe, Klasse III (Ammoniak)
Massenstrom	0,50 kg/Stunde	0,15 kg/Stunde
Massenkonzentration	50 mg/m ³	30 mg/m ³

2.3 Die mechanisch-biologische Abfallbehandlung

Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen wiesen in der Vergangenheit einen unterschiedlichen technischen Stand auf, von offener ungesteuerter Rotte auf Deponien bis hin zu technischen Systemen mit gekapselter Intensivrotte sowie Abgasfassung und -reinigung. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben müssen M(B)A-Anlagen heute einen hohen technischen Stand bzgl. Prozesssteuerung und Immissionsschutz aufweisen.

Alle Verfahren trennen in unterschiedlicher Trennschärfe Wertstoffe zur stofflichen Verwertung und mindestens eine heizwertangereicherte Fraktion zur Nutzung als Ersatzbrennstoff aus. Die klimarelevanten Emissionen bzw. Emissionseinsparungen der energetischen Verwertung werden allerdings nicht im Sektor Abfall, sondern im Sektor Energie bilanziell erfasst.

Bis auf die mechanisch(-biologische) Vorbehandlung vor der thermischen Behandlung (MBV) fällt jeweils auch mindestens eine Fraktion zur Ablagerung auf einer Deponie an. Hierbei handelt es sich um ausgeschleuste Inertstoffe und – je nach Verfahrenskonzept – auch um eine heizwertabgereicherte, biologisch stabilisierte Fraktion. Für die Ablagerung auf Deponien müssen beide Fraktionen die Grenzwerte im Feststoff und auch im Eluat einhalten.

Nach Thiel (2008) fallen pro Jahr etwa 1,4 Mio. Mg Deponiefractionen zur oberirdischen Ablagerung an. Diese darf, so sie die gesetzlichen Grenzwerte erfüllt, auf Deponien der Klasse II (Hausmüll) abgelagert werden. Allerdings darf diese Fraktion noch beachtliche Gehalte an organischer Substanz aufweisen (z.B. 18% Gesamtkohlenstoff in der Trockensubstanz), aus der auch nach der Ablagerung weiterhin Methan freigesetzt wird. So werden im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2007 (Umweltbundesamt 2009a) für geschlossene MBA-Anlagen, die die Begrenzungen der Emissionsfrachten der 30. BImSchV (2001) einhalten, die in Tab. 4 genannten Emissionsfaktoren verwendet.

Tab. 4: Verwendete Emissionsfaktoren für NIR THG 1990 – 2007 (Umweltbundesamt 2009a)

Treibhausgas	Emissionsfracht maximal [g/Mg Abfall] (Umweltbundesamt 2009a und 2009b)	GWP-Faktor*	Emissionsfracht [kg CO _{2eq} /Mg Abfall]
Lachgas, N ₂ O	100	310	31
Methan, CH ₄	55	21	1,155
Summe			32,155

* im NIR verwendet; aktuelle GWP: N₂O = 296, CH₄ = 25

Laut Thiel (2008) sind im Jahr 2007 rund 2,1094 Mio. Tonnen Hausmüll in 18 Rotteanlagen behandelt worden. Daraus lässt sich eine Treibhausgasemission von rund 67.800 Mg CO_{2eq} abschätzen. Dies erscheint angesichts der 7,52 Mio. Mg CO_{2eq}-Emissionen aus den Ablagerungen vor 2005 erst einmal recht gering (knapp 1%). Doch während letztere stetig zurückgehen werden, wird die Emission aus dem MBA-Deponiegut in den nächsten Jahren weiterhin in gleicher Höhe anfallen. Hinzu kommt, dass die abgelagerte organische Substanz nicht mehr für die energetische Nutzung zur Verfügung steht. Ein Teil der organischen Masse wird zu Humus – allerdings ist die Schadstoffbelastung dieses Materials so hoch, dass etwa eine spätere landwirtschaftliche Nutzung nicht möglich sein wird. So muss nach Stilllegung der Deponie eine mindestens 1 m dicke sog. Rekultivierungsschicht aufgebracht werden. Das für MBA-Rottegut berechnete Methanaufkommen wird überwiegend diffus aus dem abgelagerten Material freigesetzt und steht für eine energetische Nutzung nicht zur Verfügung. Allerdings muss der Deponiebetreiber gegenüber der zuständigen Behörde nachweisen, dass das im Deponiegas enthaltene Methan vor Austritt in die Atmosphäre weitestgehend oxidiert wird, z.B. durch Aufbringung einer sog. Methanoxidationsschicht. Die im Rottegut noch enthaltenen Schadstoffe wie Schwermetalle werden mit dem Deponiematerial nicht rückholbar in die Umwelt eingebracht.

Insgesamt ist daher unter den Aspekten Energieeffizienz, Klimarelevanz und Stoffstromlenkung die Sinnhaftigkeit der Deponierung von MBA-Rottegut zu hinterfragen. So rechnet etwa Prognos denn auch damit, dass zukünftig immer mehr Anlagen von der Erzeugung ablagerungsfähiger Deponiestabilate auf die Erzeugung von Ersatzbrennstoffen und in 5 – 10 Jahren eventuell zudem auf die Erzeugung von Biobrennstoffen aus der Schwerfraktion, die heute noch für die anschließende Deponierung biologisch vorbehandelt wird, umstellen werden (Alwast & Birnstengel 2010).

2.4 Verbliebene Handlungsdefizite

Die Einstellung der Deponierung von Haus- und Gewerbemüll in Deutschland ist die mit Abstand wichtigste Einzelmaßnahme, um die Verpflichtung des Kyoto-Protokolls zu erbringen.

Der Handlungsbedarf bei der Abfallverwertung ist heute im Wesentlichen ein Vollzugsproblem. Insbesondere die Einfachstanlagen, wo Kompostierung ohne Einhausung und Abgasfassung und Abgasreinigung betrieben wird, wie es sie in einzelnen Bundesländern noch gibt, sind nachzurüsten oder zu schließen. Aber auch für die technisch weiter entwickelten Kompostierungs- und Vergärungsanlagen besteht Handlungsbedarf, wie oben gezeigt wurde. Insbesondere ist sicherzustellen, dass die Emissionsbegrenzungen der TA Luft eingehalten werden.

Die Deponierung von MBA-Rottegut hat aufgrund ihrer Defizite bzgl. Energieeffizienz, Klimarelevanz und Stoffstromlenkung keine Zukunft.

3 KLIMASCHUTZSZENARIEN

Eine ganze Reihe wissenschaftlicher Erkenntnisse haben sich in den letzten Jahren weitgehend erhärtet, so dass man heute von weitgehend gesicherter Erkenntnis ausgehen kann. Hierzu gehören insbesondere (Rahmstorf & Schellnhuber 2006):

- Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist in den letzten gut 150 Jahren von 280 auf 380 ppm angestiegen.
- Die Ursache für diesen Anstieg ist in erster Linie das Verbrennen fossiler Energieträger und in zweiter Linie der Raubbau an natürlichen Wäldern.
- Die Wirkungen von CO₂ auf den Strahlenhaushalt der Erde sind bekannt (s.o.). Steigt die Konzentration an, führt dies zu einer Erwärmung der Erdoberfläche. Eine Verdopplung der Konzentration führt mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Temperaturerhöhung von 3 °C, wobei die Unsicherheit bei +/- 1 °C liegt.
- Die Temperaturen, die in den letzten Jahren gemessen wurden, waren die wärmsten seit Beginn der Messungen. Das Ausmaß der Erwärmung wird global mit 0,6 °C und für Deutschland mit rund 1 °C angegeben.
- Hierfür sind zwei Ursachen verantwortlich: Zum überwiegenden Teil sind dies die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen und zum gewissen Teil auch natürliche Gründe, wie Schwankungen der Sonnenaktivitäten.

Mittels Modellrechnungen können Zukunftsszenarien durchgespielt werden. Es sind insofern Zukunftsprognosen, als simuliert wird, welche Folgen bei variierten Randbedingungen dieser Modellberechnungen (Wenn/Dann) eintreten würden.

Um die Klimaprognosen über Modellrechnungen erfassen zu können, benötigt man zunächst eine Vorhersage, wie sich die Emissionen an Treibhausgasen entwickeln können. In den Jahren 1996 – 2000 haben Wissenschaftler für den IPCC 40 solcher Emissionsprognosen entwickelt und durchgerechnet. Die Ergebnisse sind in einem sog. Special Report on Emission Szenarios (SRES-Szenarien) zusammengefasst (IPCC 2000). In diesen Szenarien wird eine globale Steigerung der CO₂-Konzentration mit großer Bandbreite durchgespielt. Bis in das Jahr 2100 werden Konzentrationen von 540 – 970 ppm erwartet, also ein Anstieg der vorindustriellen Konzentration von 280 ppm um 90 – 250% (IPCC 2000). Da die Kohlenstoffkreisläufe der Erde selbst im Rahmen dieser Szenarien mit positiver Rückkopplung reagieren werden, liegen die resultierenden Konzentrationen genaugenommen bei 490 – 1.260 ppm, was die große Bandbreite der modellierten Szenarien unterstreicht.

In einem weiteren IPCC-Bericht wurden auf der Basis dieser Emissionen die resultierenden Klimaveränderungen in Form der sich jeweils einstellenden mittleren Temperaturerhöhungen berechnet. Im Ergebnis folgte aus diesen Berechnungen eine Erderwärmung, je nach Emissions-Szenario von 1,7 – 5,8 °C (Rahmstorf & Schellnhuber 2006). Wobei in diesen Berechnungen noch nicht die Erkenntnisse über mögliche Freisetzungen von Treibhausgasen aus der Biosphäre aufgrund der Klimaveränderung enthielten, die Berechnungen also keine worst case-Szenarien darstellen (Cox et al. 2000).

Im optimistischen Fall wird sich daher die Erdtemperatur auf einen Wert steigern, den wir in den letzten 100.000 Jahre auf der Erde nicht mehr hatten; unter ungünstigen Randbedingungen

steigt die Temperatur von 15 auf über 20 °C, was wohl über die letzten Jahrmillionen der Erdgeschichte einzigartig wäre (Rahmstorf & Schellnhuber 2006).

Auf der Basis dieser Erkenntnisse waren in den Folgejahren Empfehlungen für politische Entscheidungen zu geben.

Der deutsche WGBU hat 2003 das sog. Zwei-Grad-Ziel im Rahmen seiner Beratungen für die Bundesregierung gutachterlich unterlegt (WGBU 2003). Dieses Ziel bedeutet zunächst, dass die Treibhausgaskonzentration 450 ppm CO₂ (bzw. CO_{2eq.}) im Jahr 2050 nicht übersteigen sollte. Um dies zu erreichen, muss die Treibhausgasemission bis 2050 weltweit halbiert werden. Bezugsjahr für diese Zielsetzung ist nach WGBU das Jahr, welches auch für die Zielsetzungen im Kyoto-Protokoll das Bezugsjahr ist, nämlich 1990. Also zusammengefasst: Die globalen Emissionen aus dem Jahr 1990 sollen bis 2050 um 50% reduziert sein, dann wird das Zwei-Grad-Ziel, folgt man den beschriebenen Klimaberechnungen, einzuhalten sein – der Klimawandel also begrenzt werden können.

Das sog. Zwei-Grad-Ziel und seine damit verbundenen Implikationen wurde in den Folgejahren in vielen weiteren Studien untersucht, präzisiert und im Kern als wissenschaftlich sinnvolle und notwendige Zielsetzung befürwortet. Wobei den Beteiligten klar ist, dass das Zwei-Grad-Ziel kein Szenario darstellt, bei dem negative Auswirkungen der Klimaänderung vollständig vermieden werden können (EU EG Science 2008). Auch die politische Zustimmung nahm zu. Und wenn die große Klimakonferenz Ende 2009 ein Ergebnis hatte, dann die internationale politische Annahme des Zwei-Grad-Ziels. Offen blieb allerdings bis heute, wie man dieses Ziel erreichen kann und sollte.

So wird es nicht möglich sein, für alle Volkswirtschaften dieser Welt die Halbierung der Emissionen aus dem Jahr 1990 zu verlangen. Einige Zahlen mögen dies verdeutlichen. Im Wesentlichen haben die Industriestaaten den Klimawandel bis 2010 verursacht, nicht die Entwicklungsländer. Der jährliche Kohlendioxidausstoß auf jeden einzelnen Bewohner heruntergerechnet, beträgt in den USA rund 20 Tonnen, 8,5 Tonnen in der Europäischen Union, eine Tonne in Indien und unter einer Tonne für die meisten Entwicklungsländer. Würde man für die Entwicklungsländer eine Halbierung der Emissionen verlangen, würde dies weder mit dem Verursacherprinzip konform gehen, noch wäre dies gerecht. Somit ist man mit der Frage konfrontiert, wie eine gerechte Lastenverteilung der Minderungsmaßnahmen zwischen Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern aussehen müsste.

Soll die Zwei-Grad-Schwelle bei der globalen Erwärmung nicht überschritten werden, dürfen nach Berechnungen des WGBU weltweit kumuliert von 2010 bis 2050 nur noch 750 Mrd. Tonnen (Gigatonnen, Gt) CO₂ emittiert werden (Globalbudget). Wird die Weltbevölkerung im Jahr 2010 von ca. 6,9 Mrd. Menschen als Referenzgröße gewählt, ergeben sich jährlich 2,7 Tonnen CO₂-Emission pro Kopf (WGBU 2009). Diese Zielzahl zeigt ebenfalls, dass den Entwicklungsländern Raum für Entwicklung gegeben werden kann und muss.

Die Bundesregierung hat das Zwei-Grad-Ziel zur Grundlage ihrer Klimapolitik gemacht. Für Deutschland hat sich politisch durchgesetzt, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 40% zu senken (BMWT & BMUNR 2007). Die Festlegung eines verbindlichen Langfristziels ist noch offen. Der IPCC sieht für die Industrieländer bis 2050 eine Emissionsminderung von 80 – 95% im Vergleich zu 1990 als erforderlich an. Das deutsche Umweltbundesamt schließt sich dieser Einschätzung an und empfiehlt der Bundesregierung, für Deutschland eine Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80% gegenüber dem Jahr 1990 festzuschreiben (Umweltbundesamt 2009c). Das Bundesumweltministerium führt Studien durch, wie sich derartige Ziele praktisch umsetzen lassen (Nitsch 2008). In Österreich laufen unserer Beobachtung nach ähnliche Diskussionen (BMLFUW/AIZ 2010).

Den Umweltschutzgruppen ist diese Zielsetzung noch zu wenig ambitioniert. Sie verlangen für Deutschland, dass der Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2050 um etwa 95% im Vergleich zu 1990 sinken muss. Pro Kopf würde 2050 nur noch weniger als eine ½ Tonne CO₂/Jahr ausgestoßen werden – heute sind es rund elf Tonnen. Die hierfür durchgeführte Untersuchung zeigt, dass so ein Ziel durchaus nicht unrealistisch ist (Prognos AG & Öko-Institut e.V. 2010). Auch das deutsche Umweltbundesamt problematisiert mit einer Studie, ob die bisherigen anvisierten Emissionsminderungen zur Erreichung des Zwei-Grad-Ziels ausreichend sind (Umweltbundesamt 2010).

4 DER ZUKÜNFTIGE BEITRAG DES ABFALLSEKTORS

Was kommt auf die Abfallwirtschaft in dieser Zukunft zu? Welche politischen Modelle sind denkbar? Welche Anforderungen könnten erhoben werden? Was könnte die Abfallwirtschaft theoretisch an Reduktionsleistung erbringen? Werden andere Sektoren, um ihren jeweiligen Beitrag zu erbringen, den Abfallsektor tangieren bzw. unter Last nehmen?

Der Abfallsektor ist heute in den nationalen Klimaschutz-Inventaren auf unterschiedliche Sektoren verteilt. Daher war das politische Augenmerk bisher auch nicht so sehr auf diesen Sektor gelenkt. Mit größerem Nachdruck hat man über die Energieerzeugung, den Mobilitätssektor oder den Bereich „Wohnen“ diskutiert. Sicherlich ist auch gerade in Österreich und in Deutschland zu würdigen gewesen, welche großen Leistungen der Abfallsektor in den vergangenen Jahren durch Einstellung der Deponierung unbehandelter (und die Verbrennung und energetische Nutzung eben dieser) Abfälle geleistet hat. Gleichwohl ist ein Blick auf die Anforderungen der Zukunft angebracht. Zukunftsprognosen sind und waren immer wichtig, damit sich die Akteure einer Branche auf kommende oder mögliche Entwicklungen einstellen können.

Die Berechnungsgrundlagen von Klimaschutzszenarien fußen heute auf der Ermittlung der CO₂-Emissionen aus Emissionsquellen in die Atmosphäre. Der fossile Kohlenstoff, der in Form von Stoffen, Chemikalien oder Materialien in die Umwelt eingebracht wird, ist außerhalb dieser Betrachtung. In diesem Sinne kann dieser Kohlenstoff, der beispielsweise als Dämmstoff im Hausbau eingesetzt wird, als Kohlenstoffsenke betrachtet werden, vergleichbar den Wäldern und sonstigen Biomasselagern außerhalb der Technosphäre. Dieser Kohlenstoff wird erst dann relevant, wenn dieses Inventar aus der Nutzung in den Abfallsektor entlassen und dort ggf. zu CO₂-Emissionen in die Atmosphäre umgewandelt wird.

Es ist zudem erklärte Strategie des Klimaschutzes, derartige Senkenfunktionen gezielt zu nutzen und auszubauen. So wird in unterschiedlichen Projekten daran gearbeitet, sogar fossiles CO₂ in organische Verbindungen umzuwandeln und diese als Senke in die Technosphäre einzubringen. Gegenwärtig wird der Kohlenstoff in derartigen Senken, unabhängig davon, ob er fossilem oder biogenen Ursprungs ist, gleich behandelt. Welche Probleme sind zu erwarten?

Zunächst stellt sich die Frage, ob die Klimaschutzpolitik, will sie in den nächsten Jahren ernsthaft die oben genannten Ziele anvisieren, die Stoffwelt weiter wird ausblenden können. Heute gehen rund 5% des fossilen Kohlenstoffs in den Chemiesektor. Dieser Anteil wird sich in den relevanten Klimaschutzszenarien bis 2050 deutlich erhöhen. Ursache sind Stoffe für die Wärme- und Kälteisolierung, der Umstieg von Metall auf Kunststoffe, vermehrter Einsatz von Baustoffen aus organischem Material uvm.

Da aber alle diese Materialien endliche Lebenszeiten aufweisen, entsteht auf diesem Feld zukünftig ein neuer Bedarf an Dienstleistungen, natürlich mit einer gewissen Zeitverzögerung. Die Dienstleistung wird einerseits die klassische Recycling- und Entsorgungsaufgabe bleiben, mit stetig steigendem Geschäftsumfang. Die Dienstleistung wird andererseits aber auch sein, dies alles ohne nennenswerte CO₂-Emissionen zu erbringen.

Versuchen wir das Problem ganz plastisch zu verdeutlichen: In den Jahren nach 2030 wird die „Kohlenstoffschraube“ in den relevanten Klimaschutzszenarien deutlich anzuziehen sein. Wenn dann die organischen Senkenstoffe fossilen Ursprungs zunächst langsam, aber in immer größerem Umfang in den Abfallsektor eingebracht werden, führt dies dort, würde man die heutigen Entsorgungstechniken anwenden, zu erhöhten CO₂-Emissionen. Im Jahr 2050 würde es in einem 95%-Szenario ausreichen, die Abfallwirtschaft wie heute weiter zu betreiben, und das Einsparziel würde verfehlt.

Steht und fällt die Klimaschutzpolitik im Jahr 2050 in den westlichen Industriestaaten mit der Überwindung der Abfallverbrennung?

Bevor jetzt auf der falschen Seite Jubel ausbricht: Die Situationseinschätzung für den Zeitraum 2050 ist nicht trivial. Es ist anzunehmen, dass die heutige Fokussierung der Instrumente des Klimaschutzes auf CO₂-Emissionen als unzureichend erkannt werden wird. Kann und muss man den Emissionshandel auf gebundenen Kohlenstoff in Materialien ausdehnen? Dies wäre sicherlich erforderlich, will man die Stoffherzeugung stärker weg von Öl und Gas hin zu Biomasse steuern. Technologisch ist dies kein grundsätzliches Problem; nur aus ökonomischen Gründen kommen Projekte wie die der Bioraffinerie bisher aus dem Pilotmaßstab nicht heraus.

In einem Zukunftsszenario mit einer Stoffproduktion, die hauptsächlich aus Biomasse stattfindet, entspannt sich die Situation für die Abfallwirtschaft resp. die thermische Abfallbehand-

lung. Anders sähe dies aus, wenn 2050 die Energieträger für die Müllverbrennung hauptsächlich fossilen Ursprungs wären. Aber die Situation 2050 wird für die thermische Abfallbehandlung schwierige Herausforderungen stellen. Dies macht allein die Überlegung deutlich, dass selbst bei vollständiger Umstellung der Stoffproduktion auf nachwachsende Biomasse die bis heute (und den nächsten Jahren) verbauten Materialien 2050 anteilig zu Abfällen werden und in die Abfallentsorgung drücken.

Kann unter diesen Überlegungen die Deponie eine Wiederbelebung erfahren, als Kohlenstoffsenke?

Sicherlich nicht in Form des Methanreaktors der vergangenen Jahre. Aber was wäre mit einer organischen Inertstoffdeponie, also in etwa die Richtung, vielleicht noch etwas weiter inaktiviert als die MBA-Deponie? Oder als reine Kunststoffdeponie fossilen Ursprungs? Und Sicherheitsbedenken könnten gleich mit in die gleiche Tonne geworfen und zerstreut werden, in dem auch die Sicherheitsbedenken gegen CCS (Carbon Capture and Storage) kommen werden. Denn das große Argument lautet, den Klimawandel zu verhindern, ist wichtiger als alles andere. Etwaige Sicherheitsrisiken wären in diesem Argumentarium technisch zu lösen, mit gewissen Restrisiken, die dann zu vertreten sind. Und CCS-Speicher sind genauso wenig vollständig dicht, wie die Inertdeponie für Kunststoffe vollständig inert ist, – auch ein gutes Argument.

Aber es gibt bessere Alternativen. Kann das stoffliche Recycling aus diesem Dilemma führen? Fossiler Kohlenstoff ist ohne Klimarelevanz, solange man ihn im Kreislauf behalten kann. Und zukünftig wird hier mehr möglich sein, als dies heute der Fall ist. Wir können uns ein Jahr 2050 vorstellen, in dem die MVA Inputkontrollen durchführt, weil sie nicht mehr als beispielsweise 10% fossilen C im Monatsmittel verbrennen will/darf? Sollten in diesem Szenario die Deponien weiter geschlossen bleiben, wäre die Abfallwirtschaft der Gewinner. Das stoffliche Recycling könnte technisch deutlich intensiver betrieben werden, als das heute der Fall ist, weil die ökonomische Basis hierfür vorhanden wäre. Und die Abfallwirtschaft geht „in line“ mit dem Klimaschutz. Kann so ein Szenario technisch und ökonomisch funktionieren?

5 OFFENE FRAGEN

Es gibt für die Abfallwirtschaft im Rahmen der ambitionierten Klimaschutzenszenarien viele offene Fragen. Während in anderen Sektoren, wie im Bereich der Energie- oder der Mobilitätsforschung, sehr viele Studien und Szenarien erstellt bzw. gerechnet wurden, ist die Daten- und Erkenntnislage für die Abfallwirtschaft eher dünn.

Die Basis zum besseren Verstehen der zukünftigen Entwicklungen und Handlungsstränge sind die globalen und nationalen Kohlenstoffströme. Im Jahr 2000 wurde in Deutschland auf der Ebene der Endnutzung rund 250 Mio. Mg C energetisch genutzt und 228 Mio. Mg C gelangen in eine stoffliche Nutzung (Uihlein 2006). Dabei wird unter energetischer Nutzung die thermische Umwandlung eines Energieträgers zu Elektrizität, Wärme oder anderer Nutzenergie verstanden. Die stoffliche Nutzung wird dominiert vom Bereich Landwirtschaft (Assimilation von atmosphärischem Kohlenstoff). Danach folgen Produkte des verarbeitenden Gewerbes und Abfälle bzw. Reststoffe. Man sieht aus diesem Zahlenvergleich, dass die bisherige Fokussierung der Klimabilanzierung auf den Bereich Energiewirtschaft und Industrie zu überdenken ist.

Zum Einen ist festzustellen, dass die Landwirtschaft für die Klimabilanzen stärkere Beachtung zu schenken ist. Zum Anderen ist bedeutsam, dass die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff im Jahr 2000 schon vergleichsweise hohe Werte aufweist. Bei der Entwicklung von Zukunftsszenarien ist der stofflichen Nutzung von Kohlenstoff u.E. zukünftig eine höhere Bedeutung beizumessen. Denn die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff trägt über Jahre und Jahrzehnte dazu bei, dass in der Technosphäre ein immer größer werdender Kohlenstoffpool angehäuft wird. Dieser Kohlenstoffpool besteht aus fossilen und nachwachsendem C. Beides führt aber am Ende der Nutzung der stofflichen Produkte in die Abfallwirtschaft.

Die Abfallwirtschaft ist bereits heute einer der bedeutsamsten Erzeuger von Kohlenstoffprodukten. Diese Bedeutung wird sich in Zukunft verstärken. Wenn man die einzelnen Segmente der Kohlenstoffströme in Deutschland analysiert, so die Prozesskette Öl, sind bereits heute die wichtigsten Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen die Erhöhung der Lebensdauer der Kunststoffprodukte und die Recyclingquote (Uihlein 2006).

Der Forschungsbedarf setzt bei Prognosefragen an. Eine wie oben dargestellte Reduktion der CO₂-Emissionen auf 80 oder gar 95% für das Jahr 2050 wird nur funktionieren, wenn es in den Volkswirtschaften bindende Instrumente gibt, die diese Reduktion über den genannten Zeitraum erzwingen. Dieser Druck lastet aber nicht nur auf den Kohlenstoffströmen für den Energiesektor. Der zahlenmäßig zukünftig bedeutsamere Bereich der stofflichen Kohlenstoffströme wird ebenfalls seinen Beitrag zu erbringen haben. Hinzu kommt, dass die stofflichen und energetischen Bereiche intensiv mit einander verflochten sind.

Wir benötigen daher bessere Modelle, die uns helfen, die stofflichen Kohlenstoffströme der Zukunft zu verstehen.

Dann wird der Abfallsektor oder vielleicht besser das Ressourcenmanagement der stofflichen Kohlenstoffströme ein Kernbereich sein, um im Stoffsektor Klimaschutzziele zu erreichen. Daher sollte im Rahmen der politischen Operationalisierung der nationalen Klimaschutzziele nicht der Weg gescheut werden, sich über Sektorziele zu verständigen. Sektorziele helfen den Akteuren in den einzelnen Sektoren, ihre eigenen Planungen auszurichten. Die Festlegung von Sektorzielen ist eine schwierige Aufgabe, weil die Sektoren jeweils eigene fachliche und politische „Statiken“ aufweisen.

Die Diskussionen in den Sektoren sind unterschiedlich weit vorangeschritten. Die Abfallwirtschaft wird sich, sofern ihre Bedeutung für den Klimaschutz in einer breiteren politischen Öffentlichkeit bewusster werden wird, der Diskussion um ein eigenes Sektorziel nicht entziehen können. Hierfür sind vorbereitende Forschungen erforderlich, die auf der Basis von Szenarien über die Entwicklung der Kohlenstoffströme machbare Korridore untersuchen. Denn eine Vorgabe, das Sektorziel für die Abfallwirtschaft abzuleiten, ist die 80 bzw. 95%ige Reduktion der heutigen Emissionen. Nur, macht diese Ableitung Sinn und ist das so ermittelte Sektorziel umsetzbar? Schließlich ist, wie oben ausgeführt, die Abfallwirtschaft der Zukunft mit deutlich größeren Stoffströmen konfrontiert.

Und schließlich ist ein bisher unzureichend beleuchtetes Forschungsfeld die Landwirtschaft und die biologischen Verfahren zur Gewinnung von Energie und Stoffen aus landwirtschaftlichen Assimilations-Produkten. Hier gibt es viele Berührungspunkte, wie ebenfalls oben ausgeführt, mit aktuellen Diskussionen in der Abfallwirtschaft. In einem Korridor in Richtung auf die genannten Reduktionen von Treibhausgasen wird man biologische Verfahren, die in dem heutigen Umfang Methan- oder Lachgas emittieren, nicht akzeptieren können. Aber wie weit kann man an dieser Stellschraube drehen, ohne dass es zu Treibhausgasemissionen an anderer Stelle kommt? Aktuell wird hierüber in Deutschland gerade intensiv am Beispiel einer neu zu errichtenden Vergärungsanlage gestritten.

Abschließend stellt sich die Frage, ob man angesichts einer so radikalen Diskussion über sektorale Reduzierungen und Kohlenstoffkreisläufe erschreckt sein sollte. Dies ist allerdings auch eine Frage der Mentalität. So sind in einem Umbruch auch immer Chancen verborgen. Gerade die Ökonomen haben in der letzten Zeit überraschende Erkenntnisse produziert. Es könnte funktionieren und müsste gar nicht so unerschwinglich sein. Denn die staatlich fixierten Rahmen und Zielvorgaben setzen enorme Innovationskräfte frei – die Geschichte kennt viele Beispiele.

6 SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Aktuell ist offen, ob sich die internationale Staatengemeinschaft auf ein bindendes Klimaschutzabkommen einigen wird. Gelingt eine Verständigung, hat dies Auswirkungen auf alle wirtschaftlichen Sektoren – auch auf die Abfallwirtschaft. Aber was bedeuten die heute diskutierten Zielvorgaben einer Senkung der Treibhausgasemissionen von 80 oder gar 95% für den Abfallsektor? Eine umfassende Antwort auf diese Frage wird in diesem Beitrag nicht gegeben – dafür ist es zu früh. Vielleicht nur eine Schlussfolgerung: Die Diskussion über Sektorziele wird kommen, man sollte also vorbereitet sein. Ein besseres Verständnis der heutigen C-Kreisläufe, insbesondere der stofflichen Nutzung, ist als Basis für diese Diskussion erforderlich. Schon heute sind strategische Überlegungen, welche Bedeutung das Management der C-Stoffströme haben wird und welche Dienstleistung die Abfallwirtschaft bzw. ihre innovativen Akteure sich zutrauen, erforderlich, um den Herausforderungen der Zukunft begegnen zu können.

LITERATUR

- Alwast, H. & Birnstengel, B. (2010) Verbrennungs- und Ersatzbrennstoffmarkt in Deutschland und Europa. *Müll-Handbuch* Kz. 0171, Lfg. 2/10.
- BMLFUW/AIZ (2010) EU: 30%ige Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Gespräch. 26.05.2010, <http://www.lebensministerium.at/article/articleview/82925/?SectionIDOverride=110>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWT) & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUNR) (2007) Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm <http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/40514.php>.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A. & Totterdell, I.J. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184 – 187.
- Cuhls, C., Mähl, B., Berkau, S. & Clemens, J. (Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH) (2009) Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen: 206 33 326, Berlin.
- EU Climate Change Expert Group (EU EG Science) (2008) The 2 °C target. Background on Impacts, Emission Pathways, Mitigation Options and Costs. Information Reference Document. Vgl. IPCC (2007b): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Zitiert in Umweltbundesamt (2009c).
- IPCC (2000) Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.): Special Report on Emission Szenarios. A Special Report on Working Group III on the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Cambridge University Press, Cambridge).
- Lahl U. (2009) Notwendiger Handlungsbedarf. Der Immissionsschutz bei der Energiegewinnung aus Biomasse muss optimiert werden. *Müllmagazin/ReSource* 3, 12 – 15.
- Nitsch, J., in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik (2008) Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Zusammenfassung der Ergebnisse – Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008_zusf.pdf.
- Prognos AG & Öko-Institut e.V. (2010) Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050, Berlin; Studie im Auftrag des WWF Deutschland, http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf.
- Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H.J. (2006) Der Klimawandel – Diagnose, Prognose, Therapie. München: C.H. Beck.
- Thiel, S. (2008) Systemtechnische Analyse der mechanisch(-biologisch)en Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland. *Müll-Handbuch* Kz. 2930, Lfg. 2/08.
- Uihlein, A. (2006) Modellierung der Kohlenstoffströme zur Untersuchung der Nutzung von Kohlenstoffträgern in Deutschland. *IWAR Schriftenreihe* 181, Darmstadt.
- Umweltbundesamt (2009a) Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2007. Berichterstattung unter der Klimakonvention der Vereinten Nationen, Dessau, März 2009. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/treibhausgasinventar2009_de.pdf.
- Umweltbundesamt (2009b) Umweltbundesamt: Emissionsentwicklung 1990 – 2008, Treibhausgase, inkl. erweiterte Auswertung und Äquivalentemissionen der Treibhausgase http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/archiv/EM_Entwicklung_in_D_Trendtabelle_THG_v2.1_EU-Submission_2010.xls.zip.
- Umweltbundesamt (2009c) Konzeption des Umweltbundesamtes zur Klimapolitik. Notwendige Weichenstellungen 2009. *CLIMATE CHANGE* 14/2009 <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3762.pdf>.
- Umweltbundesamt (2010) Post-2012 climate regime – How industrial and developing nations can help to reduce emissions – assessing emission, trends, reduction potentials, incentive systems and negotiation options. *CLIMATE CHANGE* 02/2010 <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3954.pdf>.
- WGBU (2003) Über Kyoto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten für die Bundesregierung. Berlin 2003, und WGBU: Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit, Berlin Heidelberg 2003.
- WGBU (2009) Kassensturz für den Weltklimavertrag – der Budgetansatz. Berlin.
- Weiland, P. (2009) Bundesmessprogramm II. KRdL-Expertenforum, Bonn, 4. November 2009; zit. in Lahl 2009.