

Begleitende Studien zur Phase 1 des Projekts Dokumentation zum Abschlussbericht

Studie Klimaneutrale Abwasser- und Abfallbehandlung der Stadt und Region Hannover

Bearbeiter: Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft, Bereich: Abfallwirtschaft, Stoffstrommanagement und Anaerobe Verfahren, Dr.-Ing. Dirk Weichgrebe, Dipl.-Ing. Ralph Zwafink

Bearbeitungszeitraum: Januar 2014, Juni 2014 und November 2014

Hinweis: Die Ergebnisse wurden teilweise in der Strategieguppe Regionale Wirtschaftskreisläufe/Abfallwirtschaft vorgestellt und diskutiert.

Die Studie hatte zum Ziel, für die Region Hannover Potenziale für eine klimaneutrale kommunale Abwasserbehandlung und Abfallwirtschaft insbesondere im Hinblick auf eine Reduzierung der Treibhausgase durch Energieeinsparung und Emissionsminderung zu quantifizieren. Die konkrete Fragestellung lautete, ob im Jahr 2050 die Abwasser- und Abfallbehandlung in der Region Hannover klimaneutral erfolgen kann.

Für die Abwasserbehandlung wurde eine Datenerhebung unter den 26 Kläranlagen der Region durchgeführt und es konnten 95 % der Einwohnerwerte direkt ausgewertet werden. Die restlichen 5% wurden anhand der Größenklasse der Abwasserreinigungsanlage extrapoliert. Für die Abfallwirtschaft wurden die Daten vom Zweckverband Abfallwirtschaft Region Hannover (aha) für die Standorte Lahe, Kolenfeld, Burgdorf, Gehrden und Wiedenbrügge ausgewertet sowie die Anteile der thermischen Abfallbehandlung in den Anlagen Buschhaus, Hameln und Lahe berücksichtigt. Für das Jahr 2050 wurden Vorgaben zu den CO₂-Emissionsequivalenzfaktoren berücksichtigt und Annahmen getroffen, wie sich die Abwasser- und Abfallbehandlung verändern bzw. wie eine klimaneutrale Entsorgung erreicht werden kann.

Die wichtigsten Ergebnisse aus der Studie stellen sich wie folgt dar:

Bei der Abwasserbehandlung kann eine Reduktion des Treibhausgaspotenzials von ca. 42.000 t CO₂-eq/a in 2012 (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2012) auf ca. 24.065 bzw. 24.926 t CO₂-eq/a in 2050 (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2050) je nach Klärschlammverwertungskonzept erreicht werden. Die anfallenden CO₂-Äquivalente in 2050 sind größtenteils auf direkte Emissionen an Kohlendioxid, Methan und Lachgas zurückzuführen. Eine CO₂-neutrale Abwasserreinigung würde einen vollständig eingehausten Prozess mit entsprechender Abluftbehandlung benötigen. Wäre diese Voraussetzung für 2050 erfüllt, überwiegen die Vorteile einer Faulung aufgrund der höheren bereitgestellten nutz- und speicherbaren Energiemenge bzw. -form.

Während für die Abfallwirtschaft das Treibhausgaspotenzial im Jahr 2012 mit ca. 153.000 CO₂-eq/a (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2012) noch deutlich positiv ist, kann mit den in der Studie betrachteten Maßnahmen im Jahr 2050 eine klimaneutrale Abfallbehandlung erreicht werden. Verantwortlich für die leicht negative CO₂-Bilanz der Abfallbehandlung in 2050 von ca. -5.000 t CO₂/a (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2050) sind vor allem die nicht

mehr vorhandenen Treibhausgasemissionen aus der dann abgedichteten Deponie Lahe. Die ausschließliche stoffliche Nutzung der Abfälle (Erhöhung des Recycling) sowie die Biogasproduktion durch Vergärung des Bioabfalls und des organischen Anteils des Restabfalls wirken sich auf Grund der geringen Gutschriften für CO₂-Äquivalente in der CO₂-Bilanz für 2050 nicht mehr aus. Für die Abfallwirtschaft ist weiterhin Deponieraum für inertes und nicht recyclingfähiges Material sowie zur Ausschleusung von gefährlichen Abfällen vorzuhalten. Die Annahme einer Zero-Waste Gesellschaft in 2050 in dem Sinne, dass alles verwertet und weder Sortierreste noch auszuschleusende Gefahr- oder Giftstoffe entstehen, wird als nicht realistisch erachtet. Eine weitest gehende Annäherung ist möglich, jedoch müssen Aufwand und Nutzen gerechtfertigt sein und nicht zu weiteren Umweltbelastungen führen.

Folgende Empfehlungen für den Masterplan-Prozess können aus der Studie abgeleitet werden:

Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionsäquivalente bei der Abwasserbehandlung:

1. anaerobe Schlammbehandlung und Faulgasnutzung zur Energiegewinnung aller Kläranlagen
2. geeignete Abdeckung und Abluftbehandlung zur Vermeidung von Treibhausgasen
3. thermische Verwertung des gesamten anfallenden Klärschlamm zur Energieerzeugung
4. Nutzbarmachung der Abwärme im Kanalnetz

Maßnahmen zur Erreichung einer klimaneutralen Abfallbehandlung im Jahr 2050:

1. vollständige Oberflächenabdichtung der Deponien
2. Annäherung an eine „Zero-Waste“ Gesellschaft
3. Vergärung des Bioabfalls und Nutzung des Biogases

Die Verknüpfung von Stoff- und Energieströmen der Abwasser- und Abfallbehandlung bietet eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der CO₂-Emissionen und kann zu einer höheren Wirtschaftlichkeit beider Sektoren führen. Denkbare Ansätze hierzu sind:

1. Nutzung von Abwärme aus der Abfallbehandlung zur Klärschlamm Trocknung
2. Co-Fermentation von geeigneten Abfällen in freien Faulbehälterkapazitäten
3. gemeinsame Faul- und Gär gasaufbereitung sowie Einspeisung des Methans ins Gasnetz
4. gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsstrategie hinsichtlich Stickstoff und Phosphor aus dem Klärschlamm und den Gärresten



INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT UND ABFALLTECHNIK
LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
Prof. Dr.-Ing. K.-H. Rosenwinkel

Bereich Abfallwirtschaft, Stoffstrommanagement und Anaerobe Verfahren

Leitung: Dr.-Ing. Dirk Weichgrebe

Klimaneutrale Abwasser- und Abfallbehandlung der Stadt und Region Hannover

im Auftrag der

Region Hannover

Bearbeitung:

Dr.-Ing. Dirk Weichgrebe,

Dipl.-Ing. Ralph Zwafink

Leibniz Universität Hannover

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft

Bereich: Abfallwirtschaft, Stoffstrommanagement und Anaerobe Verfahren

Welfengarten 1

30167 Hannover

Hannover, erstellt im Januar 2014,

1. Überarbeitung, Juni 2014
2. Überarbeitung (zusätzlich Variantenvergleich Klärschlammverwertung), November 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung.....	7
2	Methodik.....	9
2.1	Referenzwerte und Bilanzierung	9
2.2	Generelle Annahmen	10
3	Abwasserbehandlung.....	12
3.1	Bilanzjahr 2012.....	13
3.1.1	Bilanzrahmen.....	13
3.1.2	Ergebnisse 2012.....	14
3.2	Bilanzjahr 2050.....	15
3.2.1	Annahmen	15
3.2.2	Maßnahmen.....	15
3.2.1	Untersuchte Varianten der Klärschlammbehandlung	16
3.2.2	Ergebnisse 2050.....	17
3.2.2.1	Klärschlammmengen - Massenbilanz.....	18
3.2.2.2	Energiebilanz.....	19
3.2.2.3	CO ₂ -Emissionen	19
3.3	Bilanzvergleich 2012 und 2050	21
3.4	Stoffstromtrennung.....	23
4	Abfallbehandlung.....	26
4.1	Bilanzjahr 2012.....	26
4.1.1	Bilanzrahmen.....	26
4.1.2	Ergebnisse 2012.....	27
4.2	Bilanzjahr 2050.....	29
4.2.1	Annahmen	29
4.2.2	Maßnahmen.....	29
4.2.3	Ergebnisse 2050.....	30
4.3	Bilanzvergleich 2012 und 2050	32
5	Sektorübergreifende Maßnahmen.....	33
5.1	Nutzung von Abwärmen aus der Abfallbehandlung am Standort Lahe.....	33
5.2	Verwertung der Reststoffe aus der biologischen Abfallbehandlung (BA).....	34
5.3	Sektorübergreifende Biogas- oder Biomethanproduktion.....	35

5.4	Gegenüberstellung anhand der Bewertungsansätze von Treibhausgasemission und Kosten	36
6	Zusammenfassung	38
7	Anhang – Datengrundlage und getroffene Annahmen	40
7.1	Abwasserbehandlung	40
7.1.1	Datengrundlage 2012	40
7.1.2	Betriebs- und Hilfsstoffe	44
7.1.3	Direkte Treibhausgasemissionen	45
7.1.4	Klärschlammengen - Massenbilanz	46
7.1.5	Klärschlammtransport	49
7.1.6	Landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes	50
7.1.7	Thermische Verwertung des Klärschlammes	51
7.1.8	Energiebilanz	53
7.1.9	CO ₂ -Bilanzierung der Klärschlammverwertung	54
7.1.10	Zusammenfassender Variantenvergleich	55
7.1.11	Energiegutschriften für Wärmetauscher und Faulgasnutzung	57
7.1.12	Energieverbrauch	58
7.1.13	Detailübersicht der CO ₂ -Bilanzierung Abwasserbehandlung	59
7.2	Abfallbehandlung	62
7.2.1	Abfallmengenströme und Massenbilanz	62
7.2.2	Berechnung des Kohlenstoffinventars – regenerativer und fossiler Anteil	64
7.2.3	Deponiegasemissionen	67
7.2.4	Kompostierung	68
7.2.5	Recycling	69
7.2.6	Thermische Abfallbehandlung	71
7.2.7	Fuhrpark	72
7.2.8	Detailübersicht der CO ₂ -Bilanzierung Abfallbehandlung	73
8	Literatur	79

Abb. 1:	Standortkarte der Kläranlagen in der Region Hannover	12
Abb. 2:	Datengrundlage und Einwohnergleichwerte (EW) für die Bilanzierung der Abwasserbehandlung in der Region Hannover	13
Abb. 3:	Bilanzrahmen der Abwasserbehandlung	13
Abb. 4:	Verfahrensketten der thermischen Verwertung von Klärschlamm	16
Abb. 5:	Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der direkten Verbrennung (inkl. geeigneter Abdeckung der Anlagen und Abluftbehandlung) in 2050.	18
Abb. 6:	Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der zweistufigen thermischen Verwertung.	18
Abb. 7:	Gegenüberstellung der CO ₂ -Emissionen und CO ₂ -Gutschriften der Abwasserbehandlung für die Bilanzjahre 2012 und 2050 mit entsprechend unterschiedlichen CO ₂ -Emissionsäquivalenzfaktoren	22
Abb. 8:	Standortkarte der Abfallbehandlung der Region Hannover	26
Abb. 9:	CO ₂ -Gesamtemissionen des Bilanzjahres 2012 der Abfallwirtschaft	27
Abb. 10:	CO ₂ -Gesamtemissionen des Bilanzjahres 2050 der Abfallwirtschaft	31
Abb. 11:	Gegenüberstellung der CO ₂ -Emissionen und CO ₂ -Gutschriften der Abfallbehandlung für die Bilanzjahre 2012 und 2050 mit entsprechend unterschiedlichen CO ₂ -Emissionsäquivalenzfaktoren	32
Abb. 10:	Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der direkten Verbrennung (inkl. geeignete Abdeckung der Anlagen und Abluftbehandlung) in 2050.	47
Abb. 11:	Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der zweistufigen thermischen Verwertung.	49
Abb. 12:	Fließbild der Abfallströme für das Bilanzjahr 2012	62
Abb. 13:	Fließbild der Abfallströme für das Jahr 2050	62
Abb. 14:	Veränderung der regenerativen und fossilen Anteile in den einzelnen Anlagenteilen der MBA	66
Abb. 15:	angenommene Aufteilung bzw. Sortierung des Restabfalls für 2050	69
Abb. 16:	Bilanzierungsgrenze bei Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung	71

Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AG	Altglas
aha	Zweckverband Abfallwirtschaft Region Hannover
BA	Biologische Restabfallbehandlungsanlage
BAK	Bioabfallkompostierung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB ₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el	elektrisch
E-Schrott	Elektro-Schrott
FHM	Flockungshilfsmittel
GA	Gewerbeabfall
GAK	Grünabfallkompostierung
GB ₂₁	Gasbildungsrate nach 21 Tagen
GK	Größenklasse
GuD	Gas- und Dampfturbinen
HM	Hausmüll
HMG	Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
HT	Hochtemperatur
hwr	heizwertreich
IE	Leipziger Institut für Energie GmbH
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISAH	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
K	Kalium
KA	Kläranlage
KN	Kjeldahl-Stickstoff
KS	Klärschlamm
KW	Klärwerk
LKW	Lastkraftwagen
LVP	Leichtverpackung
landwirt.	landwirtschaftlich
MA	Mechanische Restabfallbehandlungsanlage
MBA	Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung
MVA	Müllverbrennungsanlage
N	Stickstoff
NT	Niedertemperatur
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NR	Nachrotte
OS	Originalsubstanz
P	Phosphor
PPK	Papier, Pappe, Karton
RTO	Regenerative Thermische Oxidation

SBS	Sekundärbrennstoff
SM	Sperrmüll
TASi	Technische Anleitung Siedlungswasserwirtschaft
TC	engl.: <i>total carbon</i> = Gesamtkohlenstoff
THG	Treibhausgas
therm	thermisch
(o)TS	(organische)Trockensubstanz
TW-Tage	Trockenwettertage
Vol.-%	Volumenprozent
WG	Wassergehalt

Einheiten

a	lat.: <i>annus</i> = Jahr
d	engl: <i>day</i> = Tag
E	Einwohner
EW	Einwohnergleichwert
eq	Äquivalent (engl.: <i>equivalent</i>)
g	Gramm
J	Joule
K	Kelvin
l	Liter
m ³ _N	Kubikmeter im physikalischen Normzustand
t	Tonne
W(h)	Watt(Stunde)
°C	Grad Celsius

Dezimalpräfixe

m	milli	10 ⁻³	= 0,001
k	kilo	10 ³	= 1.000
M	Mega	10 ⁶	= 1.000.000
G	Giga	10 ⁹	= 1.000.000.000

Indizes

FS	Feuchtsubstanz
(g)	engl.: <i>gaseous</i> = gasförmig
(s)	engl.: <i>solid</i> = festförmig

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts „Masterplan Stadt und Region Hannover – 100 % für den Klimaschutz“ sollen Konzepte erarbeitet werden, welche die Wege zu einer klimaneutralen Stadt und Region im Jahre 2050 aufzeigen. Die Zielsetzung ist dabei Folgende: 95% Treibhausgasemissionsverringerung mit einer gleichzeitigen Endenergiereduktion von 50% bis zum Jahr 2050. Als Bezugsjahr gilt dabei das Jahr 1990.

In der Sitzung der Strategiegruppe „Regionale Wirtschaftskreisläufe / Abfallwirtschaft“ hat sich gezeigt, dass in der Region Hannover zwei wesentliche Akteure in einem Masterplan 100% für den Klimaschutz zu berücksichtigen sind: die Siedlungswasserwirtschaft und das Abfallmanagement. Während für die Abwasserbehandlung ca. 18 – 36 kg CO₂ pro EW·a¹ aufkommen, entstehen bei Sammlung und Transport sowie der Behandlung, der Verwertung und der Ablagerung von Abfällen in der Region Hannover 147 kg CO₂ pro Einwohner und Jahr (Bezugsjahr 2006).

Bei beiden Entsorgungssystemen sind aktuell Einsparpotenziale für Fremdenergie durch Verwertung von anfallenden Abwärmen, durch Prozessumstellung oder durch Prozessoptimierung gegeben. Wesentliche Anteile könnten dabei durch gemeinsame, Sektoren übergreifende Nutzung, wie z.B. der Nutzung der Abwärmen aus der Abfallbehandlung zur Klärschlamm-trocknung oder durch Co-Fermentation von flüssigen organischen Reststoffen in der biologischen Stufe der Restabfallbehandlung usw., gehoben werden.

In der Region liegen diverse Studien vor, die für eine Bewertung der kommunalen Betriebe der Ver- und Entsorgung hinsichtlich Klimaneutralität geeignet sind.

Maßgebliche Entscheidungsgrundlage für Optimierungen (z.B. der Prozessführung) oder Einsparungen (Personal, Verfahrensvarianten) für kommunale Unternehmen sind derzeit die Entwicklung der Kosten und Gebühren.

Entsprechend wurde z.B. für die Stadtentwässerung Hannover eine Studie erstellt, in der die Alternativen der Klärschlammverwertung gegenübergestellt und im Wesentlichen monetär bewertet sind.

Für die Abfallwirtschaft wurde im Jahr 2008 eine CO₂-Bilanz für die Jahre 2004 (vor Deponierungsverbot unbehandelter Abfälle) und 2006 (ein Jahr nach dem Deponierungsverbot) erstellt. Für den Standort Lahe wurden einige Studien durchgeführt, um Prozesse zu optimieren und vornehmlich Kosten für die Entsorgung von Abwässern oder für den Fremdenergiebezug zu reduzieren. Durch das EEG 2012 und das neue EEG 2014 ist die Vergärung von Bioabfall mittlerweile förderfähig, so dass eine Umstellung der Bioabfallbehandlung von Kompostierung auf Vergärung sich für den Gebührenhaushalt kostengünstig darstellen könnte.

Durch den Masterplan „100% für den Klimaschutz“ und der Vision für eine klimaneutrale Region im Jahr 2050 sind nicht automatisch Gebühren und Kosten der maßgebliche Bewertungsmaßstab, sondern die Betrachtung der Treibhausgasemission bzw. der CO₂-Äquivalente.

¹ Einwohnergleichwert pro Jahr

Um für die Region Hannover Potenziale für eine klimaneutrale sektorenübergreifende Optimierung insbesondere im Hinblick auf eine Reduzierung der Treibhausgase durch Energieeinsparung und Emissionsminderung zu quantifizieren, wurde folgendes Untersuchungsprogramm durchgeführt:

Arbeitspaket 1: Klimaneutrale kommunale Abwasserbehandlung in der Region

- a) Auswertung der statistischen Daten zu Abwassermengen und des spezifischen Energieverbrauchs der Abwasser- und Schlammbehandlung der Kläranlagen in der Region Hannover (inkl. Klärwerke Hannover-Herrenhausen, Hannover-Gümmerwald sowie der Kommunen Barsinghausen, Burgdorf, Burgwedel, Langenhagen, Lehrte, Neustadt a. Rbge., Pattensen, Sehnde, Springe, Uetze, Wedemark, Wennigsen (Deister) und Wunstorf),
- b) Abschätzung der CO₂-Einsparpotenziale entsprechend den DWA-Kennwerten,
- c) Auswertung der Studie zur Klärschlammverwertung der Stadtentwässerung hinsichtlich Klimaneutralität,
- d) Variantenuntersuchung zur thermischen Klärschlammverwertung (im Nachtrag).

Arbeitspaket 2: Klimaneutrale Abfallwirtschaft der Region Hannover

- a) Aktualisierung der CO₂-Bilanz der Abfallwirtschaft für das Jahr 2012 insbesondere für
 - die Standorte Lahe (Kompostierung, MBA, Deponie, Sicherwasserbehandlung, ggf. Vergärung, etc.), Burgdorf, Gehrden, Wunstorf (Kompostierung, Deponie) und
 - die Thermische Abfallbehandlung (Lahe, Hameln, Buschhaus, etc.),
- b) Auswertung der Berichte „Zukunftsfähige Energiekonzepte für das Abfallbehandlungszentrum am Standort Lahe“ (ISAH, 2012) hinsichtlich Klimaneutralität,
- c) Auswertung der Berichte „Nutzung der Abwärmen aus den BHKW in der Gärrestbehandlung mit dem Ziel der Abwasserreduzierung aus der BA“ [ISAH, 2013] hinsichtlich Klimaneutralität sowie
- d) Abschätzung der Treibhausgasemissionsänderung durch Umstellung der Bioabfallbehandlung von Kompostierung auf Vergärung.

Arbeitspaket 3: Sektorübergreifenden Maßnahmen

- a) Aufzeigen von sektorübergreifenden Maßnahmen zur klimaneutralen Entsorgung in der Region Hannover und
- b) Abschätzung der damit verbundenen Änderungen bzw. die Gegenüberstellung anhand der Bewertungsansätze von Treibhausgasemission und Kosten.

2 Methodik

2.1 Referenzwerte und Bilanzierung

Maßgeblich für den Klimawandel verantwortlich sind die Treibhausgase (THG) Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O). Aufgrund der unterschiedlichen Adsorptionsgrade, die für den Treibhauseffekt verantwortlich sind und mitunter stark variieren, wurde von dem IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) eine Vergleichseinheit bestimmt, um die unterschiedlichen THG gleichsetzen zu können. Als Vergleich wird Kohlenstoffdioxid herangezogen. So ist die Schädlichkeit von Lachgas bei einem Zeithorizont von 100 Jahren 298-mal höher als die von Kohlenstoffdioxid und hat damit einen CO_2 -Äquivalenzwert von 298 g CO_2 -eq/g N_2O . Weitere Werte sind in der Tab. 1 aufgeführt.

Tab. 1: Äquivalenzwerte / Treibhauspotenzial von Gaskomponenten im Biogas [IPCC, 2007]

Summenformel	Bezeichnung	Treibhauspotenzial relativ zu CO_2 [g CO_2 -eq/ g Gas] Betrachtungszeitraum 100 Jahre
CO_2	Kohlenstoffdioxid	1
CH_4	Methan	25
N_2O	Lachgas	298

Wichtig für die Erstellung einer CO_2 -Bilanz ist ferner die Unterscheidung in einen Anteil an fossilem Kohlenstoff und einen Anteil an regenerativem (nachwachsendem, biogenem) Kohlenstoff.

a) Bilanzierung des regenerativen Kohlenstoffs (am Beispiel einer Pflanze):

Prozesse, die im Bilanzraum Biosphäre/Atmosphäre zu einem Zuwachs an Kohlenstoffdioxid (auch in Form von CO_2 -Äquivalenten) führen gehen positiv in die Bilanz ein.

Wird beispielsweise eine Pflanze aus der Biosphäre entnommen und im Rahmen einer Kompostierung (aerobe biologische Umsetzung) der Biosphäre wieder zugeführt, wird die Menge an Kohlenstoff (umgerechnet in CO_2), die sich zuvor in der Biosphäre befunden hat, dem Bilanzraum Biosphäre in Form von CO_2 und Kohlenstoff im Kompost (umgerechnet CO_2) wieder zugeführt. Die entsprechende CO_2 -Bilanz kann folgendermaßen aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} \Sigma \text{CO}_2\text{-eq (Kompost)} = \\ - \text{CO}_{2, \text{in}}(\text{s}) (\text{aus C der Biomasse}) + \text{CO}_{2, \text{out}}(\text{g}) + \text{CO}_{2, \text{out}}(\text{s}) (\text{aus C im Feststoff}) = 0 \quad (\text{Gleichung 1}) \\ \Rightarrow \text{die Bilanz ist } \text{CO}_2\text{-neutral} \end{aligned}$$

Im Falle einer Kompostierung, bei der der regenerative Kohlenstoff wieder in CO_2 umgewandelt wird, ändert sich demnach für den Gehalt an CO_2 in der Atmosphäre/Biosphäre nichts; es sei denn die Kompostierung wird -unter Energieeinsatz aus fossilen Rohstoffen- beispielsweise mit technischen Verfahren belüftet.

Im Gegensatz zur Kompostierung wird bei der Vergärung (anaerobe biologische Umsetzung) der Pflanze neben CO_2 auch Methan gebildet. Methan wirkt im Gegensatz zu CO_2 25-fach klimaschädlicher, so dass es mit einem CO_2 -Äquivalent von 25 beaufschlagt wird (s. Tab. 1). Beim Entweichen von CH_4 in die Atmosphäre wird dadurch bedingt die CO_2 -Bilanz positiv.

Die CO₂-Bilanzgleichung Gl.1 erweitert sich somit zu:

$$\begin{aligned} \Sigma \text{CO}_2\text{-eq (Vergärung)} = \\ - \text{CO}_{2,\text{in}}(\text{s}) + \text{CO}_{2,\text{out}}(\text{g}) + \text{CO}_{2,\text{out}}(\text{g}) \text{ (aus CO}_2\text{-Äquivalent CH}_4\text{)} + \text{CO}_{2,\text{out}}(\text{s}) \neq 0 \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 2})$$

=> Die Bilanz ist CO₂-positiv.

b) Bilanzierung des fossilen Kohlenstoffs:

Fossiler Kohlenstoff ist in der Lithosphäre beispielsweise in Form von Erdöl oder Kohle eingelagert und deshalb dem Bilanzraum Atmosphäre dauerhaft entzogen. Bei Förderung und Nutzung von Erdöl z.B. als Kraftstoff, wird dem Bilanzraum Atmosphäre der Kohlenstoff wieder den Verbrennungsprodukten in Form von CO₂ und Ruß zugeführt. Diese Emission führt zu einem Anstieg des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre und zwar ohne dass - im Gegensatz zu regenerativem Kohlenstoff - dem Bilanzraum zuvor dieser Anteil entnommen wurde.

Für die CO₂-Bilanz des fossilen Kohlenstoffs ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} \Sigma \text{CO}_2\text{-eq (fossil C)} = \\ + \text{CO}_{2,\text{in}}(\text{s}) \text{ (aus C in Lithosphäre)} + \text{CO}_{2,\text{out}}(\text{g}) + \text{CO}_{2,\text{out}}(\text{s}) \text{ (aus C im Russ)} \neq 0 \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 3})$$

=> Die Bilanz ist CO₂-positiv.

Werden fossile Primärrohstoffe durch regenerative oder durch wiedergewonnene Sekundärrohstoffe substituiert, ist dies bei der CO₂-Bilanz zu berücksichtigen: Jede durch Verbrennung erzeugte Kilowattstunde Strom ist mit einem CO₂-Ausstoß verbunden. Ist der dabei eingesetzte Brennstoff (Primärrohstoff) fossiler Herkunft spricht man von CO₂-belastetem Strom. Durch Substitution der fossilen Brennstoffe durch regenerative oder durch regenerativ erzeugten Strom (Wind, Solar, Biogas) kann eine CO₂-Einsparung erzielt werden. Diese indirekten THG-Emissionen, die unter anderem durch den Verbrauch von Energieträgern wie Heizöl, Erdgas oder Diesel sowie dem Verbrauch von elektrischem Strom entstehen, können ebenfalls in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden.

2.2 Generelle Annahmen

Im Rahmen des „Masterplan - 100% für den Klimaschutz“ der Region Hannover wurden im Rahmen der Strategiegruppe „Regionale Wirtschaftskreisläufe / Abfallwirtschaft“ Maßnahmen und Rahmenbedingungen diskutiert und erarbeitet, wie sich eine regionale Kreislaufwirtschaft im Jahr 2050 gestalten könnte. Um Aussagen über klimarelevante Auswirkung einer veränderten Infrastruktur und hier insbesondere der Abwasser- und Abfallbehandlung treffen zu können, wurden generelle Annahmen getroffen:

- 1.) Aufgrund des Einsatzes von energieeffizienterer Technik werden in 2050 der Energiebedarf und damit die indirekten Emissionen um 20% niedriger sein als in 2010.
- 2.) Im Jahr 2050 wird sich die Bevölkerung (**2010:** 1.103.773; **2050:** 1.020.312) und damit der Verbrauch und auch die zu entsorgenden Abwasser- und Abfallströme um 8% reduziert haben.
- 3.) Die Energiebereitstellung in der Stadt Hannover und im Umland beruht auf unterschiedlichen Systemen. Die für diese Studie verwendeten Faktoren sind in Tab. 2 aufgeführt und wurden im Rahmen des „Masterplan - 100% für den Klimaschutz“ vom *Leipziger Institut für Energie GmbH* [IE, 2014] berechnet und zur Verfügung gestellt.

Tab. 2: Verwendete CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Produkte

spezifische CO ₂ -Emissionen	Einheit	Stadt Hannover		Reduktions- faktor	Umlandgemeinden		Reduktions- faktor
		2010	2050		2010	2050	
Strommix	g CO ₂ -eq/kWh	916	14	65	492	28	18
Fernwärme	g CO ₂ -eq/kWh	92	0	-	92	0	-
Nahwärme	g CO ₂ -eq/kWh	24	20	1,2	14	19	-0,7
Diesel	g CO ₂ -eq/kWh	277	154	2	282	154	2
Heizöl	g CO ₂ -eq/kWh	320	320	1	320	320	1
Erdgas	g CO ₂ -eq/kWh	228	18	13	228	18	13

Aus Tab. 2 ist ersichtlich, dass vom *Leipziger Institut für Energie GmbH* aufgrund des steigenden Einsatzes regenerativer Primärenergie die CO₂-Emissionsequivalente für den Strommix 2050 gegenüber 2010 in der Stadt Hannover um den Faktor 65 und im Umland um den Faktor 18 geringer angesetzt sind. Diese Reduktion ist entsprechend proportional bei den CO₂-Gutschriften zu berücksichtigen. Insgesamt werden sich die CO₂-Gutschriften im Jahr 2050 verringern, da dann der Strom im Wesentlichen regenerativ und somit größtenteils CO₂-neutral erzeugt wird. Eine CO₂-Einsparung bzw. Gutschrift kann nur angesetzt werden, wenn zuvor CO₂ bei der Stromerzeugung emittiert wurde.

Die Werte beruhen auf dem Bilanzierungsprinzip des Life Cycle Assessment, was bedeutet, dass der komplette Lebenszyklus zur Erzeugung und Bereitstellung der Produkte mit einbezogen wird. Für die Landeshauptstadt Hannover und die Umlandgemeinden ergeben sich entsprechend der unterschiedlichen Energieversorgungssituation verschiedene Faktoren. Insgesamt werden von den Stadtwerken Hannover (*enercity*) zum Beispiel im Strommix für die Bereitstellung einer Kilowattstunde elektrischen Stroms höhere Anteile an fossilen Primärenergieträgern zur Erzeugung eingesetzt als in den Umlandgemeinden.

3 Abwasserbehandlung

Die Region Hannover verfügt über 26 kommunale Kläranlagen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Kläranlagen nach ihrer Ausbaugröße in fünf Größenklassen unterteilt. Die Lage und Größenklasse der einzelnen Kläranlagen zeigt Abb. 1.

In der Region Hannover gibt es keine Kläranlage, die der Größenklasse 1 zugeordnet wird. Vier Kläranlagen werden der Größenklasse 2 zugeteilt. Sie haben insgesamt eine Kapazität von 16.600 Einwohnerwerten (EW). Zur Größenklasse 3 gehören drei Kläranlagen, die Einwohnerwerten von 29.900 EW entsprechen. Eine Kapazität von 521.000 EW wird durch 16 Kläranlagen der Größenklasse 3 abgedeckt. Die drei Anlagen der Größenklasse 5 verfügen über die höchste Kapazität mit insgesamt 1.400.000 EW.

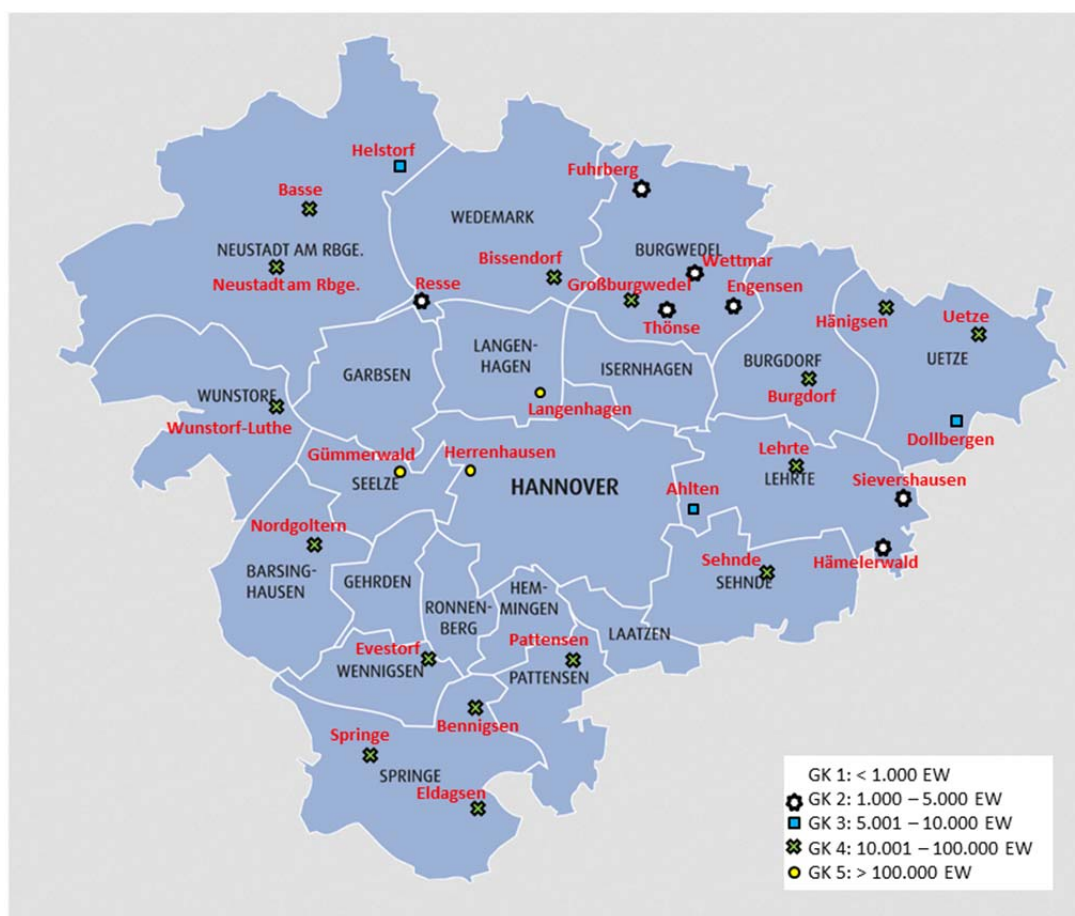


Abb. 1: Standortkarte der Kläranlagen in der Region Hannover, nach [Zukunft Inc., 2013]

Zur Erstellung der CO₂-Bilanz wurde eine Datenerhebung unter den Kläranlagen durchgeführt, die Beteiligung der Kläranlagen, aufgeschlüsselt nach ihren Größenklassen, ist in Abb. 2 wiedergegeben. Sowohl die befragten Anlagen der Größenklassen 2, als auch der Klasse 5 nahmen vollzählig an der Befragung teil. Aus Größenklasse 2 nahm eine der vier Anlagen nicht teil. Von den 16 befragten Anlagen der Größenklasse 4 nahmen 11 teil. Dies führt dazu, dass in etwa 95 % der Einwohnerwerte der Region Hannover durch die Studie abgedeckt werden. Fehlende Werte wurden entsprechend extrapoliert.

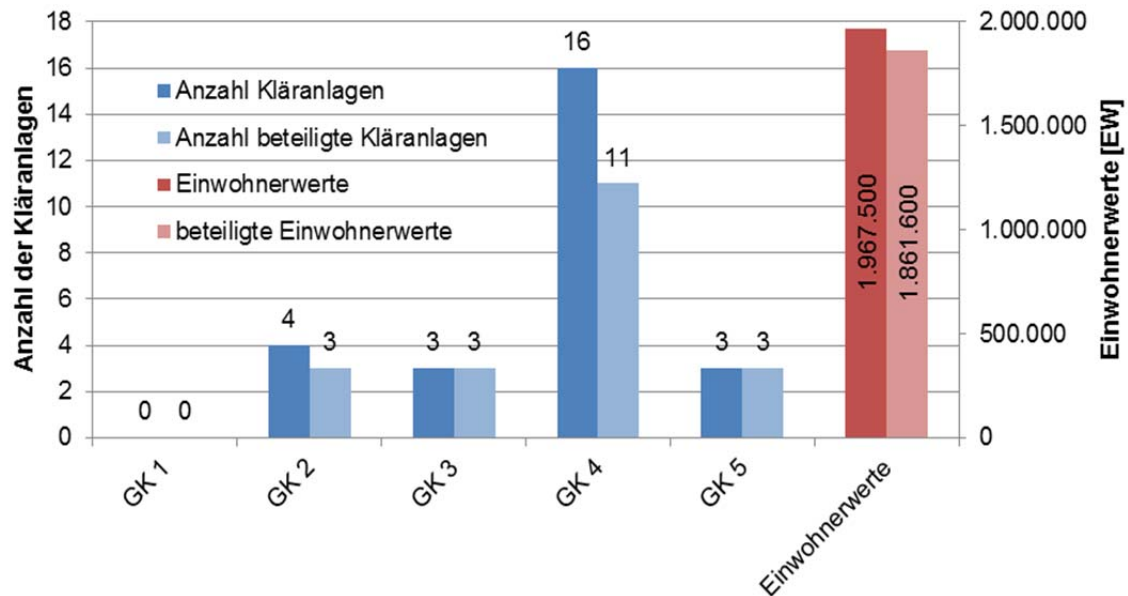


Abb. 2: Datengrundlage und Einwohnergleichwerte (EW) für die Bilanzierung der Abwasserbehandlung in der Region Hannover

3.1 Bilanzjahr 2012

3.1.1 Bilanzrahmen

Der Bilanzrahmen der Abwasserbehandlung umspannt die drei Teilbereiche Abwasserreinigung inkl. Schlammbehandlung, (optional) Faulgasnutzung und Schlammverwertung (siehe Abb. 3). Im Rahmen der Abwasserreinigung fallen sowohl direkte Treibhausgasemissionen (Lachgas, Methan und CO₂ (fossil)) als auch indirekte Emissionen durch den Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie durch den Energieverbrauch an. Andere Betriebsmittel wie Anlagen und Einrichtungen wurden nicht betrachtet.

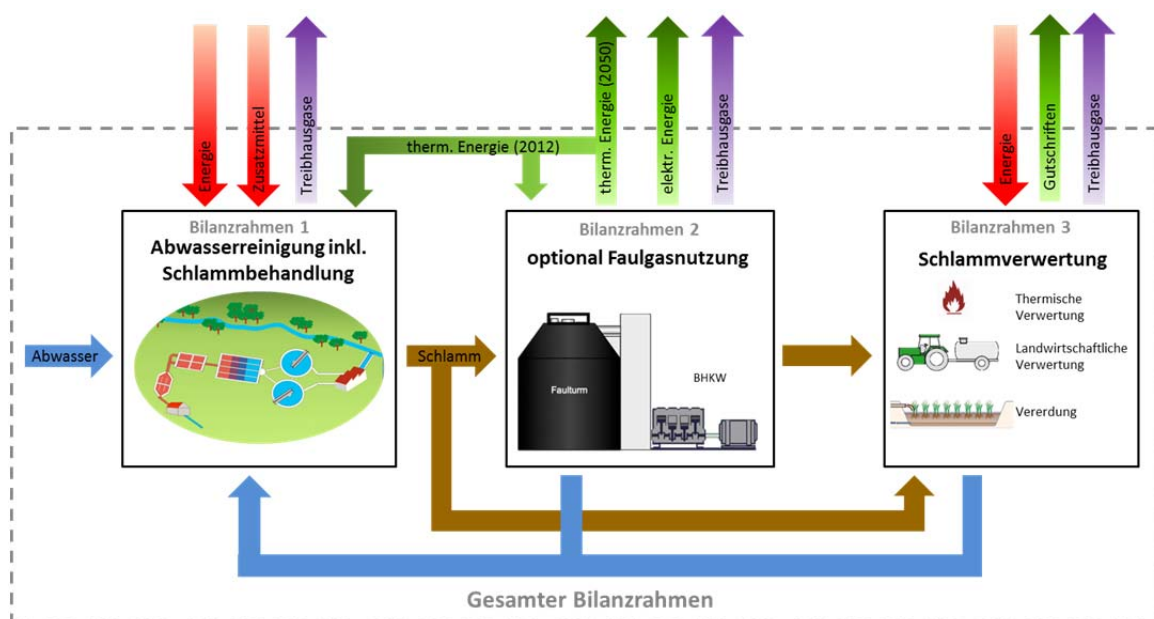


Abb. 3: Bilanzrahmen der Abwasserbehandlung

Bildquellen: [Agrarheute, 2013; Aquen, 2013; BHKW, 2013; Gecoc, 2013; LZ, 2013]

Im Zuge der anaeroben Schlammbehandlung/ Faulgasnutzung entstehen ebenfalls direkte Treibhausgasemissionen. Die Emissionen entstehen durch Ausgasungen während der Faulschlamm Lagerung und durch Methanschlupf bei der Faulgasgewinnung und -nutzung (Faulbehälter, Blockheizkraftwerk (BHKW), etc.). Indirekte Emissionen durch den Energieverbrauch für die Schlammmentwässerung und -behandlung, sowie Betriebs- und Hilfsstoffe, sind bereits in der CO₂-Bilanz der Abwasserreinigung berücksichtigt. Durch die Nutzung des produzierten Faulgases und der damit verbundenen Bereitstellung von Energie werden für die anaerobe Schlammbehandlung Gutschriften in der CO₂-Bilanz entsprechend der angesetzten CO₂-Emissionsfaktoren (Tab. 2) berücksichtigt.

Der dritte Bilanzteilrahmen befasst sich mit der Klärschlammverwertung. Hier entstehen Emissionen durch den Transport des Klärschlammes zum Ort der Verwertung und durch Restausgasungen von Methan und Lachgas, die durch Umwandlungsprozesse während der landwirtschaftlichen Verwertung auftreten. Aufgrund der Düngewirkung des Klärschlammes und der Energie, die bei der thermischen Verwertung genutzt werden kann, entstehen in diesem Bereich ebenfalls Gutschriften.

3.1.2 Ergebnisse 2012

Für das Bilanzjahr 2012 ergeben sich für die Abwasserbehandlung der Region Hannover insgesamt Emissionen von ca. 42.000 t CO₂-eq/a (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent für 2012. s. Tab. 2). Die Emissionen bei der Lagerung von Klärschlamm konnten nur grob geschätzt werden, hier wären weitere Untersuchungen notwendig. Tab. 3 zeigt die Verteilung der Emissionen und Gutschriften für die drei Bilanzbereiche. Die die Bilanz belastenden Emissionen entstehen im Rahmen der Abwasserreinigung. Gutschriften entstehen zu etwa 70% aus der Gutschrift für die bereitgestellte Energie im Zuge der Faulgasnutzung und zu ca. 30% durch die Verwertung des Klärschlammes.

Tab. 3: Auflistung der Bilanzbereiche der Abwasser- und Schlammbehandlung mit entsprechenden CO₂-Emissionen des Jahres 2012 für die Region Hannover (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent für 2010. siehe Tab. 2)

Bilanzbereich	spezifische Jahresmengen 2012	CO ₂ -Emissions-äquivalent [t CO ₂ -eq/a]	CO ₂ -Emissions-äquivalent [kg CO ₂ -eq/ (EW·a)]
Abwasserreinigung	87.512.797 m ³ Abwasser	63.831	57,8
Faulgasnutzung	10.291.864 m ³ Biogas	-15.700	-14,25
Schlammverwertung (landwirtschaftlich)	22.683 t TS Schlamm	-4.997	-4,54
Schlammverwertung (thermisch)	3.377 t TS Schlamm	-1.250	-1,13
Summe	-	41.884	38

Die zusammengestellten Daten zeigen den „Ist-Zustand“ der Abwasserreinigung für das Jahr 2012 und werden später zum Vergleich mit einzelnen Varianten herangezogen. Die indirekten Emissionen durch den Einsatz von Betriebsmitteln werden hier nicht berücksichtigt, da derzeit keine LCA-Daten dazu vorliegen

3.2 Bilanzjahr 2050

Entsprechend den Zielvorgaben und des im Rahmen des Projekts „Masterplan - 100% für den Klimaschutz“ von der Strategiegruppe Regionale „Wirtschaftskreisläufe / Abfallwirtschaft“ erarbeiteten Visionsbildes sollen Potenziale quantifiziert werden, um die CO₂-Emissionen der Abwasserbehandlung zu reduzieren. Um eine klimaneutrale CO₂-Bilanz für 2050 zu realisieren, sind unterschiedliche Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen und zur Steigerung der Gutschriften erforderlich.

3.2.1 Annahmen

Im Bereich der Abwasserreinigung und Klärschlammverwertung wird angenommen, dass die indirekten Emissionen durch den Energieverbrauch (Kraftstoffverbrauch und Energiebedarf elektrischer Aggregate) aufgrund von energieeffizienterer Technik um 20% sinken.

Verbunden mit dem Bevölkerungsrückgang um 8 % verringern sich entsprechend die Jahresabwassermengen und die anfallende Klärschlammmenge. Es wird davon ausgegangen, dass sich in gleichem Maße die Emissionen durch den Einsatz von Betriebs- und Hilfsstoffen und die direkten Treibhausgasemissionen reduzieren.

Nach den aktuellen politischen Diskussionen ist im Jahr 2050 die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr zulässig.

3.2.2 Maßnahmen

Als Maßnahme für das Jahr 2050 wurde die **Nutzbarmachung der Abwasserwärme** im Kanal durch den Einsatz von Wärmetauschern kalkuliert. Dabei wurde die potenzielle Wärmeenergie bei einer Temperaturverringerung des Abwassers um 2 °C angenommen.

Als weitere Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen bei der Abwasserbehandlung wurden betrachtet, dass der gesamte in der Region anfallende **Klärschlamm** einer **thermischen Verwertung** zugeführt wird.

In der aktuellen Praxis sind Investition und Betrieb einer Schlammbehandlung mit Faulgasproduktion erst für größere Kläranlagen wirtschaftlich sinnvoll. Mit der Weiterentwicklung der anaeroben Schlammbehandlungsverfahren kann dies zukünftig nahezu unabhängig von der Kläranlagengröße und effizient erfolgen.

Nach heutigem Kenntnisstand wird für 2050 daher die gemeinsame Behandlung und Verwertung des Klärschlammes aus < GK3 Kläranlagen als zielführend angesehen (z.B. gemeinsamer Faulbehälter bzw. gemeinsame Verbrennungsanlage). Auch ist bei Fehlen eines geeigneten Wärmeabnehmers die Aufbereitung des Faulgases mit anschließender Einspeisung ins Gasnetz zu erwägen.

Für die Klärschlammentsorgung im Jahr 2050 wird als einzige Option die thermische Verwertung des gesamten anfallenden Klärschlammes angesehen, da einerseits die Kapazitäten zur Aufbringung des Klärschlammes auf landwirtschaftlich genutzten Feldern begrenzt und andererseits die Ausbringung generell verboten sein dürfte, um die Anreicherung von Schadstoffen im Boden zu vermeiden.

3.2.1 Untersuchte Varianten der Klärschlammbehandlung

Abb. 4 zeigt die Prozesse etablierter Verfahrensketten zur thermischen Klärschlammverwertung.

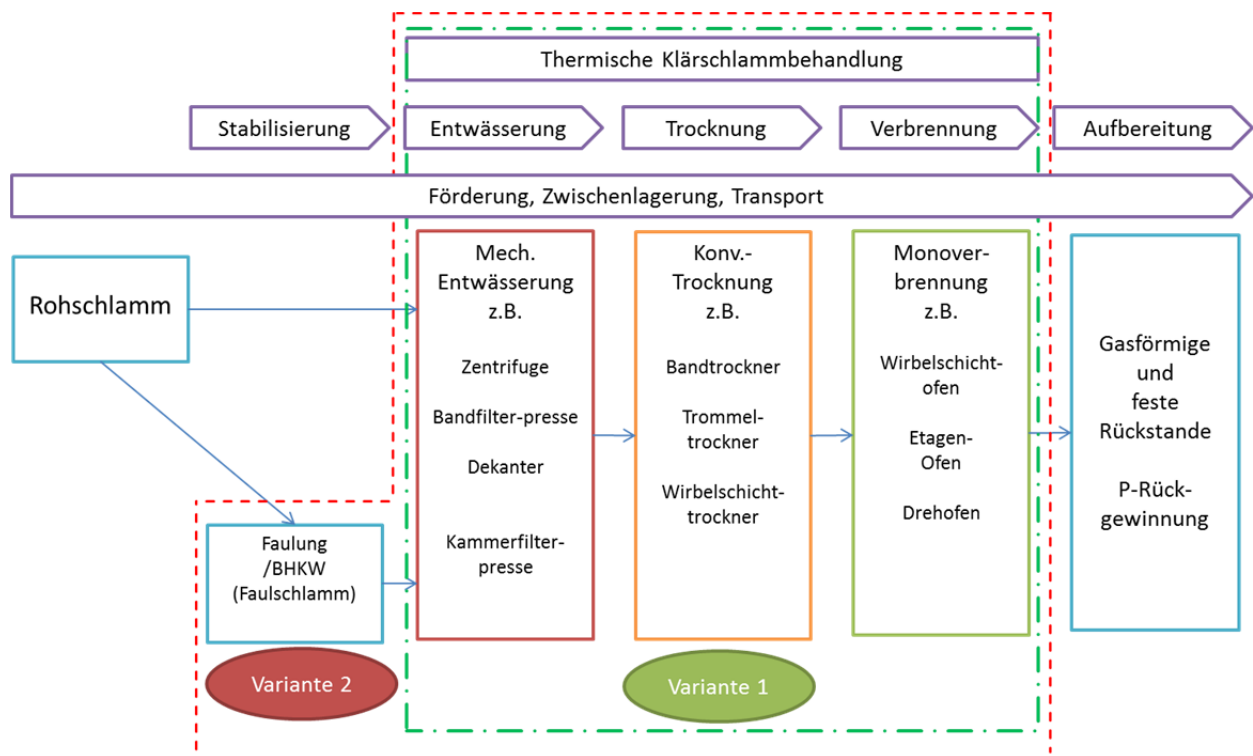


Abb. 4: Verfahrensketten der thermischen Verwertung von Klärschlamm

Die hier betrachtete thermische Klärschlammverwertung umfasst im Wesentlichen vier Behandlungsschritte: Stabilisierung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung sowie die dazu notwendige Förderung, Zwischenlagerung und den Transport des Klärschlamms.

Klärschlamm kann der thermischen Verwertung entweder als Rohschlamm (einstufig) oder als Faulschlamm (zweistufig) zugeführt werden. Zum Vergleich der spezifischen CO₂-Bilanzen der einstufigen und zweistufigen Verwertung von Klärschlamm (s. Abb. 4) wurden diese Optionen als Varianten untersucht und bilanziert:

- **Variante 1** (einstufige bzw. thermische Verwertung von Rohschlamm (**E / Tr-V**)): Entwässerung (E), Trocknung (Tr) und Monoverbrennung (V) sowie die damit verbundene Zwischenlagerung und Transport.
- **Variante 2** (zweistufige Verwertung von Rohschlamm bzw. thermische Verwertung von Faulschlamm (**F-E / Tr-V**)): Anaerobe Schlammstabilisierung (F), Entwässerung (E), Trocknung (Tr) und Monoverbrennung (V) sowie die damit verbundene Zwischenlagerung und Transport

Um diese Maßnahme spezifisch zu betrachten wurden zusätzlich folgende generellen Annahmen getroffen:

- 1.) Die Entwässerung des Klärschlammes erfolgt jeweils am Ort der Entstehung, die Trocknung dagegen am Ort der Verbrennung.
- 2.) Die **Trocknung** erfolgt auf **konventionelle** Weise unter Einsatz von elektrischer oder thermischer Energie (Drehtrommeltrocknung, Vakuumtrocknung, Bandtrocknung, etc.). Solartrocknung könnte die CO₂-Bilanz ggf. weiter verbessern, wird sich aber wahrscheinlich 2050 in der Region Hannover nicht flächendeckend etablieren.
- 3.) Die **Entwässerbarkeit** und der dazu notwendige Energie- und Flockungshilfsmittelbedarf ist schlammspezifisch [DWA M-366, 2013; UBA, 2013].
- 4.) Die Anlagen zur Entwässerung bzw. Trocknung von Klärschlämmen sind vollständig **eingehaust**. D.h. die Abluft aus allen Becken und Aggregaten wird durch bauliche Maßnahmen aufgefangen und es erfolgt eine vollständige Abluftreinigung.
- 5.) Bei einer **Faulung** wird 2050 von einem Abbaugrad von 65% oTR ausgegangen, z.B. optimiert durch eine vorgeschaltete Hydrolyse [Bormann, et al., 2009] oder Desintegration [DWA M-381, 2007].
- 6.) Durch Innovationen in der Klärschlammfaulung kann in 2050 die anaerobe Schlammbehandlung und **Faulgasgewinnung** auf nahezu allen Kläranlagen der Region (> GK 2) effizient betrieben werden.
- 7.) Unabhängig vom Vorhandensein eines in der Nähe liegenden Wärmeabnehmers, wird die Verwertung des Faulgases in einem örtlich vorhandenen BHKW berechnet. Der **Wirkungsgrad** von BHKW bei der Erzeugung von elektrischer Energie **steigt** bis 2050 auf 50% (Verbrennungsmotor η_{el} 51%, Generator η_{el} 99%).
- 8.) Die **thermische Verwertung** des Klärschlammes erfolgt als Monoverbrennung. Es ist anzunehmen, dass die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm in 2050 eine noch bedeutendere Rolle annimmt als bisher und sich deswegen die separate (Mono)- Verbrennung durchsetzen wird.
- 9.) Die **Energiebereitstellung** in der Stadt Hannover und im Umland beruht auf unterschiedlichen Systemen. Die für diese Studie verwendeten Faktoren sind in Tabelle 2 aufgeführt und wurden im Rahmen des „Masterplan - 100% für den Klimaschutz“ vom *Leipziger Institut für Energie GmbH* [IE, 2014] berechnet und zur Verfügung gestellt.

3.2.2 Ergebnisse 2050

Im Weiteren werden die wichtigsten Ergebnisse für das Jahr 2050 vorgestellt, die ausführlichen Berechnungen sind dem Anhang zu entnehmen.

3.2.2.1 Klärschlammengen - Massenbilanz

Zur Erstellung der Massenbilanz für die Klärschlammbehandlung im Jahr 2050 wurde eine abgeschätzte Menge von 31.500 Mg TS/a an jährlich anfallenden Rohschlamm als Vergleichsgröße angesetzt.

Abb. 5 zeigt die Massenbilanz für die Variante 1.

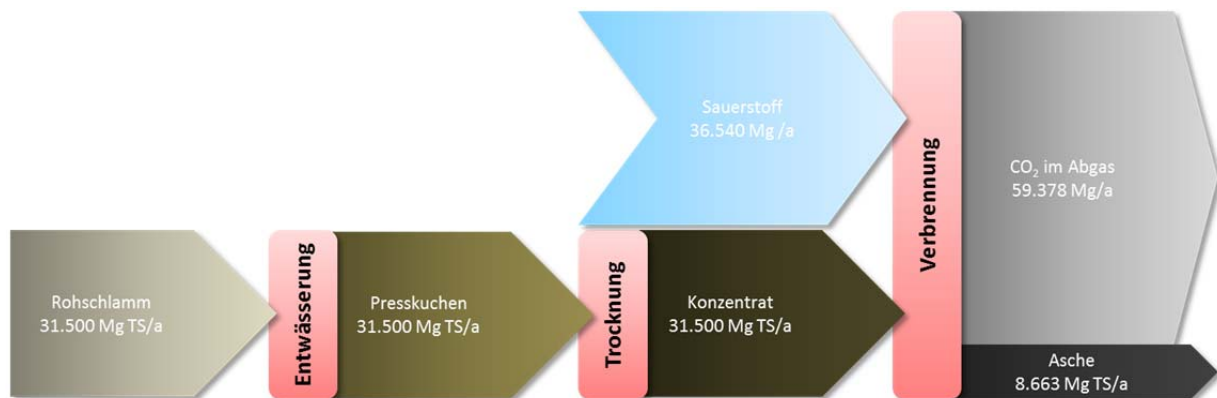


Abb. 5: Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der direkten Verbrennung (inkl. geeigneter Abdeckung der Anlagen und Abluftbehandlung) in 2050.

Ausgehend von der anfallenden Gesamtmenge an Rohschlamm von 630.000 Mg OS/a bzw. 31.500 Mg TS/a, werden 121.000 Mg OS/a per LKW zur Trocknung und Verbrennung transportiert. Durch die Verbrennung werden dabei ca. 59.378 Mg CO₂/a freigesetzt.

Abb. 6 zeigt die Massenbilanz für die Variante 2.

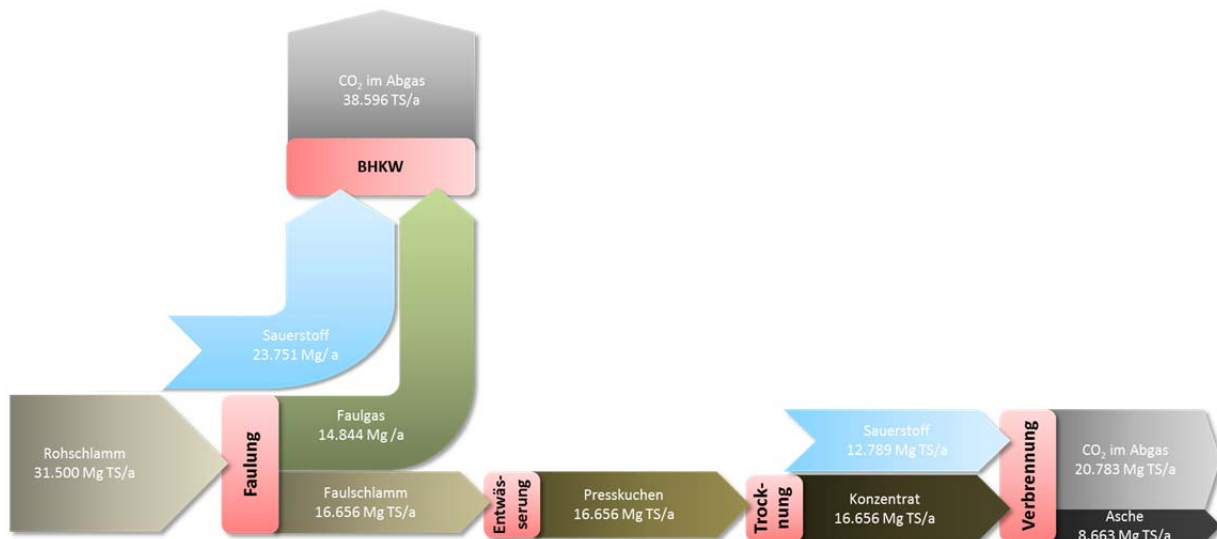


Abb. 6: Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der zweistufigen thermischen Verwertung.

Ausgehend von der gleichen Inputmenge an Rohschlamm (630.000 Mg OS/a bzw. 31.500 Mg TS/a) werden ca. 59.000 Mg OS/a per LKW zur Trocknung und Verbrennung transportiert,

das sind ca. 49% weniger als bei der direkten Rohschlammverbrennung. Durch die Verbrennung von Faulgas und Faulschlamm unter Einsatz von Luftsauerstoff werden insgesamt ca. 59.378 Mg CO₂/a freigesetzt.

Die Massenbilanz zeigt auch, dass ca. 14.800 Mg Faulgas pro Jahr produziert werden. Dies entspricht, bei einem Methangehalt von 60% ca. 7.500.000 m³ Methan pro Jahr oder einer spezifischen Methanproduktion von 330 m³ CH₄/Mg oTS.

3.2.2.2 Energiebilanz

Eine Energiebilanz wurde für beide Varianten anhand spezifischer Energiekennwerte erstellt (Beckmann, 2010). Die detaillierte Vorgehensweise ist Anhang Kap. 71.8 zu entnehmen.

Der nutzbare Energieüberschuss (elektrisch, thermisch) bei Variante 2 mit Faulung ist rund 63 % höher als die direkte thermische Verbrennung bei Variante 1.

Dies liegt

- am höheren Aufwand für die Entwässerung von Rohschlamm,
- am geringeren elektrischen Wirkungsgrad der Dampfturbinen bei der Schlammverbrennung verglichen mit einem Gas-BHKW und
- am benötigten Zusatzbrennstoff bei der Verbrennung von Rohschlamm.

Im Jahr 2050 liefert die zweistufige Verwertung (Variante 2) noch rund 34 % mehr nutzbarer Energie als die einstufige Verwertung (Variante 1).

Dies ist zurückzuführen

- auf die angenommene Energieeinsparung bei der Entwässerung und Trocknung und
- auf den angenommenen Verzicht auf einen Zusatzbrennstoff.

3.2.2.3 CO₂-Emissionen

Anhand der aufgestellten Energie- und Massenbilanz sowie der Faktoren für CO₂-Emissionsäquivalente wurden die Gesamtemissionen an CO₂-Equivalenten für 2050 berechnet.

Diese ergeben sich durch die kommunale Abwasserreinigung nach Variante 1 zu insgesamt **24.065 t CO₂-eq/a** und nach Variante 2 zu **24.926 t CO₂-eq/a**. (Bezug: jeweils CO₂-Emissionsäquivalent für 2050, siehe Tab. 2). Die Verteilung der Emissionen auf die einzelnen Bilanzbereiche ist nachfolgender Tab. 4 zu entnehmen.

Die Emissionen stammen fast ausnahmslos aus dem Bereich der Abwasserreinigung, die bei beiden Varianten identisch ist.

Das bei Variante 2 durch die Faulgasnutzung gegenüber 2012 Emissionen statt Gutschriften entstehen, ist durch die geringeren Gutschriften für die Energiebereitstellung im Jahre 2050 in Kombination mit höheren direkten Treibhausgasemissionen infolge der gesteigerten Klärgasmenge zu begründen. Variante 1 erreicht gegenüber Variante 2 höhere Gutschriften bei der thermischen Klärschlammbehandlung.

Die Nutzung der Abwasserwärme durch Wärmetauscher im Kanalnetz erzielt die höchsten Gutschriften und ist ebenfalls für beide Varianten gleich.

Tab. 4: Auflistung der Bilanzbereiche für die Abwasser- und Schlammbehandlung mit entsprechenden CO₂-Emissionen des Jahres 2050 für die Region Hannover (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent für 2050, siehe Tab. 2)

Bilanzbereich	abgeschätzte spezifische Jahresmengen 2050	CO ₂ -Emissionsäquivalent (Variante 1)		CO ₂ -Emissionsäquivalent (Variante 2)	
		[t CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/(EW·a)]	[t CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/(EW·a)]
Abwasserreinigung	80.511.773 m ³ Abwasser	28.138	25,5	28.138	25,5
Faulgasnutzung	12.500.000 m ³ Biogas	0	0	- 289	- 0,26
Schlammverwertung	16.656 t TS Faulschlamm	0	0	- 35	- 0,03
	31.000 t TS Rohschlamm	- 1.185	- 1,07	0	0
Wärmetauscher im Kanalnetz	144 GWh Wärmeenergie	- 2.888	- 2,6	-2.888	- 2,6
<i>Summe</i>	-	<i>24.065</i>	24,0	<i>24.926</i>	<i>22,6</i>

3.3 Bilanzvergleich 2012 und 2050

In der Tab. 28 sind die errechneten Emissionen an CO₂-Equivalenten zusammengefasst. Die aktuellen Emissionen aus 2012 (Spalte 2) sind den beiden Behandlungsvarianten der thermischen Klärschlammverwertung für 2050 (Spalte 5 und 6) und zusätzlich denselben, hypothetischen Varianten im Jahr 2012 (Spalte 3 und 4) gegenübergestellt.

Tab. 5: Gegenüberstellung der CO₂-Equivalenten für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in 2012 und den Varianten der thermischen Klärschlammverwertung mit und ohne Faulung bzw. von Rohschlamm in 2012 und 2050

Verwertung	landwirtschaft.	thermisch			
Jahr	2012	2012		2050	
	Status quo	Variante 1 (E/Tr-V)	Variante 2 (F-E/Tr-V)	Variante 1 (E/Tr-V)	Variante 2 (F-E/Tr-V)
Einheit	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]
Energie	-16.448.361	-16.828.770	-21.553.665	-1.132.563	-1.450.545
Transport	415.232	847.369	416.043	320.989	157.547
Emissionen	1.465.672	2.295	931.485	2.111	1.345.478
Düngewert	-6.348.615	-406.080	-406.080	-376.000	-376.000
Saldo	-20.916.072	-16.385.186	-20.612.217	-1.185.463	-323.520

Die Zusammenfassung in Tab. 28 allein für die Klärschlammverwertung zeigt, dass für das Jahr 2050 Variante 2 mit Klärschlammfaulung ein insgesamt geringeres CO₂-Saldo aufweist als Variante 1 mit direkter Rohschlammverbrennung. Für das Jahr 2012 verhält es sich umgekehrt, die Variante mit der Klärschlammfaulung erreicht insgesamt eine deutlich höhere CO₂-Gutschrift.

Die CO₂-Gutschriften für die bereitgestellte Energie, sind sowohl für das Jahr 2012 als auch für 2050 bei der Variante 2 mit Klärschlammfaulung höher. Dies ist auf die energetische Bewertung des Methans zurückzuführen. Durch den Einsatz der Klärschlammfaulung kann mehr nutzbare Energie bereitgestellt werden. Gegenüber 2012 ist aber die CO₂-Gutschrift in 2050 wesentlich schlechter, da hier der verbesserte Strommix, mit überwiegend regenerativer Energiegewinnung, für 2050 zugrunde liegt.

Die transportbedingten CO₂-Emissionen für Klärschlamm und Schlacke sind für Variante 2 generell etwa um die Hälfte niedriger als für Variante 1. Dies ist im Wesentlichen auf die geringere Schlammmenge zurückzuführen. Die Unterschiede von 2050 gegenüber 2012 ergeben sich auf Grund der geringeren Bevölkerungszahl bzw. Klärschlammmenge, effizienterer Transportfahrzeuge und einer besseren Bewertung des Dieselkraftstoffs im Jahr 2050.

Maßgeblichen Einfluss auf die gesamte CO₂-Bilanz haben die direkten Emissionen. Für beide Varianten wurde angenommen, dass eine geeignete Abdeckung und Abgasbehandlung für die Entwässerung und Trocknungsaggregate installiert ist. In Variante 2 schlägt jedoch der mit 0,5 % angenommene Methanschlupf der Faulgasnutzung zu Buche. Dies trifft insbesondere für das Jahr 2050 zu, da hier verglichen mit 2012 der Abbaugrad in der Klärschlammfaulung und somit die produzierte Methanmenge höher ist.

Der Düngewertgutschrift für die landwirtschaftliche Ausbringung des Klärschlammes im Jahr 2012 für Stickstoff und Phosphat wurden die in der Klärschlammmasche verbleibenden Phosphatanteile gegenüber gestellt. Durch die Verbrennung in der Variante 1 und 2 ist der Stickstoff landwirtschaftlich nicht mehr nutzbar. Da durch die Faulung (Variante 2) sich die Gesamtmenge an Phosphor nicht verändert, ist hier die Gutschrift für Variante 1 und 2 gleich.

Nach der aufgestellten CO₂-Bilanz für das Jahr 2050 ist die einstufige Verwertung von Klärschlamm der zweistufigen Verwertung in der Region Hannover vorzuziehen, vorausgesetzt der Strommix wird mindestens zu 90% aus regenerativen Energiequellen bereitgestellt.

Ist der Anteil der regenerativen Energiequellen an der Stromerzeugung kleiner als 90%, ist die zweistufige Verwertung, mit Klärschlammfäulung, hinsichtlich der CO₂-Bilanz vorteilhafter. Aus der Praxis ist bekannt, dass Roh- und Faulschlämme hinsichtlich ihrer Entwässerbarkeit und der Rückbelastung mit Ammonium unterschiedlich zu bewerten sind (DWA-M-366, 2013; UBA, 2013), was nicht direkt in Emissionen umzurechnen ist.

Des Weiteren ist Methan eine wertvollere Energiequelle als die rein thermische Abwärme aus der Verbrennung, da sie stofflich genutzt und gespeichert werden kann. Aus diesem Grund sollte die Klärschlammfäulung nicht grundsätzlich für 2050 ausgeschlossen werden, sondern eher Lösungen zur Verringerung des Methanschlupfs bei der Faulgasnutzung gefunden werden. Bei einer Reduktion der direkten Methanemissionen von derzeit 1% auf 0,35% wären die Varianten 1 und 2, mit den vorgegebenen CO₂-Emissionsfaktoren (siehe Tab. 29) hinsichtlich der CO₂-Emissionen für das Jahr 2050 ausgeglichen.

Einen direkten Vergleich der CO₂-Emissionen der Jahre 2012 (Status quo) und 2050 zeigt Abb. 7. Auf eine Darstellung der fiktiv für 2012 gerechneten Varianten wird verzichtet, da diese nicht mehr umgesetzt werden können.

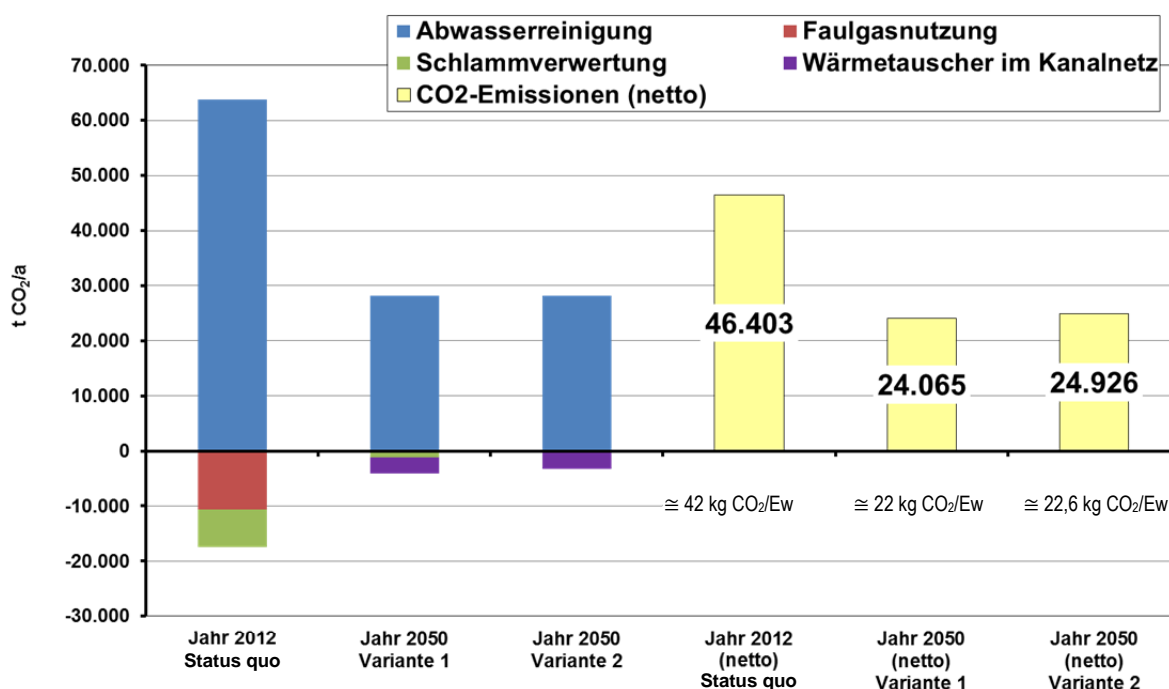


Abb. 7: Gegenüberstellung der CO₂-Emissionen und CO₂-Gutschriften der Abwasserbehandlung für die Bilanzjahre 2012 und 2050 mit entsprechend unterschiedlichen CO₂-Emissionsäquivalenzfaktoren (siehe Tab. 2)

Sowohl die Emissionen, als auch die Gutschriften haben sich von 2012 im Vergleich zu beiden Varianten im Jahr 2050 verringert.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Abwasserreinigung in beiden Jahren den größten Anteil der Emissionen verursacht. Dies liegt an den direkten Treibhausgasemissionen aus den Klärbecken, die bei der Abwasserreinigung entstehen. Nur die vollständige Einhausung² der Abwasserreinigungsanlagen und Behandlung der abgeführten Abluft könnte diese Emissionen minimieren, was jedoch mit enormen Kosten und ggf. Emissionen für den Betrieb verbunden wäre. Trotzdem ist auch bei diesem Bereich eine Verringerung der CO₂-Emissionen im Jahr 2050 zu erkennen. Dies liegt vor allem an den rückläufigen Einwohnerzahlen (8 %; s. Kapitel 3.2.1) und den vorgegebenen geringeren Emissionsfaktoren für den Verbrauch an Energie in 2050 (s. Tab. 2). Ein kleinerer Beitrag ergibt sich aus effizienteren und stromsparenderen Maschinen (20 %, s. Kapitel 3.2.1).

Die CO₂-Bilanzen im Jahr 2050 werden nur unwesentlich durch die Klärschlammverwertung beeinflusst. Die Verwertung von Faulgas erzielt eine deutlich höhere Menge an nutzbarer Energie. Durch die deutlich geringeren Gutschriften für Energie, aufgrund des verbesserten Strommix im Jahr 2050, kann sich die Variante 2 nicht gegen die Verbrennung von Rohschlamm (Variante 1) hinsichtlich der Treibhausgasemissionen durchsetzen.

Gegenüber 2012 ist die Entlastung der CO₂-Bilanz in 2050 durch die Nutzung des Faulgases aus der anaeroben Schlammbehandlung (Variante 2) vernachlässigbar. Aufgrund von angenommenen technischen Verbesserungen wird in 2050, trotz des Bevölkerungsrückgangs, zwar mehr Faulgas erzeugt, und es kann dadurch auch mehr Energie in Form von Strom und Nahwärme zur Verfügung gestellt werden, aber gleichzeitig steigt entsprechend die absolute CO₂-Emission durch Methanschlupf. In Kombination mit den bereits angesprochenen geringeren Gutschriften für die Bereitstellung von Energie kann dieser Emissionsanstieg nicht ausgeglichen werden, so dass für Variante 2 insgesamt eine positive CO₂-Bilanz entsteht. Hier wäre ggf. zu prüfen ob eine Verwertungsalternative zur Verstromung, wie z.B. eine stoffliche Nutzung oder Einsatz von Faulgas im Bereich Mobilität, zu einer besseren CO₂-Bilanz führt.

Die Nutzung der Abwärme des Abwassers im Kanalnetz, wirkt sich negativ auf die CO₂-Bilanz aus und senkt die CO₂-Emissionen der Gesamtbilanz. Zudem kann durch diese Maßnahme zusätzlich Nahwärme bereitgestellt werden.

3.4 Stoffstromtrennung

Dezentrale Abwasserentsorgungssysteme werden in Zukunft eine noch größere Beachtung erlangen. Für eine kreislaforientierte Siedlungswasserwirtschaft kommt dabei der Stoffstromtrennung eine entscheidende Rolle zu. Das häusliche Abwasser wird dabei in einzelne Stoffströme (Gelb-, Braun- und Grauwasser) unterteilt und anschließend inhaltspezifisch behandelt, verwertet oder genutzt werden. Da damit die Abwasserfrachten verringert werden, reduziert sich entsprechend die für eine aerobe Behandlung bzw. die Belüftung benötigte Energie. Die einzelnen Reinigungsschritte können optimal auf den jeweiligen Stoffstrom angepasst werden, um den gesamten Klärprozess effizienter zu gestalten [Wendler, 2005].

² Einhausung: vollständige Umbauung der Anlagenteile, um direkte Emissionen in die Atmosphäre zu verhindern und diese einer gezielten Behandlung zuführen zu können. Die thermische Verwertung des Rohschlammes (Variante 1) erzielt geringfügig höhere Gutschriften.

Da eine vollständige Stoffstromtrennung für die Region Hannover im Jahr 2050 derzeit unrealistisch erscheint, sollen hier nur das entsprechende Potenzial einer getrennten Sammlung von Gelb-, Braun- und Grauwasser der Region Hannover aufgezeigt werden.

In Tab. 6 sind die möglichen Frachten und Konzentrationen aus der Datenerhebung für die Region Hannover aufgeführt. Die Konzentrationen für CSB, KN und P ergeben sich als Mittelwert der erhobenen Daten. Für den TS-Gehalt und die Kalium-Konzentration sowie die Verteilung der Frachten auf die einzelnen Stoffströme wurden Literaturwerte herangezogen. [DWA 2010; Dockhorn, 2007].

Tab. 6: Frachten und Konzentrationen des Abwassers der Kläranlagen der Region Hannover im Jahr 2012

Parameter	Konzentration [mg/l]	Fracht [t/a]
CSB	825,23	68.768.266
KN	58,23	5.229.642
Parameter	13,29	1.183.695
TS	526,21	41.254.103
K	27,70	2.417.137

Im häuslichen Abwasser bildet **Gelbwasser** den Hauptanteil des Abwassers. Gelbwasser beinhaltet Urin abhängig von der Technik der verwendeten Trenntoiletten entweder unverdünnt oder durch Spülwasser verdünnt. Es eignet sich aufgrund der hohen Konzentrationen von Stickstoff, Kalium und Phosphor als Düngemittel, kann aber auch bei entsprechend hohem CSB-Gehalt zur Faulgasgewinnung genutzt werden. Zu Komplikationen können die im Gelbwasser enthaltenen Schadstoffe wie Arzneimittelmrückstände, Weichmacher, etc. führen. Tab. 7 zeigt die theoretischen Stoffstromfrachten von Gelbwasser für die Region Hannover.

Tab. 7: Konzentrationen und Frachten der einzelnen Stoffströme der Region Hannover

Parameter	Gelbwasser			Braunwasser			Grauwasser		
	Konz. [mg/l]	Fracht [t/a]	%	Konz. [mg/l]	Fracht [t/a]	%	Konz. [mg/l]	Fracht [t/a]	%
CSB	99,03	8.252.192	12	387,86	32.321.085	47	338,35	28.194.989	41
KN	50,69	4.549.788	87	5,83	522.964	10	1,75	156.889	3
P	6,65	591.847	50	5,32	473.478	40	1,33	118.369	10
TS	0	0	0	263,11	20.627.052	50	263,11	20.627.052	50
K	14,96	1.359.254	54	3,32	302.056	12	9,42	855.827	34

Braunwasser enthält Fäzes, gegebenenfalls Spülwasser und Toilettenpapier. Es zeichnet sich durch die hohen Anteile von CSB und TS aus, weshalb es sich sehr gut für die Faulgasgewinnung eignet. Die Nährstoffkonzentrationen sind zwar geringer als die des Gelbwassers, eine Verwertung als Düngemittel ist jedoch möglich. Ein weiterer Verwendungszweck könnte die Produktion von **Terra Preta** sein. Die Jahresfrachten des Braunwassers sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Terra Preta ist eine künstlich hergestellte Bodenart - Schwarzerde. Bereits vor mehreren tausend Jahren wurde Terra Preta aus Holzkohle und verschiedenen organischen Stoffen von den Ureinwohnern des Amazonas Gebiets produziert, um den ausgewaschenen Boden des Regenwalds langfristig fruchtbarer zu machen [Otterpohl, 2010].

Untersuchungen konnten belegen, dass aus Klärschlamm gewonnene Terra Preta sich durchaus zum landwirtschaftlichen Einsatz eignet. Jedoch müssen die Konzentrationen von Schwermetallen und sonstigen Schadstoffen überwacht werden [Kahn, 2013].

Zudem ist auch die Herstellung von Terra Preta mit Fäzes, als organisches Zusatzmaterial möglich. Werden Stoffstromtrennung und Produktion von Terra Preta verbunden, kann das Braunwasser, nach der Fermentation zur Faulgasnutzung, mit Holzkohle und weiteren organischen Abfallprodukten vermischt werden und somit hochwertige Terra Preta liefern [Otterpohl, 2010].

Für die Verwertung von Klärschlamm zur Herstellung von Terra Preta würden sich zum einen Gutschriften aufgrund des hohen Nährstoffgehalts des Bodens und zum anderen aufgrund der langfristigen Speicherung von Kohlenstoffdioxid im Boden ergeben. Eine Quantifizierung hinsichtlich Klimarelevanz kann aber mit heutigem Kenntnisstand nicht belastbar erfolgen.

Der dritte Stoffstrom ist das **Grauwasser**. Es beinhaltet alle Stoffströme, die nicht dem Gelb- oder Braunwasser zugeordnet werden. Unter den Begriff Grauwasser fallen beispielsweise häusliche Abwassermengen aus Küche, Bad, Waschmaschinen oder Niederschlag und Fremdwasser. Die Konzentrationen dieses Stoffstroms sind deutlich geringer als die von Gelb- und Braunwasser. Aufgrund der geringen Stoffkonzentrationen des Grauwassers ist der Kläraufwand im Vergleich zu der Klärung eines gemischten Abwasserstroms deutlich geringer.

4 Abfallbehandlung

Seit dem 01. Januar 2003 liegt die Abfallsammlung, -behandlung und -entsorgung der Stadt und Region Hannover in der Verantwortung des Zweckverbands Abfallwirtschaft Region Hannover (aha). Neben den Anlagen am Hauptstandort in Lahe mit der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlage (MBA), der Grünschnitt-Kompostierungsanlage (GKA), Bioabfallkompostierungsanlage (BAK) und der Altdeponie, sind weitere Anlagen in Kolenfeld (GKA, Deponie) und Burgdorf (GKA, Altdeponie) sowie die Altdeponien in Gehrden und Wiedenbrügge für die Berechnung der CO₂-Äquivalente herangezogen worden. Abb. 8 zeigt die Standorte in der Region Hannover.

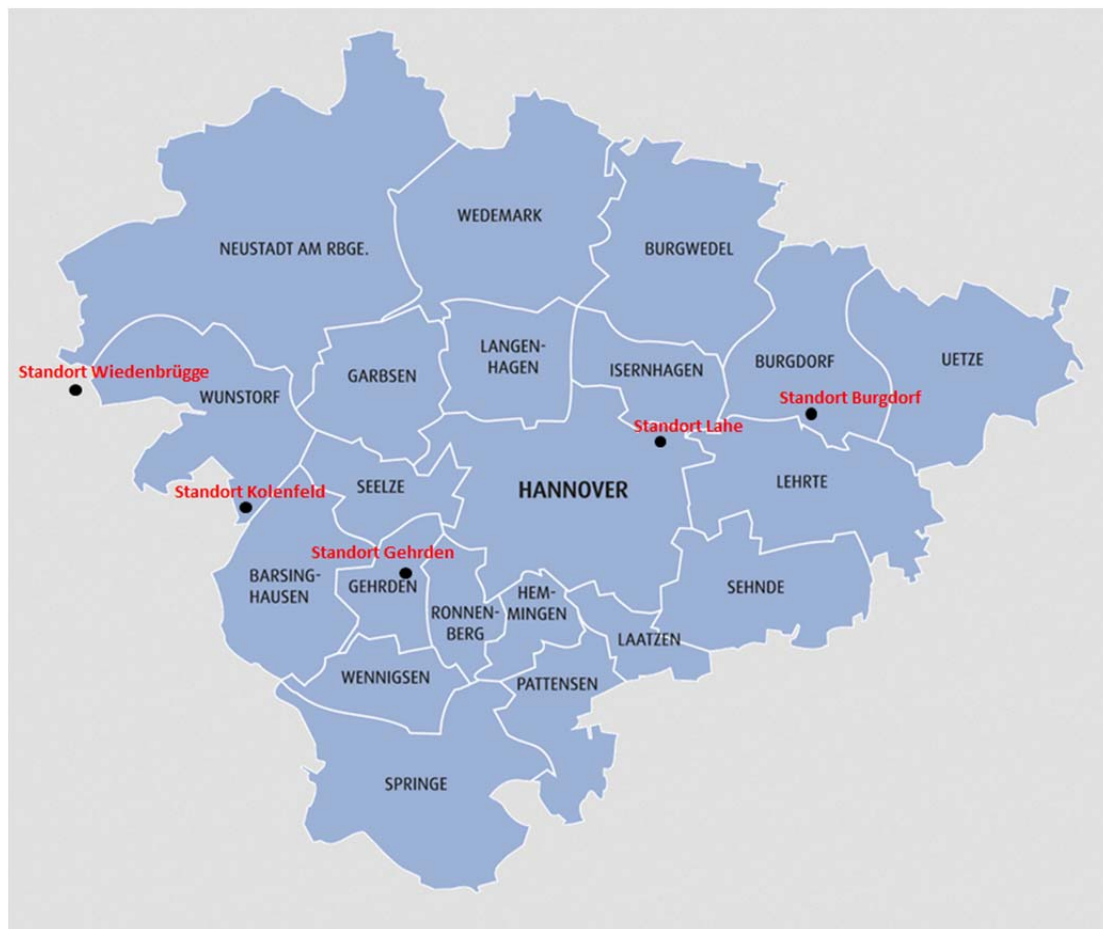


Abb. 8: Standortkarte der Abfallbehandlung der Region Hannover, nach [Zukunft Inc., 2013]

4.1 Bilanzjahr 2012

4.1.1 Bilanzrahmen

Für die Bilanzierung der CO₂-Emissionen im Jahr 2012 wurden neben den Emissionen, die bei der Behandlung der Abfälle entstehen, auch die Emissionen, die bei der Nutzung und Verbrennung des gewonnenen Biogases auftreten, berechnet. Ferner wurden die indirekten Emissionen aus der Nutzung von Strom und Fernwärme als auch von anderen Energieträgern wie Erdgas, Heizöl und Diesel aufgenommen. Die Ausgasungen durch die Deponien wurden mit Hilfe von Prognosemodellen berechnet.

Des Weiteren wurden der CO₂-Bilanz Gutschriften durch die Bereitstellung von Energie (Strom, Fernwärme) und Stoffrecycling negativ gutgeschrieben, was zu einer Reduzierung der Nettoemissionen in der Gesamtbilanz führt.

4.1.2 Ergebnisse 2012

Im Bilanzjahr 2012 verursachte die Abfallbehandlung der Stadt und Region Hannover CO₂-Emissionen von **152.466 t CO₂-eq/a** (Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2012, siehe Tab. 2).

Eine grafische Darstellung und Auflistung der CO₂-Emissionen ist Abb. 9 und Tab. 8 zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Bruttoemissionen mit 88,1 % durch die Ausgasung der Deponien entsteht. Weitaus geringere Anteile mit 4,4 % stammen aus den Transporten (Abfallsammlung, Verfrachtung des Deponats von der MBA Lahe zur Deponie Wunstorf, usw.) subsummiert unter Fuhrpark sowie mit 3,6 % aus der Beheizung der Betriebsgebäude und der Kompostierung mit 3,8 %. Die Abwasserreinigung macht mit 0,1 % hingegen nur einen sehr geringen Anteil der Bruttoemissionen aus und ist in der Grafik nicht zu erkennen. Durch das sortenreine Recycling, der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen und der Verwertung von Deponie- und Biogas können Ressourcen und Energie substituiert werden, so dass diese als Gutschriften negativ in die Bilanz eingehen und diese entlasten. Das Recycling deckt mit 77,6 % den größten Anteil der Gutschriften. Die thermische Behandlung der Siedlungsabfälle besitzt mit 16,2 % ebenfalls einen signifikanten Anteil an den Gutschriften, wohingegen der Anteil durch die Deponie- und Biogas Verwertung in der MBA mit nur 6,1 % am geringsten ist.

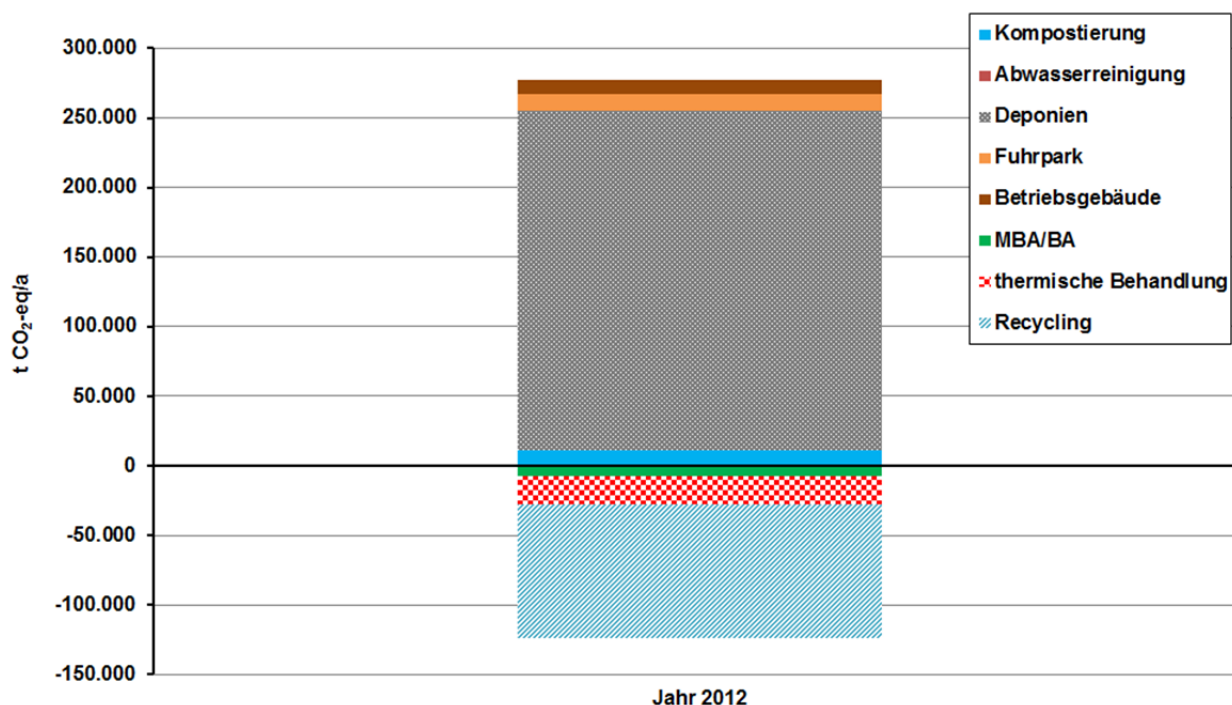


Abb. 9: CO₂-Gesamtemissionen des Bilanzjahres 2012 der Abfallwirtschaft (Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2012, siehe Tab. 2)

Tab. 8: Auflistung der Behandlungsanlagen mit entsprechenden CO₂-Emissionen (Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2012, siehe Tab. 2)

Behandlungsanlage	CO ₂ -Emissionsäquivalent [t CO ₂ -eq/a]	prozentualer Anteil
Deponien	243.670	88,1 %
Fuhrpark	12.076	4,4 %
Betriebsgebäude	10.032	3,6 %
Kompostierung	10.598	3,8 %
Abwasserreinigung	346	0,1 %
Summe (brutto)	276.721	100 %
MBA/BA	-7.610	6,1 %
thermische Behandlung	-20.186	16,2 %
Recycling	-96.459	78 %
Summe (Gutschriften)	-124.255	100 %
Summe (netto)	152.466	

Zusätzlich steht auf dem Standort Lahe Abwärme aus dem Betrieb von BHKW für die Verstromung des Gärgases zur Verfügung, die zurzeit größtenteils ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Lediglich 4 % dienen zur Einspeisung in das Nahwärmenetz. Eine Übersicht über die aktuellen Energiepotenziale zeigt Tab. 9. Bei Annahme einer Verfügbarkeit von 7.000 Betriebsstunden ergibt sich bei einer Vorlauftemperatur von 220 °C eine nutzbare Wärmeenergiemenge von 1,8 MW, die aus dem heißen Abgas gewonnen werden kann. Die Wärmemenge, die über die Tischkühler³ abgegeben wird, beträgt bei einer Vorlauftemperatur von 90°C ca. 2,69 MW. Wird das heiße Abgas auf 90°C abgekühlt, könnten 2,6 MW zzgl. zur Energie der Tischkühler bereitgestellt werden. Dies ergibt in Summe ein Niedertemperaturpotenzial von ca. 5,29 MW bei 90°C. Bei der regenerativen thermischen Oxidationsanlage (RTO) besteht aktuell ebenfalls ein Energiepotenzial von 934 kW.

Tab. 9: Energiequelle und ihr Potenzial in Abhängigkeit des Temperaturniveaus (NT – Niedertemperatur; HT – Hochtemperatur)

Energiequellen	Vorlauftemperatur [°C]	Energiepotenzial [kW]
RTO	-	934
HT-Abgas	220	1.800
HT-Abgas	90	2.599
NT-Wärme	90	2.685

Die Kalkulation des Energiepotenzials berücksichtigt nicht mögliche Schwankungen in der Verfügbarkeit der Abwärmen oder den Austausch von Aggregate.

³ Tischkühler: Wärmetauscher, der zur Wärmeabfuhr die Wärme an die Umgebung abgibt

4.2 Bilanzjahr 2050

4.2.1 Annahmen

Generell wird angenommen (siehe auch Kapitel 2.2), dass

- aufgrund des Einsatzes von energieeffizienterer Technik in 2050 der Energiebedarf und damit die indirekten Emissionen um 20% niedriger sein werden als in 2010 und
- die Bevölkerung von 1.103.800 Einwohner im Jahr 2010 auf 1.020.300 Einwohner im Jahr 2050 sinkt und damit sich der Verbrauch und auch die zu entsorgenden Abfallströme um 8% reduziert.

Daraus wird für die Abfallbehandlung im Jahr 2050 abgeleitet, dass der Stromverbrauch durch energieeffizientere Maschinen um 20 % sinkt.

Aufgrund eines höheren Busch- und Baumbestandes in der Zukunft wird davon ausgegangen, dass der Anteil des kompostierbaren Grünschnitts um 20 % steigt.

Entsprechend des angenommenen Bevölkerungsrückgangs um 8 % werden die Anteile aus dem sortenreinen Recycling, der Bioabfall- und Restabfallsammlung um diesen Faktor reduziert. Gleiches gilt für die CO₂-Emissionen durch den Fuhrpark. Insgesamt steigen jedoch die absoluten Mengen als Folge des bewussteren Sortierverhaltens der Bevölkerung.

Da die Veränderungen der spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren im Jahr 2050 nicht vorhersehbar sind, werden diese anlog zur Entwicklung der CO₂-Emissionsfaktoren für den Strom (s. Tab. 2) angepasst bzw. für das Jahr 2050 durch den Faktor 17 dividiert. Darüber hinaus wird, wie schon bei der Bilanzierung der Abwasserbehandlung, von gesteigerten Wirkungsgraden der BHKW ausgegangen.

4.2.2 Maßnahmen

Im Rahmen der Strategieguppe „Regionale Wirtschaftskreisläufe / Abfallwirtschaft“ wurden Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, die durch die Abfallbehandlung der Stadt und Region Hannover entstehen, diskutiert und als Vision für 2050 festgehalten bzw. für die Bilanzabschätzung für das Jahr 2050 vorgegeben:

- vollständige **Oberflächenabdichtung der Deponien**,
- **Annahme einer „zero-waste“⁴ Gesellschaft** mit
- **Vergärung des anfallenden Bioabfalls** und Nutzung des entstehenden Biogases und Gärrestes/ Kompostes.

Da die emittierenden Ausgasungen der Deponien im Jahr 2012 den größten Teil der CO₂-Emissionen ausmachen, wird im Jahr 2050 die Umsetzung einer vollständigen Oberflächenabdichtung der Altdeponien in der Region Hannover angenommen.

Die Realisierung einer „zero-waste“ Gesellschaft im Jahr 2050 ist durch die Vision somit vorgegeben. Für die Berechnung wird daher der im Jahr 2012 anfallende Restmüll in die jeweiligen Fraktionen (LVP, Glas, Altpapier, Bioabfall, etc.) aufgeteilt und entsprechend als stofflich verwertet bzw. recycelt angerechnet. Es verbleibt ein Sortier- und Inertmaterialrest⁵, wel-

⁴ „zero-waste“ = „null-Abfall“ bedeutet, dass es keinen Abfall mehr gibt und alles verwertet wird

⁵ Inertmaterial: Materialien, die mit anderen Reaktionspartnern keine Reaktionen eingehen

cher sich auf Grund der Verhältnismäßigkeit von Aufwand zu Nutzen nicht vermeiden lassen wird. Für diesen nicht recycelfähigen Rest und zur Schadstoffentfrachtung ist entsprechend der aktuellen Deponieverordnung [DepV, 2009] auch entsprechender Deponieraum vorzuhalten. Durch die angenommenen Maßnahmen entfällt die thermische Verwertung.

Die letzte Maßnahme betrifft die Vergärung des anfallenden Bioabfalls, welcher bisher kompostiert wird. Dadurch kann mehr Biogas erzeugt werden, welches zur Energiegewinnung genutzt werden kann. Anschließend wird der Gärrest kompostiert.

4.2.3 Ergebnisse 2050

Durch die Umsetzung der genannten Maßnahmen verursacht die Abfallbehandlung der Stadt und Region Hannover im Bilanzjahr 2050 negative CO₂-Emissionen von **-5.305 t CO₂-eq/a**, (Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2050, siehe Tab. 2) was eine CO₂-Gutschrift bedeutet.

Eine Auflistung der CO₂-Emissionen und ihre grafische Darstellung erfolgt in Tab. 10 und Abb. 10. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Bruttoemissionen mit 57,9 % durch den Fuhrpark entsteht. Der zweite große Anteil der Bruttoemissionen wird durch die Restausgasung des BA-Outputs mit 33,5 % verursacht. Die Emissionen durch die Betriebsgebäude machen 6,3 % aus. Die Kompostierung sowie die Abwasserreinigung machen mit 1,9 % beziehungsweise 0,5 % hingegen nur einen sehr geringen Anteil der Bruttoemissionen aus und sind in der Grafik nicht zu erkennen. Das Recycling und die BA senken die CO₂-Emissionen und gehen als Gutschriften in die Bilanz ein. Mit 52,0 % und 48,0 % der Gutschriften bilden das Recycling und die BA etwa zu gleichen Teilen die Gutschriften. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erläutert, entfällt auf Grund der Vorgaben im Jahr 2050 die thermische Behandlung des Siedlungsabfalls.

Tab. 10: Auflistung der Behandlungsanlagen mit entsprechenden CO₂-Emissionen (Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2050, siehe Tab. 2)

Behandlungsanlage	CO ₂ -Emissionsäquivalent [t CO ₂ -eq/a]	prozentualer Anteil
Restausgasung	3.509	33,5 %
Fuhrpark	6.068	57,9 %
Betriebsgebäude	657	6,3 %
Kompostierung	202	1,9 %
Abwasserreinigung	50	0,5 %
Summe (brutto)	10.485	100 %
MBA/BA	-7.577	48 %
thermische Behandlung	-	-
Recycling	-8.213	52 %
Summe (Gutschriften)	-15.790	100 %
Summe (netto)	-5.305	

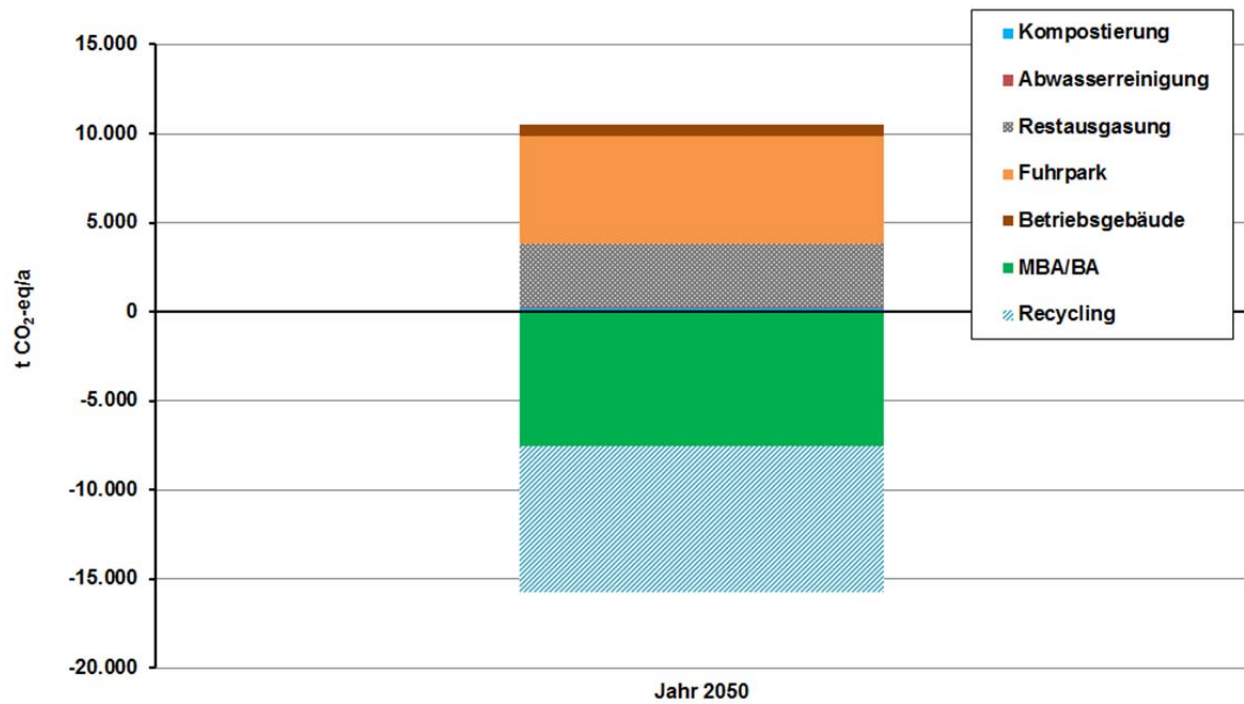


Abb. 10: CO₂-Gesamtemissionen des Bilanzjahres 2050 der Abfallwirtschaft
(Bezug: CO₂-Äquivalenzfaktoren 2050, siehe Tab. 2)

4.3 Bilanzvergleich 2012 und 2050

Ein Vergleich der CO₂-Bilanzrechnungen der Jahre 2012 und 2050 zeigt Abb. 11. Es ist zu erkennen, dass die CO₂-Emissionen im Jahr 2050 durch die Maßnahmen deutlich gesenkt werden. Das liegt vor allem an den nicht mehr vorhandenen Ausgasungen der Deponien. Der Rückgang der CO₂-Emissionen durch den Fuhrpark und der Betriebsgebäude liegt an den vorgegebenen geringeren spezifischen Emissionsfaktoren im Jahr 2050 für Energie und Energieträger. Zwar entstehen durch die Kompostierung und Restausgasung des Gärrests weiterhin Emissionen, allerdings fallen diese deutlich geringer aus.

Obwohl im Jahr 2050 die stoffliche Verwertung des Abfalls erheblich ausgebaut ist, dadurch mehr Primärressourcen durch Recyclingmaterial substituiert werden und damit die thermische Behandlung des Abfalls hinfällig wird, bleibt dies insgesamt bei der CO₂-Bilanz nahezu unbemerkt. Grund hierfür sind wesentlich die Annahme der verringerten Gutschriften für das Recyclingmaterial bzw. der vorgegebenen verringerten CO₂-Emissionsfaktoren (siehe Tab. 2). Gegenüber dem Jahr 2012 kann dennoch durch die betrachteten Maßnahmen im Jahr 2050 eine in der Nettosumme klimaneutrale Abfallbehandlung erreicht werden.

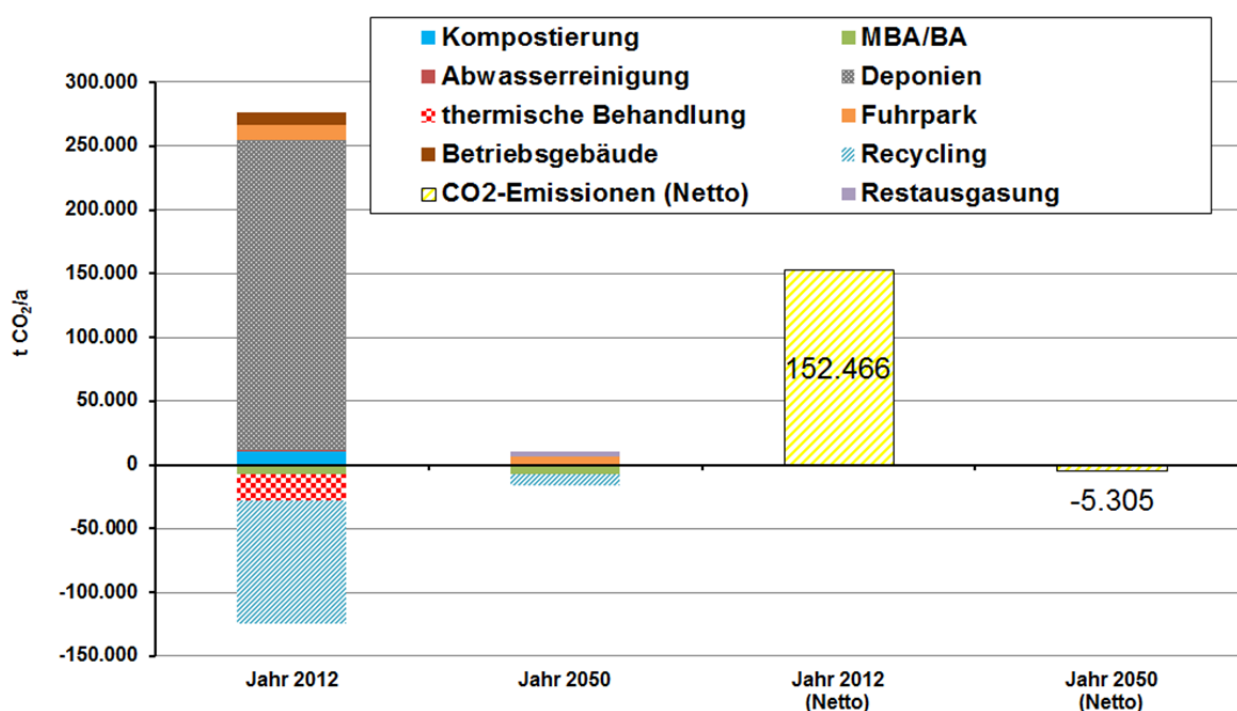


Abb. 11: Gegenüberstellung der CO₂-Emissionen und CO₂-Gutschriften der Abfallbehandlung für die Bilanzjahre 2012 und 2050 mit entsprechend unterschiedlichen CO₂-Emissionsäquivalenzfaktoren (siehe Tab. 2)

5 Sektorübergreifende Maßnahmen

5.1 Nutzung von Abwärmen aus der Abfallbehandlung am Standort Lahe

Im Rahmen der Abfallbehandlung fallen derzeit am Standort Lahe ungenutzte Abwärmen an:

- Abwärme aus dem Abgas und den Kühlkreisläufen der BHKW zur Verstromung von Gär- und Deponiegas, -
- Abwärme aus dem Abgas der RTO zur Abluftreinigung der MBA und
- Abwärme aus den Luftkühlern und Turbinendampf der thermischen Abfallbehandlungsanlage („Energy from Waste“-Anlage) zur Verstromung der heizwertreichen Fraktion.

Zur Nutzung dieser Abwärmen sind derzeit unterschiedliche Maßnahmen denkbar, die aber auf Grund der in 2050 veränderten Abfallbehandlung anders zu bewerten sind oder woraus sich andere Maßnahmen ableiten lassen. Tab. 11 gibt einen Überblick über die Maßnahmen der Nutzung von Abwärmen in 2010 und 2050.

Tab. 11: Sektorübergreifende Maßnahmen zur Nutzung der Abwärmen in 2012 und 2015

Maßnahmen 2012	Maßnahmen 2050
<ul style="list-style-type: none"> - Nutzung der Abwärme der BHKW und RTO für die Klärschlamm-trocknung und anschließende landwirt. Klärschlammverwertung - Nutzung der Abwärme „Energy from Waste“-Anlage Lahe für die Klärschlamm-trocknung und anschließende landwirtschaftliche Klärschlammverwertung 	<ul style="list-style-type: none"> - Abwärme aus BA reduziert, da optimierte interne Nutzung - Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr erlaubt - Abwärmenutzung aus der thermischen Behandlung steht nicht mehr zur Verfügung. - Ggf. „Energy from Waste“-Anlage umbauen zur Klärschlammmonoverbrennung - Gemeinsame P- und N-Rückgewinnungsanlage aus der Klärschlamm-asche und den Gärresten aus der BA und der Bioabfallvergärung (z.B. Terra Preta)

Die Nutzung der Abwärmen aus der „Energy from Waste“-Anlage sowie aus den BHKW zur Gär- und Deponiegasverstromung für die Klärschlamm-trocknung ist bereits jetzt, unabhängig von wirtschaftlichen Aspekten und vertraglichen Lieferbedingungen, eine technisch umsetzbare Möglichkeit. Allerdings fällt die Abwärme am Standort Lahe an, weshalb eine solche Maßnahme aufgrund der anfallenden LKW Transporte hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Klimarelevanz fragwürdig ist.

Bei Vorhandensein einer „zero-waste“-Gesellschaft im Jahr 2050 steht die Abwärme der „Energy from Waste“-Anlage nicht mehr zur Verfügung, da der Abfall stofflich verwertet wird. Allerdings wäre eine Umnutzung der „Energy from Waste“-Anlage zur Klärschlammmonoverbrennung denkbar. Dadurch könnte Energie bereitgestellt und aus der anfallenden Asche des Klärschlamm Phosphat zurückgewonnen werden. Eine gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage am Standort Lahe zur Rückgewinnung von

- Phosphor aus der Asche des Klärschlamm und
- Stickstoff und Phosphor aus dem Gärrest der biologische Abfallbehandlung

wäre eine vorstellbare Maßnahme.

5.2 Verwertung der Reststoffe aus der biologischen Abfallbehandlung (BA)

Im Rahmen der Abfallbehandlung fällt derzeit bei der Vergärung der biologischen Restabfallbehandlung in Lahe überschüssiges Prozesswasser an. Auf Grund seiner Abfalleigenschaft wird dieses Prozesswasser derzeit über eine Fremdfirma kostenpflichtig entsorgt. Auf Grund seiner organischen Belastung ist eine weitere anaerobe Behandlung zur Produktion von Biogas möglich. Versuche des ISAH haben gezeigt, dass aus 1 g CSB des Prozesswassers unter Normbedingungen im Labor ca. 120 ml Methan produziert werden kann. Dies entspricht einem rechnerischen Potenzial von rund 133.000 m³ Methan pro Jahr bzw. 1,3 GWh/a.

Weiterhin wird derzeit der Gärrest aus der Vergärung über eine Aerobisierung der Nachrotte zugeführt und dort bis zum Erreichen der Ablagerungsbedingungen der Deponieklasse II stabilisiert. Tab. 12 zeigt mögliche sektorübergreifende Maßnahmen, die in 2012 und 2050 ableitbar wären, um Ressourcen dieser Reststoffe rückzugewinnen. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass durch die in 2050 veränderte Abfallbehandlung diese Maßnahmen anders zu bewerten sind oder sich daraus andere Maßnahmen ableiten lassen.

Tab. 12: Sektorübergreifende Maßnahmen zur Verwertung der Reststoffe aus der biologischen Abfallbehandlung in 2012 und 2015

Maßnahmen 2012	Maßnahmen 2050
- Prozesswasser aus der Vergärungsstufe der BA als Co-Ferment im Faulbehälter zur Faulgasertragsteigerung	- Prozesswasser aus der Vergärungsstufe der BA als Co-Ferment im Faulbehälter zur Faulgasertragsteigerung - Gemeinsame P- und N-Rückgewinnungsanlage aus der Klärschlammasche und den Gärresten aus der BA und der Bioabfallvergärung

Für die weitergehende Prozesswasseraufbereitung mit Biogasgewinnung sind in 2012 mehrere Varianten denkbar: die Behandlung vor Ort, verbunden mit einem Neubau einer Behandlungsanlage und die Co-Fermentation des Prozesswassers a.) in der Klärschlammfäulung (z.B. KW Herrenhausen, KW Gümmerwald, KA Langenhagen) oder b.) in einer Co-Fermentationsanlage zur Biogasproduktion. Um Treibhausgasemissionen zu vermeiden sind sicherlich die Transportwege gering zu halten und eine lokale Lösung zu präferieren. Um die Energienutzung effizient zu gestalten, sollte ein Standort mit hohem Wärmenutzungspotenzial gewählt werden. Für die Kostenbewertung sind zudem ungenutzte Faulraumkapazitäten sowie Kosten für Neuinvestitionen, Wartung- und Betrieb sowie Transport und Entsorgung zu betrachten.

In 2050 ist auf Grund der getroffenen Annahmen weiterhin mit einem Anfall von überschüssigem Prozesswasser zu rechnen. Zudem wird angenommen, dass die Bioabfälle vergoren werden und somit ein Gärrest anfällt. Wenn dieser nicht vollständig kompostiert wird, wäre am Standort Lahe die bereits in Kap. 5.1 erwähnte gemeinsame Nährstoff-Rückgewinnungsanlage aus der Klärschlammasche und dem Gärrest eine Maßnahme zur Reduzierung der Treibhausgase.

5.3 Sektorübergreifende Biogas- oder Biomethanproduktion

Derzeit wird der anfallende Bioabfall der Stadt und der Region Hannover kompostiert, und das Biogaspotenzial des Bioabfalls bleibt ungenutzt. Zum Teil bestehen freie Faulraumkapazitäten auf den Kläranlagen, so dass die Co-Fermentation von vergärbaren Abfällen aus der Region mit Klärschlamm ausgebaut werden könnte. Die Co-Fermentation von, gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz, getrennt gesammelten Bioabfall und von Klärschlamm ist nach heutiger Gesetzeslage nicht zulässig.

Für 2050 wurde angenommen, dass der für eine Vergärung gut geeignete Anteil der Bioabfälle vollständig zur Biogasproduktion genutzt wird. Die Vergärungsanlage des Restmülls und auch die Faulbehälter der Klärschlammfaulung sind weiterhin in Betrieb. Als sektorübergreifende Maßnahme könnte daraus eine gemeinsame Aufbereitung der produzierten Bio- und Faulgase zu Biomethan mit Einspeisung ins Erdgasnetz bzw. zur direkten Nutzung im GuD Kraftwerk Linden abgeleitet werden. Für die Abschätzung der CO₂-Bilanz für das Jahr 2050 ist die Vergärung des Bioabfalls in der anaeroben Stufe der BA bereits berücksichtigt, weshalb Bioabfall als Co-Ferment zur Klärschlammfaulung entfällt. Tab. 13 sind entsprechend die Maßnahmen zur Nutzung von Kapazitäten zur Vergärung und Biogasproduktion in 2012 und 2050 gegenübergestellt.

Tab. 13: Sektorübergreifende Maßnahmen zur Biogas- oder Biomethanproduktion in 2012 und 2050

Maßnahmen 2012	Maßnahmen 2050
<ul style="list-style-type: none"> - Co-Fermentation geeigneter Bioabfällen im Faulbehälter z.B. der Klärwerke Herrenhausen, Gümmerwald oder Langenhagen 	<ul style="list-style-type: none"> - Bioabfall wird generell zur Biogasproduktion durch Vergärung genutzt und entfällt daher als Co-Substrat für die Klärschlammfaulung - Gemeinsame Faulgas- und Biogasaufbereitung zu Biomethan und Einspeisung ins Netz bzw. zum GuD Kraftwerk Linden

5.4 Gegenüberstellung anhand der Bewertungsansätze von Treibhausgasemission und Kosten

In den ausgewerteten Konzeptstudien und Berichten wurden in der Regel Maßnahmen und Varianten hinsichtlich technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet. Da eine wirtschaftlich optimale Lösung nicht aber gleichzeitig mit den geringsten Treibhausgasemissionen verbunden sein muss und umgekehrt, werden dementsprechend die Umsetzung der Maßnahmen von unterschiedlichen Interessengruppen favorisiert. In Tab. 14 sind die in Kap. 5.1 bis 5.3. beschriebenen Maßnahmen zusammengefasst und qualitativ hinsichtlich Kosten und Treibhausgaspotenzial bewertet.

Tab. 14: Vergleich einer monetären und klimatischen Bewertung von verschiedenen Klärschlammbehandlungsweisen

Maßnahme	Zielparameter für die Bewertung			
	Klimarelevanz (CO ₂)		Kosten (€)	
	2012	2050	2012	2050
5.1.1 Nutzung von Abwärmen aus der Abfallbehandlung am Standort Lahe				
Nutzung der Abwärme der BHKW und RTO für die Klärschlamm Trocknung und anschließende landwirt. Klärschlammverwertung	☺	nicht verfügbar	☺	nicht verfügbar
Nutzung Abwärme der „Energy from Waste“-Anlage für die Klärschlamm Trocknung und anschließende landwirt. Klärschlammverwertung	☺	nicht zulässig	☺	nicht zulässig
Nutzung der „Energy from Waste“-Anlage zur Klärschlammmonoverbrennung	☺	nicht verfügbar	☹☹	nicht verfügbar
Gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage (Klärschlammmasche und Gärresten)	☺	nicht zulässig	☺	nicht zulässig
Gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage (Klärschlammmasche und Gärresten)	nicht verfügbar	☺	nicht verfügbar	☹☹
Gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage (Klärschlammmasche und Gärresten)	nicht verfügbar	☺☺	nicht verfügbar	☺
5.1.2 Nutzung des Reststoffe aus der biologischen Abfallbehandlung (BA)				
Prozesswasser aus der Vergärungsstufe der BA als Co-Ferment im Faulbehälter	☺	☺	☺	☹
Gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage (Klärschlammmasche und Gärresten)	nicht verfügbar	☺☺	nicht verfügbar	☺
5.1.3 Biogas- oder Biomethanproduktion				
Co-Fermentation geeigneter Bioabfällen im Faulbehälter z.B. der Klärwerke Herrenhausen, Gümmerswald oder Langenhagen	☺	nicht verfügbar	☹	nicht verfügbar
Gemeinsame Faulgas- und Biogasaufbereitung zu Biomethan und Einspeisung ins Netz bzw. zum GuD Kraftwerk Linden	nicht verfügbar	☺	nicht verfügbar	☺

☹ = kostengünstig, erhöht CO₂-Bilanz

☺ = kostengünstig, erniedrigt CO₂-Bilanz

☹☹ = nicht eindeutig

Wie erläutert wird für 2050 angenommen, dass die Abwärmen aus den BHKW und der RTO nicht mehr zur Verfügung stehen und die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr zulässig ist.

Derzeit reduziert die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung das Treibhausgaspotenzial und führt zur Kostenersparnis durch die Düngersubstitution.

Die Trocknung des Klärschlammes führt zur monetären Belastung durch Investitionen und Betriebskosten. Hinsichtlich des Treibhausgases wird diese Maßnahme als CO₂-reduzierend eingestuft, wobei die Nutzung der überschüssigen Wärmeenergie den zusätzlich anfallenden Transporten gegenübergestellt werden muss.

Die Umnutzung der „Energy from Waste“-Anlage zur Klärschlammmonoverbrennungsanlage ist mit technischem Aufwand und entsprechenden hohen Investitionen verbunden. Außerdem sind in 2050 die Gutschriften für den Strommix gering, so dass diese Maßnahme hinsichtlich der Kosten schlecht bewertet wird.

Eine gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsanlage führt zu einer Rückführung von Nährstoffen bzw. Substitution von Kunstdüngern. Allerdings sind müssen hier Investitionen und geringe Gutschriften in 2050 berücksichtigt werden, was aber zu keinem eindeutigen Ergebnis führt.

Die Prozesswassernutzung ist sowohl monetär als auch hinsichtlich der Klimabilanz positiv zu bewerten. Im Jahr 2050 dürfte sich zwar die Menge erhöhen, aber die Gutschrift fällt eher niedrig aus, so dass diese Maßnahme dann sogar unwirtschaftlich würde.

Die Co-Fermentation geeigneter Bioabfälle mit dem Klärschlamm ist nur in 2012 eine Option, da diese in 2050 nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Substitution von Primärenergie durch Faulgasproduktion, von Dünger durch Gärrestausbringung wirkt sich in der CO₂-Bilanz mindernd aus. Investitionen für Vorbehandlung und Transport und möglicherweise erhöhte Wartungs- und Instandsetzungskosten wurden entsprechend bewertet.

Eine gemeinsame Faulgas- und Biogasaufbereitung ist derzeit nicht verfügbar, könnte aber am Standort Lahe oder beim Kraftwerk in 2050 eine interessante Option darstellen. Durch Substitution von Primärenergie ist dies sicherlich in der CO₂-Bilanz mindernd, aber entsprechend den Gutschriften in 2050 geringfügig, zu berücksichtigen sind. Da hier zum richtigen Zeitpunkt eine zentrale Einrichtung mit der Auflösung von mehreren Standorten und mit dem Wegfall von Ersatzbeschaffungsmaßnahmen verbunden werden kann, wird diese Maßnahme als einfach kostengünstig bewertet.

Nicht bewertet wurde, dass die Abwasserbehandlung in 2050 generell auf Separation von Gelb, Braun und Grauwasser umgestellt und die stoffliche Verwertung in diesem Sektor Vorrang hat.

6 Zusammenfassung

Im Auftrag der Region Hannover wurde vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik untersucht, ob im Jahr 2050 die Abwasser- und Abfallbehandlung klimaneutral erfolgen kann. Basierend auf den für das Jahr 2012 erhobenen Daten wurde für die einzelnen Bereiche eine aktuelle CO₂-Bilanz aufgestellt.

Für die Abwasserbehandlung wurde eine Datenerhebung unter den 26 Kläranlagen der Region durchgeführt und es konnten 95 % der Einwohnerwerte direkt ausgewertet werden. Die restlichen 5% wurden anhand der Größenklasse der Abwasserreinigungsanlage extrapoliert.

Für die Abfallwirtschaft wurde die Daten vom Zweckverband Abfallwirtschaft Region Hannover (aha) für die Standorte Lahe, Kolenfeld, Burgdorf, Gehrden und Wiedenbrügge ausgewertet sowie die Anteile der thermischen Abfallbehandlung in den Anlagen Buschhaus, Hameln und Lahe berücksichtigt.

Für das Jahr 2050 wurden Vorgaben zu den CO₂-Emissionsequivalenzfaktoren berücksichtigt und Annahmen getroffen, wie sich die Abwasser- und Abfallbehandlung verändern bzw. wie eine klimaneutrale Entsorgung erreicht werden kann. Generell ist bei der Bewertung und Interpretation zu berücksichtigen, dass die CO₂-Emissionsequivalenzfaktoren insbesondere für den Strommix in der Stadt Hannover im Jahr 2050 um den Faktor 65 und im Umland um den Faktor 18 niedriger sind, als im Bezugsjahr 2012 (s. Tabelle 2).

Bei der **Abwasserbehandlung** kann eine Reduktion des Treibhausgaspotenzials von ca. 42.000 t CO₂-eq/a in 2012 (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2012) auf ca. 24.065 bzw. 24.926 t CO₂-eq/a in 2050 (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2050) je nach Klärschlammverwertungskonzept erreicht werden. Die anfallenden CO₂-Äquivalente in 2050 sind größtenteils auf direkte Emissionen an Kohlendioxid, Methan und Lachgas zurückzuführen. Eine CO₂-neutrale Abwasserreinigung würde einen vollständig eingehausten Prozess mit entsprechender Abluftbehandlung benötigen. Wäre diese Voraussetzung für 2050 erfüllt, überwiegen die Vorteile einer Faulung aufgrund der höheren bereitgestellten nutz- und speicherbaren Energiemenge bzw. -form. Daraus lassen sich Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionsäquivalente bei der Abwasserbehandlung ableiten:

- anaerobe Schlammbehandlung und Faulgasnutzung zur Energiegewinnung aller Kläranlagen,
- geeignete Abdeckung und Abluftbehandlung zur Vermeidung von Treibhausgasen,
- thermische Verwertung des gesamten anfallenden Klärschlammes zur Energieerzeugung und
- Nutzbarmachung der Abwärme im Kanalnetz.

Während für die **Abfallwirtschaft** das Treibhausgaspotenzial im Jahr 2012 mit ca. 153.000 CO₂-eq/a (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2012) noch deutlich positiv ist, kann mit den hier betrachteten Maßnahmen:

- Vollständige Oberflächenabdichtung der Deponien
- Annäherung an eine „Zero-Waste“ Gesellschaft und
- Vergärung des Bioabfalls und Nutzung des Biogases

durchaus im Jahr 2050 eine klimaneutrale Abfallbehandlung erreicht werden. Verantwortlich für die leicht negative CO₂-Bilanz der Abfallbehandlung in 2050 von ca. -5.000 t CO₂/a (Bezug: CO₂-Emissionsäquivalent 2050) sind vor allem die nicht mehr vorhandenen Treibhausgasemissionen aus der dann abgedichteten Deponie Lahe.

Die ausschließliche stoffliche Nutzung der Abfälle (Erhöhung des Recycling) sowie die Biogasproduktion durch Vergärung des Bioabfalls und des organischen Anteils des Restabfalls wirken sich auf Grund der geringen Gutschriften für CO₂-Äquivalente in der CO₂-Bilanz für 2050 nicht mehr aus.

Für die Abfallwirtschaft ist weiterhin Deponieraum für inertes und nicht recyclingfähiges Material sowie zur Ausschleusung von gefährlichen Abfällen vorzuhalten. Die Annahme einer Zero-Waste Gesellschaft in 2050 in dem Sinne, dass alles verwertet und weder Sortierreste noch auszuschleusende Gefahr- oder Giftstoffe entstehen, wird als nicht realistisch erachtet. Eine weitest gehende Annäherung ist möglich, jedoch müssen Aufwand und Nutzen gerechtfertigt sein und nicht zu weiteren Umweltbelastungen führen.

Die Verknüpfung von Stoff- und Energieströmen der Abwasser- und Abfallbehandlung bietet eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der CO₂-Emissionen und kann zu einer höheren Wirtschaftlichkeit beider Sektoren führen. Denkbare Ansätze hierzu sind

- Nutzung von Abwärme aus der Abfallbehandlung zur Klärschlamm Trocknung,
- Co-Fermentation von geeigneten Abfällen in freien Faulbehälterkapazitäten,
- gemeinsame Faul- und Gär gasaufbereitung sowie Einspeisung des Methans ins Gasnetz,
- gemeinsame Nährstoffrückgewinnungsstrategie hinsichtlich Stickstoff und Phosphor aus dem Klärschlamm und den Gärresten.

7 Anhang – Datengrundlage und getroffene Annahmen

7.1 Abwasserbehandlung

7.1.1 Datengrundlage 2012

Leerzelle: keine Angaben

Kläranlage		KW 1	KW 2	KW 3	KW 4	KW 5	KW 6	KW 7	KW 8	KW 9	KW 10
Bemessungsgrößen der Kläranlage											
Kläranlagenkapazität	EW	4.200	5.000	5.000	9.900	10.000	10.000	11.000	15.000	20.000	22.000
Ausbaugröße Abwassermenge	m³/d						2.600		4.375		
Tatsächliche Kläranlagenbelastung											
angeschlossene Einwohner E				2.450			5.082		11.032		
Zulaufnachfr. BSB ₅	kg/d			168		220,09	378	330	668	632,36	
angeschlossene EGW				350			6.300		11.133		
Jahresabwassermenge	m³	161.276	343.723	181.582	506.373	250.368	270.379	318.396	483.320	626.618	884.007
max. Tagesmenge (alle Tage)	m³			1.375			1.550		3.020		
Jahresschmutzwassermenge (alle TW-Tage)	m³	153.108	288.936	172.753	353.878	235.175	259.768	309.067	461.790	547.883	
Eigenüberwachungsergebnisse											
(Zulaufkonzentrationen als Jahresmittelwerte)											
BSB ₅	mg/l			373		343,9	512	411,17	506	424,71	349
CSB	mg/l	504	432	641	538	578	1.089	864,34	1.160	743	882
Ammoniumstickstoff	mg/l			47		58,38	62	81,31	70	52,60	59,6
Stickstoff gesamt	mg/l	54	53	48,6	62	60,07	80	82,9	92	53,69	78,4
Phosphor gesamt	mg/l	12	11,8	10,06	14,30	11,69	13,7	16,47	15,5	12,2	13

Leerzelle: keine Angaben

Kläranlage		KW 11	KW 12	KW 13	KW 14	KW 15	KW 16	KW 17	KW 18	KW 19	KW 20
Bemessungsgrößen der Kläranlage											
Kläranlagenkapazität	EW	35.000	35.000	41.000	46.000	48.000	67.000	77.500	150.000	500.000	750.000
Ausbaugröße Abwassermenge	m³/d			10.500	12.910		14.500	23.200	28.000	67.500	120.000
Tatsächliche Kläranlagenbelastung											
angeschlossene Einwohner E		30.000	26.500	25.410	24.236		35.500	42.679	80.000	459.872	645.695
Zulauffracht BSB ₅	kg/d		1.615	1.677	1.807		3.666	3.927	7.175	28.900	39.600
angeschlossene EGW			417	27.950	2.914			22.771	40.000		
Jahresabwassermenge	m³	1.678.110	1.695.097	1.573.980	1.598.873	2.119.499	2.736.548	3.137.762	5.609.861	23.946.531	34.680.148
max. Tagesmenge (alle Tage)	m³	12.604	7.645	8.090	13.630			15.512	31.350		
Jahresschmutzwassermenge (alle TW-Tage)	m³		1.567.820	1.510.274	1.417.796	1.969.627	2.444.324	2.785.411	5.138.223		
Eigenüberwachungsergebnisse											
(Zulaufkonzentrationen als Jahresmittelwerte)											
BSB ₅	mg/l	199	431	390	371,5		494	466	668	441,71	605,25
CSB	mg/l	531	750	920	678,72	723	1.015	861	1.571	839,09	1.184,51
Ammoniumstickstoff	mg/l		49	62	62,94		59,62	49,8		42,17	59,26
Stickstoff gesamt	mg/l		50,81	83	76,83	47	84,4	71,3	68	63,12	90,71
Phosphor gesamt	mg/l		13,4	16	12,44	16,2	13,19	13,5	11,4	11,04	14,64

Leierzelle: keine Angaben

[illegible]

Leerzelle: keine Angaben

Kläranlage		KW 11	KW 12	KW 13	KW 14	KW 15	KW 16	KW 17	KW 18	KW 19	KW 20
Klärschlamm Entsorgung											
Klärschlamm trockenmasse incl. Kalk	t TS	1.875,1	431,37	385	429,07	750 (OS)	4.283,65 (OS)	777,88	1.477,34	4.956	7.434
davon											
landw. Verwertung in der Region Hannover	t TS	-	377,20	-	429,07		837,42		355,63	398,4	597,6
landw. Verwertung außerhalb der Region Hannover	t TS	1.875,1		359	-		3.446,23	777,88	553,58	2.348,4	3.522,6
Deponierung	t TS	-		26	-		-	-		-	-
Verbrennung/ thermische Verwertung	t TS	-		-	-		-	-	568,13	1.106	1.659
Kompostierung	t TS	-		-	-		-	-	-	1.103,2	1.654,8
Energieverbräuche											
Stromverbrauch - Abwasserbehandlung	kWh	978.080	1.322.932	1.035.610	1.339.751	1.200.716	1.526.780	2.324.421	842.624	11.917.626	12.440.454
Stromverbrauch - Entwässerung bzw. Schlammbehandlung	kWh		65.651				127.595	191.897	298.646		
Gasverbrauch	m³	20.422	-	6.500	-	-	16	9	118.241	-	-
Energieerträge											
Stromerzeugung	kWh	-	-	508.250	478.625	-	-	-	1.990.253	7.416.480	7.751.473
Gasgewinn	m³	-	-	272.180	265.903*	-	-	-	907.269	4.331.807	4.514.705

*Schätzwert: berechnet mit einem Heizwert für Faulgas von 6 kWh/m³ und einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,3

7.1.2 Betriebs- und Hilfsstoffe

Durch den Einsatz von Betriebs- und Hilfsstoffen entstehen zwar keine direkten Emissionen, jedoch entstehen bei der Herstellung klimaschädliche Gase. Von den Kläranlagenbetreibern wurden Mengenangaben für das Jahr 2012 zu den eingesetzten Betriebs- und Hilfsstoffen, wie Flockungshilfsmittel (FHM), Fällmittel, Kalk und Polymere geliefert. Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedlichen Produkten von verschiedenen Herstellern wurden für die Berechnung alle Kalkarten als Kalk und alle weiteren Betriebs- und Hilfsstoffe (FHM, Fällmittel, Polymere) als sonstige Betriebsmittel zusammengefasst. Die Berechnung der indirekten Emissionen durch den Einsatz von Betriebs- und Hilfsstoffen findet über die in Tab. 15 gezeigten Emissionsfaktoren statt.

Tab. 15: Emissionsfaktoren der Betriebs- und Hilfsstoffe

Betriebs- und Hilfsstoffe	Emissionsfaktor [CO ₂ -eq kg/kg]	Quelle
Kalk	1,74	[Shahabadi et al., 2009]
sonstige Betriebs- und Hilfsstoffe (FHM, Fällmittel, Polymere)	0,48	[SWB, 1993]

Für das Jahr 2050 wurden die eingesetzten Mengen an Betriebs- und Hilfsstoffen um 8 % analog zum Bevölkerungsrückgang der Stadt und Region Hannover gesenkt. Daraus ergeben sich die in Tab. 16 aufgeführten CO₂-eq-Emissionen.

Tab. 16: CO₂-Emissionen durch den Betriebs- und Hilfsstoffeinsatz für die Jahre 2012 und 2050

Emissionsquelle	2012	2050
Kalkmengen [t]	2.460	2.263
Sonstige Betriebs- und Hilfsstoffmengen [t]	6.387	5.876
Summe Betriebs- und Hilfsstoffe [CO ₂ -eq kg/a]	7.182.212	6.273.899

7.1.3 Direkte Treibhausgasemissionen

Die direkten Treibhausgasemissionen, die bei der **Abwasserreinigung** entstehen, können nur schwer gemessen werden, da sie diffus aus den Becken emittieren. Aufgrund dessen liegen auch keine Werte für die Region Hannover vor. Um trotzdem eine realistische Einschätzung der entstehenden direkten Emissionen zu bekommen, wurden Emissionsfaktoren aus unterschiedlichen Literaturquellen verglichen. Als mittlerer Emissionsfaktor wurde daraus der Median bestimmt. Zur Einschätzung des Wertebereichs sind in der Tab. 17 zusätzlich die minimalen und maximalen Werte angegeben.

Tab. 17: Emissionsfaktoren für direkte Treibhausgasemissionen im Bereich der Kläranlage [Becker et al., 2012; Daelmann et al., 2012; Remy et al., 2011; Thöle et al., 2011; Thru, 2014]

Treibhausgas	Minimum	Maximum	Median	Einheit
CO ₂ (fossil)	-	-	0,05	[kg CO ₂ (fossil)/kg CSB]
CH ₄	1,10	5,75	3,79	[kg CO ₂ -eq/(EW*a)]
N ₂ O	0,93	26,52	5,72	[kg CO ₂ -eq/(EW*a)]

Die zweite Quelle der direkten Treibhausgasemissionen ist die Klärschlammbehandlung, insbesondere durch Zwischenlagerung und Eindickung sowie aus der Faulgasnutzung (Methanschlupf). Im Jahr 2012 können für die Eindickung und Entwässerung sowie Faulschlamm Lagerung 5 % angenommen werden [Thöle et al., 2011]. Für das Jahr 2050 reduzieren sich diese auf einen Rest von 0,5 %. Hierbei handelt es sich um das Restgaspotenzial des vergorenen Schlammes, das im Faulschlamm Lager unvermeidlich ausgasst.

Anhand der Informationen über die Menge des Faulgases und des Methangehalts werden die direkten Treibhausgasemissionen abgeschätzt. Es wird angenommen, dass bei der Verbrennung des Faulgases im BHKW etwa 1 % in 2012 und 0,5 % Methan als Methanschlupf in 2050 in die Umwelt entweichen (siehe Tab. 18).

Tab. 18: Direkte Methanemissionen im Bereich der Faulgasnutzung

Anlagenteil	Methanemissionen		
	2012	2050 Variante 1	2050 Variante 2
Schlammbehandlung und Lagerung	5 % ^{2, 3}	0,5 %	0,5 %
Methanschlupf BHKW	0,5 % ¹	-	0,5 %

¹[Vogt, 2008], ²[Ronchetti, et al., 2002], ³[Thöle et al., 2011]

Die Ergebniswerte für die Jahre 2012 und 2050 sind in Tab. 19 zu sehen. Die geringeren Emissionen im Bereich der Kläranlage resultieren aus dem 8 %igen Bevölkerungsrückgang und den damit verbundenen geringeren Abwassermengen.

Die höheren Emissionen im Bereich der Faulgasnutzung in 2050 sind auf die Ausschöpfung des gesamten Faulgaspotenzials, somit also einer gestiegenen Klärgasmenge, zurückzuführen.

Tab. 19: CO₂-Emissionen durch direkte THG-Emissionen für die Jahre 2012 und 2050

Emissionsquellen		2012	2050 Variante 1	2050 Variante 2
Abwasserreinigung	[CO ₂ -eq kg/a]	23.034.742	21.238.079	21.238.079
Lagerung	[CO ₂ -eq kg/a]	5.020.910	2.111	672.740
Faulgasnutzung (CH ₄ -Schlupf)	[CO ₂ -eq kg/a]	502.090	-	672.740

7.1.4 Klärschlammengen - Massenbilanz

Insgesamt kann für das Jahr 2012 ein Klärschlammfall in den Kläranlagen der Region Hannover von ca. 24.000 MgTS/a angenommen werden. Dabei ist nicht differenziert zwischen Rohschlamm oder teilstabilisierten und stabilisierten Schlamm, da für die Region keine spezifischen Angaben verfügbar sind. Die Menge des jährlich anfallenden Rohschlammes ist nicht angegeben.

Zur Erstellung der Massenbilanz für die beiden Varianten der Klärschlammbehandlung in 2050 ist jedoch die Menge des jährlich anfallenden Rohschlammes als Vergleichsgröße abzuschätzen. Es wird daher angenommen, dass es sich um 25% teilstabilisierten Schlamm (25%TS Abbau) und 75% stabilisierten Schlamm (33%TS Abbau) handelt. Eine Rückrechnung ergibt für das Jahr 2050 eine Rohschlammmenge von ca. 31.500 MgTS/a in der Region Hannover. Mit der Annahme, dass es sich i.d.R. um entwässerten Schlamm mit ca. 5% TS handelt, ergibt sich daraus ein Rohschlammvolumen von 630.000 MgOS/a.

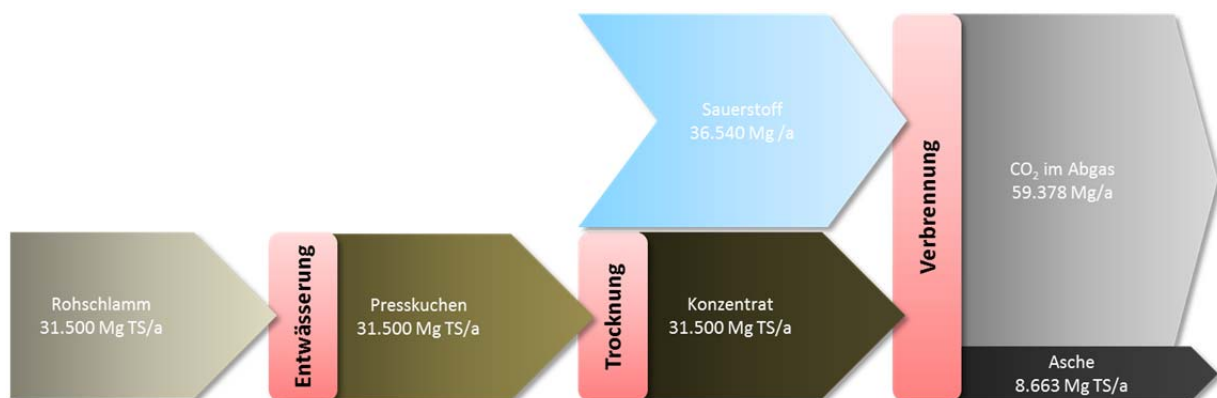
Der Glühverlust für Rohschlamm wird nach (Bischofsberger, Dichtl, Rosenwinkel, Seyfried, & Böhnke, 2005) mit 72,5 % angenommen. Mit dem für das Jahr 2050 angesetzten Abbaugrad von 65 %, ergeben sich für den Faulschlamm ein Glühverlust von 58% und ein spezifischer Methanertrag von 330 ml CH₄ pro g oTS, bei einem CSB von Rohschlamm mit 1,6 g O₂/g oTS (Kolisch, 2014).

Es wird angenommen, dass die Ströme: Filtrat, Brüden und Gaskondensat erneut der Abwasserreinigung zurückgeführt werden und als Rohschlamm in der Bilanz wieder erfasst werden. Somit werden diese Ströme nicht berechnet. Massenverluste durch Emissionen sind zu vernachlässigen, da eine geeignete Abdeckung der Anlagen und Abluftbehandlung für das Jahr 2050 vorausgesetzt wird. Die Massenbilanz für die direkte Rohschlammverbrennung ohne Faulung in 2050 ist in Tab. 20 wiedergegeben, für die zweistufige thermische Rohschlammverwertung mit Faulung in 2050 in Tab. 21.

Die anfallende Gesamtmenge an Rohschlamm beträgt 630.000 Mg OS/a bzw. 31.500 Mg TS/a. Davon werden 121.000 Mg OS/a per LKW zur Trocknung und Verbrennung transportiert. Abb. 12 zeigt das Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Faulschlamm bei der direkten Verbrennung. Durch die Verbrennung werden ca. 59.378 Mg CO₂/a freigesetzt.

Tab. 20: Massenbilanz der thermischen Rohschlammverwertung ohne Faulung in 2050

	Mg TS/a	Mg OS/a			% TS	AG
Rohschlamm	31.500	630.000			5	
Entwässerung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Rohschlamm	31.500	630.000				
Presskuchen			31.500	121.154	26	0,40
Filtrat			-	-		
Trocknung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Presskuchen	31.500	121.154				
Konzentrat			31.500	33.158	95	1,00
Brüden			0	0	0	
Verbrennung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Konzentrat	31.500	33.158				
Sauerstoff	36.540					
Asche			8.663	8.663	100	
CO ₂ im Abgas			59.378	59.378		
	Mg TS/a		Mg TS/a			
Bilanzsumme	68.040		68.040			


Abb. 12: Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der direkten Verbrennung (inkl. geeignete Abdeckung der Anlagen und Abluftbehandlung) in 2050.

Tab. 21: Massenbilanz der zweistufigen Rohschlammverwertung mit Faulung in 2050

	Mg TS/a	Mg OS/a			% TS	AG
Rohschlamm	31.500	630.000			5	
Faulung/BHKW	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Rohschlamm	31.500	630.000				
Faulschlamm			16.656	591.404		0,53
Faulgas			14.844			
Gaskondensat			-	-		
Faulung/BHKW	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Faulgas	14.844					
Sauerstoff	23.751					
CO ₂ im Abgas ¹			38.596	38.596	100	
Entwässerung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Faulschlamm	16.656	591.404				
Presskuchen			16.656	59.484	28	0,40
Filtrat			-	-		
Trocknung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Presskuchen	16.656	59.484				
Konzentrat			16.656	17.532	95	0,999
Brüden			-	-		
Verbrennung	In		Out			
	Mg TS/a	Mg OS/a	Mg TS/a	Mg OS/a		
Konzentrat	16.656	17.532				
Sauerstoff	12.789					
Asche			8.663	8.663	100	
CO ₂ im Abgas			20.782			
	Mg TS/a		Mg TS/a			
Bilanzsumme	68.040		68.040			6

Ausgehend von der gleichen Inputmenge an Rohschlamm (630.000 MgOS/a bzw. 31.500 MgTS/a) werden ca. 59.000 MgOS/a per LKW zur Trocknung und Verbrennung transportiert, das sind ca. 49% weniger als bei der direkten Klärschlammverbrennung.

Ein Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Faulschlamm bei der direkten Verbrennung zeigt Abb. 13. Durch die Verbrennung von Faulgas und Faulschlamm werden insgesamt ca. 59.378 Mg CO₂/a freigesetzt.

¹CO₂ im Abgas: Es wird angenommen, dass das Abgas hauptsächlich aus CO₂ besteht. Neben CO₂ enthält das Abgas CH₄ (0.5% der Produktion) sowie kleinere Volumina an diversen Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelverbindungen.

Die Massenbilanz zeigt auch, dass ca. 14.800 Mg Faulgas pro Jahr produziert werden. Dies entspricht, bei einem Methangehalt von 60% ca. 7.500.000 m³ Methan pro Jahr oder einer spezifischen Methanproduktion von 330 m³ CH₄/Mg oTS.

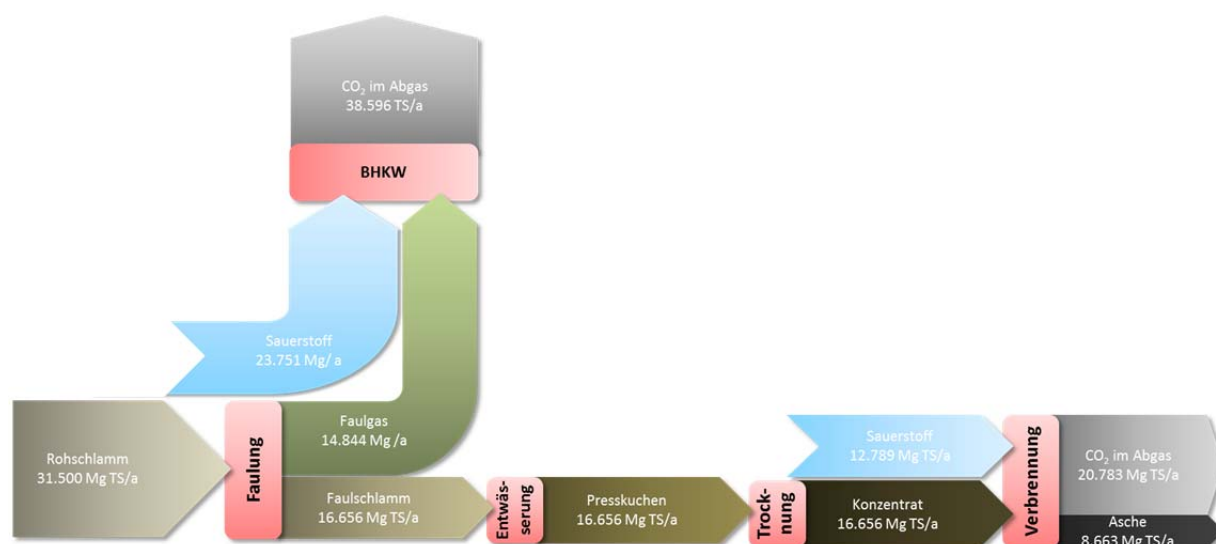


Abb. 13: Stoffstromdiagramm für die Trockensubstanz im Rohschlamm bei der zweistufigen thermischen Verwertung.

7.1.5 Klärschlammtransport

Die Emissionen, die durch den Klärschlammtransport entstehen, ergeben sich aus dem Dieselverbrauch und infolgedessen der Freisetzung von fossilem CO₂. Zur Berechnung der Emissionen wurden die Entfernungen der Verwertungsorte des Klärschlammes bis zur Kläranlage ermittelt. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass ein LKW über eine Nutzlast von 25 t OS verfügt und einen mittleren Dieselmotorkraftstoffverbrauch von 0,32 l/km hat.

Die Emissionen für 2050 haben, aufgrund eines verminderten spezifischen Dieselmotorkraftstoffverbrauchs der LKW von 0,26 l/km, eines geringeren Emissionsfaktors für Diesel und insgesamt reduzierter Schlamm-mengen infolge des Bevölkerungsrückgangs, deutlich nachgelassen (siehe Tab. 22). Die Transportwege wurden dabei für beide Bilanzjahre als identisch angenommen.

Die transportbedingten CO₂-Emissionen für Klärschlamm und Schlacke sind für Variante 2 generell etwa um die Hälfte niedriger als für Variante 1. Dies ist im Wesentlichen auf die geringere Schlamm-menge zurückzuführen.

Tab. 22: CO₂-Emissionen durch den Klärschlammtransport für die Jahre 2012 und 2050

Emissionsquelle		2012	2050 Variante 1	2050 Variante 2
Transportwege	[km]	398.492	368.504	368.504
Klärschlammtransport	[CO ₂ -eq kg/a]	416.043	320.989	157.547

7.1.6 Landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes

Während und nach der Ausbringung des Klärschlammes auf landwirtschaftlich genutzte Flächen entstehen Ausgasungen. Diese bestehen unter anderem aus den klimarelevanten Gasen Lachgas, Ammoniak und Methan und zählen folglich zu den direkten Emissionen.

Die direkten Methanemissionen, die durch die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm entstehen, lassen sich über das Gaspotenzial des ausgebrachten Klärschlammes (50 l/kg oTS, den Methangehalt der Ausgasung (40 Vol.-%) und den Trockenmassegehalt des Klärschlammes (65 Gew.-%) abschätzen. Die Lachgasemissionen werden über die Gesamtmasse an Stickstoff und Ammonium im Klärschlamm ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass sich etwa 0,1% des Stickstoffs in Lachgas umwandelt. Aus dem im Klärschlamm enthaltenen Ammonium werden etwa 13,5% zu Ammoniak umgewandelt, davon wird wiederum 1% zu Lachgas [Vogt, 2008].

Zweck der landwirtschaftlichen Verwertung ist die Nutzung der im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe. Die aus der Düngewirkung des Klärschlammes resultierenden Gutschriften sind in Tab. 23 aufgelistet. Die Faktoren für die Gutschrift ergeben sich aus den Emissionen, die bei der Herstellung der jeweiligen mineralischen Dünger entstehen würden und somit substituiert werden. Kalium und Phosphat sind zu 100% pflanzenverwertbar, daher können die gesamten im Klärschlamm enthaltenen Kalium- und Phosphatmengen als Dünger gutgeschrieben werden. Der Anteil des Stickstoffs, der der Bilanz negativ gutgeschrieben werden kann, beträgt lediglich 60%, da angenommen wird, dass etwa 40% des im Schlamm enthaltenen Stickstoffs ausgasen oder für Pflanzen nicht verwertbar sind.

Tab. 23: Gutschriften für die Bereitstellung von Dünger

Düngerart	Gutschrift [kg CO ₂ -eq/kg Dünger]	Quelle
Kalium	1,19	[Öko-Institut, 2013a]
Stickstoff	7,57	[Öko-Institut, 2013b]
Phosphat	1,24	[Öko-Institut, 2013c]

In Tab. 24 sind die Ergebnisse der Berechnung aufgeführt. Für 2050 ergeben sich keine Emissionen aber Gutschriften. In Niedersachsen wird mittelfristig der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung angestrebt, somit wird für die Bilanzierung angenommen, dass im Jahr 2050 der gesamte Klärschlamm thermisch verwertet wird. Für den in den Klärschlammaschen verbliebenen Phosphor (14 Gew.% P₂O₅) wird angenommen, dass dieser in 2050 zu 25% gewonnen und zur Düngung eingesetzt wird [Naji et al., 2014].

Tab. 24: CO₂-Emissionen durch den Klärschlammtransport für die Jahre 2012 und 2050

Emissionsquelle		2012	2050 Variante 1	2050 Variante 2
Restausgasung	[CO ₂ -eq kg/a]	458.934	-	-
CO ₂ -Nährstoffgutschrift	[CO ₂ -eq kg/a]	- 6.376.811	- 376.000	- 376.000

7.1.7 Thermische Verwertung des Klärschlammes

Durch die thermische Verwertung des Klärschlammes wird Energie bereitgestellt, die negativ als Gutschrift in die CO₂-Bilanz eingeht. Da in der Region Hannover keine Daten von entsprechenden Verbrennungsanlagen vorliegen, wurden Literaturwerte herangezogen.

Im Jahr 2012 wurden in der Region Hannover 3.377 t TS Klärschlamm einer thermischen Behandlung zugeführt. Aus der Verbrennung des Klärschlammes und der Bereitstellung der daraus gewonnen elektrischen Energie werden eine Gutschrift von -1.250.083 kg CO₂-eq/a generiert. Aus der Faulgasnutzung (Ansatz der Wirkungsgrade des BHKW: 40 % elektrisch; 55 % thermisch) ergibt sich eine Gutschrift von -15.700.368 kg CO₂/a

Für das Jahr 2050 wird angenommen, dass die gesamte anfallende Klärschlammmenge thermisch verwertet wird. Die thermische Verwertung des Klärschlammes kann nach Abb. 4 entweder mit Rohschlamm (einstufig) oder mit Faulschlamm (zweistufig) erfolgen. Daher wurden zum Vergleich die beiden folgenden Varianten untersucht und bilanziert:

- **Variante 1** (einstufige bzw. thermische Verwertung von Rohschlamm (**E / Tr-V**)): Entwässerung (E), Trocknung (Tr) und Monoverbrennung (V) sowie die damit verbundene Zwischenlagerung und Transport.
- **Variante 2** (zweistufige Verwertung von Rohschlamm bzw. thermische Verwertung von Faulschlamm (**F-E / Tr-V**)): Anaerobe Schlammstabilisierung (F), Entwässerung (E), Trocknung (Tr) und Monoverbrennung (V) sowie die damit verbundene Zwischenlagerung und Transport

Die wesentlichen Betriebsparameter der einzelnen Verfahrensschritte entsprechend dem Stand der Technik sind in Tab. 25 bzw. Tab. 26 nach (Beckmann, 2010) zusammengefasst.

Tab. 25: Wesentliche Betriebsparameter einzelner Verfahrensschritte bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm nach [Beckmann, 2010]

Verfahrensschritte	Wesentliche Parameter
Anaerob-mesophile Stabilisierung (Faulung)	Faulzeit 20d, Temperatur 35°C, oTR-Abbau = 42 %, Reaktionsmodell: erweiterte Buswell'sche Gleichung: $C_{106} H_{180} O_{46} N_{11} P + 59,5 H_2O \rightarrow 60,75 CH_4 + 35,2 CO_2 + 11 NH_4^+ + 10 HCO_3^- + H_2PO_4$
Faulgasverwertung (Blockheizkraftwerk)	Wirkungsgrade η : $\eta_{\text{elektrisch}} = 32 \%$, $\eta_{\text{gesamt, HT-Abgaswärme}} = 22,5 \%$, $\eta_{\text{therm. NT-Motorabwärme}} = 32,5 \%$
Nacheindickung/ Entwässerung	Entwässerung mit Dekanterzentrifuge, (Faulschlamm auf 28 % TR, Rohschlamm auf 26 % TR), Energiebedarf ca. 2,0 kWh/m ³ , Konditionierung mit organischen Flockungshilfsmitteln (Polyelektrolyte)
Klärschlamm-trocknung	am Standort Kläranlage: Teiltrocknung auf 42 % TR, am Standort Verbrennung: Volltrocknung auf > 90% TR, Energiebedarf: ca. 80 kWh / Tonne Wasserdampf

Fortsetzung Tab. 22: Wesentliche Betriebsparameter einzelner Verfahrensschritte bei thermischer Verwertung von Klärschlamm nach [Beckmann, 2010]

Verfahrensschritte	Wesentliche Parameter
Klärschlammverbrennung	Monoverbrennung in der Wirbelschicht, Verbrennungstemperatur $\geq 870^{\circ}\text{C}$, Luftüberschuss $\lambda = 1,3$; elektrischer Energiebedarf: Verbrennung 14 kWh/MW _{therm} , Abgasreinigung 15 kWh/1000 m ³ _N Abgas
Stromerzeugung (Dampfturbine/Generator)	Wirkungsgrad für Umwandlung von Dampf in elektrische Energie: 30 %

Zur Erstellung der Energiebilanz für 2050 wurden die Parameter aus Tab. 26 mit den vorher getroffenen Annahmen modifiziert.

Tab. 26: Wesentliche Parameter einzelner Verfahrensschritte bei thermischer Verwertung von Klärschlamm nach [Beckmann, 2010], angepasst für das Jahr 2050

Verfahrensschritt	Wesentliche Parameter
Anaerob-mesophile Stabilisierung (Faulung)	Faulzeit 20d, Temperatur 35°C, oTR-Abbau = 65 %, Reaktionsmodell: erweiterte Buswell'sche Gleichung: $\text{C}_{106} \text{H}_{180} \text{O}_{46} \text{N}_{11} \text{P} + 59,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $60,75 \text{CH}_4 + 35,2 \text{CO}_2 + 11 \text{NH}_4^+ + 10 \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4$
Faulgasnutzung (Blockheizkraftwerk)	Wirkungsgrade η : $\eta_{\text{elektrisch}} = 50 \%$, $\eta_{\text{gesamt, HT-Abgaswärme}} = 21 \%$, $\eta_{\text{therm. NT-Motorabwärme}} = 25 \%$
Nacheindickung/ Entwässerung	Entwässerung mit Dekanterzentrifuge, (Faulschlamm auf 28 % TR, Rohschlamm auf 26 % TR), Energiebedarf ca. 2,0 kWh/m ³ , Konditionierung mit organischen Flockungshilfsmitteln (Polyelektrolyte), Abtrennungsgrad (AG) 40% (Feststoffmasse im Presskuchen bzw. Trockengut, bezogen auf die Gesamtfeststoffmasse)
Klärschlamm- Trocknung	Trocknung auf > 90% TR, Energiebedarf: ca. 80 kWh /t Wasserdampf, Abtrennungsgrad (AG) 99,9%
Klärschlamm-Verbrennung	Monoverbrennung in der Wirbelschicht, Verbrennungstemperatur $\geq 870^{\circ}\text{C}$, Luftüberschuss $\lambda = 1,3$; elektrischer Energiebedarf: Verbrennung 14 kWh/MW _{therm} , Abgasreinigung 15 kWh/1000 m ³ _N Abgas
Stromerzeugung (Dampfturbine/Generator)	Wirkungsgrad für Umwandlung von Dampf in elektrische Energie: 50 %

7.1.8 Energiebilanz

Zur Erstellung der Energiebilanz wurden spezifische Energiewerte für eine Verbrennung von Roh- oder Faulschlamm nach [Beckmann, 2010] genommen. Diese sind in Tab. 27 zusammengefasst.

Die Verfahrenskombination aus Faulung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung (Variante 2) ist in Spalte F-E /Tr-V betrachtet. Entsprechend die Entwässerung, Trocknung und Verbrennung (Variante 1) in Spalte E/Tr-V.

Die Trocknung erfolgt jeweils am Ort der Verbrennung, so dass hier die Abwärme aus der Verbrennung zur Trocknung genutzt werden kann.

Tab. 27: Spezifische Energiekennwerte der thermischen Behandlung von Roh- und Faulschlamm (Auszug) nach [Beckmann, 2010]

		nach [Beckmann 2010]		modifiziert für 2050	
[MJ/kg TS]		F-E / Tr-V	E / Tr-V	F-E / Tr-V	E / Tr-V
$e_{el, In}$	Elektroenergie, Eintritt	1,36	1,64	1,088	1,312
$e_{el, Out}$	Elektroenergie, Austritt	3,34	3,01	3,841	3,4615
h_{Z-BS}	Zusatzbrennstoff	0	0,42	0	0
$e_{Nutz-Pe}$	$= (e_{Elt, Out} - e_{Elt, In}) \cdot 3,0 - h_{Z-BS} \cdot 1,1$	5,940	3,648	8,259	6,449

Der nutzbare Energieüberschuss bei Variante 2 mit Faulung ist für das Jahr 2010 mit 5,94 MJ/kg TS rund 63 % höher als die direkte thermische Verbrennung bei Variante 1 mit 3,648 MJ/kg TS.

Dies liegt

- am höheren Aufwand für die Entwässerung von Rohschlamm,
- am geringeren elektrischen Wirkungsgrad der Dampfturbinen bei der Schlammverbrennung verglichen mit einem Gas-BHKW und
- am benötigten Zusatzbrennstoff bei der Verbrennung von Rohschlamm.

Im Jahr 2050 verringert sich diese Differenz auf 34 %. Bei Variante 2 mit Faulung ergibt sich ein Energieüberschuss von 8,259 MJ/kg TS gegenüber 6,449 MJ/kg TS mit direkter Rohschlammverbrennung nach Entwässerung und Trocknung (Variante 1).

Dies ist zurückzuführen

- auf die angenommene Energieeinsparung bei der Entwässerung und Trocknung und
- auf den angenommenen Verzicht auf einen Zusatzbrennstoff.

Insgesamt bestätigt sich für 2050 der Trend, dass mit der Klärschlammfaulung (Variante 2) ein höherer Energieüberschuss erzeugt werden kann als im Vergleich zur direkten Verbrennung von Klärschlamm (Variante 1). Die aufgestellte Energiebilanz berücksichtigt nicht die Energie zur Bereitstellung von Betriebsmitteln.

7.1.9 CO₂-Bilanzierung der Klärschlammverwertung

Im Jahr 2012 wurden 3.377 t TS/a an Klärschlamm der Verbrennung zugeführt. Daraus ergibt sich eine Gutschrift von -1.250.083 kg CO₂-eq/a. Die restlichen 22.683 t TS/a wurden landwirtschaftlich verwerten. Abzüglich der direkten THG-Emissionen und Transport verbleibt dafür eine Gutschrift von -478.371 kg CO₂-eq/a.

Variante 1, Thermische Verwertung von Rohschlamm in 2050

Entsprechend der aufgestellten Massenbilanz (siehe Tab. 20) fallen in der Region Hannover im Jahr 2050 ca. 31.500 Mg TS/a an Rohschlamm an. Die aufgestellte Energiebilanz (siehe Tab. 27) ergibt, dass ca. 5,71 MJ/kg TS (2,46 MJ/kg TS elektrisch und 3,25 MJ/kg TS thermisch) an nutzbarer Energie aus der Klärschlammverbrennung gewonnen werden können. Anhand der spezifischen CO₂-Äquivalente (siehe Tab. 2) entspricht dies einer CO₂-Gutschrift von 0,036 kg CO₂/kg TS bzw. von 1.132.563 kg CO₂-eq/a.

Für Transport von Rohschlamm fallen durch den Dieserverbrauch 321.000 kg CO₂-eq/a an.

Die direkten Emissionen durch Verluste bei Transport und Lagerung von Rohschlamm werden durch geeignete Abdeckungen und Abluftbehandlung vermieden und hier mit 0,5 % Rest-emission zu 2.111 kg CO₂-eq/a abgeschätzt.

Als Düngewertgutschrift für die Rückgewinnung des Phosphors in Form von Phosphat kann eine Gutschrift von - 376.000 kg CO₂-eq/a generiert werden.

Variante 2, Thermische Verwertung von Faulschlamm in 2050

Entsprechend der aufgestellten Massenbilanz (siehe Tab. 21) fallen in der Region Hannover im Jahr 2050 ca. 31.500 Mg TS/a Rohschlamm an. Diese werden durch anaerobe Schlammstabilisierung zu 16.656 Mg TS/a Faulschlamm für die weitere thermische Verwertung reduziert. Aus der Energiebilanz (siehe Tab. 27) ergibt sich ein nutzbares Energiepotential sowohl aus der Faulgasnutzung als auch der Faulschlammverbrennung von ca. 7,65 MJ/kg TS (3,29 MJ/kg TS elektrisch und 4,34 MJ/kg TS thermisch). Anhand der spezifischen CO₂-Äquivalente (siehe Tab. 2) entspricht dies einer CO₂-Gutschrift von 0,046 kg CO₂/kg TS bzw. von - 1.450.545 kg CO₂-eq/a bzw. 961.711 kg CO₂-eq/a + 488.834 kg CO₂-eq/a.

Für den Transport des Faulschlammes können für die Variante 2 ca. 157.600 kg CO₂-eq/a aus dem Dieseltreibstoff für TKW-Transporte angesetzt werden. Bei der Berechnung sind sowohl die reduzierte Klärschlammmenge auf Grund des Bevölkerungsrückgangs um 8 % als auch die effizientere Energienutzung in 2050 berücksichtigt.

Für Variante 2 wird ebenfalls angenommen, dass durch eine geeignete Abdeckung der Aggregate zur Eindickung und Entwässerung sowie der Lager- und Transportbehälter die Verluste im Jahr 2050 gegenüber aktuellen Erfahrungen [Ronchetti et al., 2002; IFEU, 2008] auf 0,5 % reduziert werden können. Für den Methanschlupf über das BHKW werden für 2050 ebenfalls 0,5 % der produzierten Methanmenge angesetzt. Entsprechend der geschätzten Rohschlammmenge beträgt das Gesamtvolumen an produzierten Methan in der Faulung 7.500.000 m³CH₄/a. Somit ergeben sich aus Verlusten, Leckagen sowie dem Methanschlupf am BHKW für die direkte Methanemission ein CO₂-Äquivalent von ca. 1.345.478 kg CO₂-eq/a bzw. 672.739 kg CO₂-eq/a + 672.739 kg CO₂-eq/a.

Als Düngewertgutschrift für die Rückgewinnung des Phosphors in Form von Phosphat kann eine Gutschrift von - 376.000 kg CO₂-eq/a generiert.

7.1.10 Zusammenfassender Variantenvergleich

In Tab. 28 sind die für das Jahr 2012 errechneten CO₂-Äquivalente der aktuellen in der Regel landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung (Spalte 2) den beiden Behandlungsvarianten der thermischen Klärschlammverwertung für 2050 (Spalte 5 und 6) gegenübergestellt. Zusätzlich sind für das Jahr 2012 (Spalte 3 und 4) die CO₂-Äquivalente berechnet, die sich ergeben, wenn man den in der gesamten Region anfallenden Rohschlamm nach den Varianten 1 und 2 für das Jahr 2050 verwerten würde.

Tab. 28: Gegenüberstellung der CO₂-Äquivalente für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in 2012 und den Varianten der thermischen Klärschlammverwertung mit und ohne Faulung bzw. von Rohschlamm in 2012 und 2050

Verwertung	landwirtschaftl.	thermisch			
Jahr	2012	2012		2050	
	Status quo	Variante 1 (E/Tr-V)	Variante 2 (F-E/Tr-V)	Variante 1 (E/Tr-V)	Variante 2 (F-E/Tr-V)
Einheit	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]	[kg CO ₂ -eq/a]
Energie	-16.448.361	-16.828.770	-21.553.665	-1.132.563	-1.450.545
Transport	415.232	847.369	416.043	320.989	157.547
Emissionen	1.465.672	2.295	931.485	2.111	1.345.478
Düngewert	-6.348.615	-406.080	-406.080	-376.000	-376.000
Saldo	-20.916.072	-16.385.186	-20.612.217	-1.185.463	-323.520

Die Zusammenfassung in Tab. 28 allein für die Klärschlammverwertung zeigt, dass für das Jahr 2050 Variante 2 mit Klärschlammfaulung ein insgesamt schlechteres CO₂-Saldo aufweist als Variante 1 mit direkter Rohschlammverbrennung. Für das Jahr 2012 verhält es sich umgekehrt, die Variante mit der Klärschlammfaulung erreicht insgesamt eine deutlich höhere CO₂-Gutschrift.

Die CO₂-Gutschriften für die bereitgestellte Energie, sind sowohl für das Jahr 2012 als auch für 2050 bei der Variante 2 mit Klärschlammfaulung höher. Dies ist auf die energetische Bewertung des Methans zurückzuführen. Durch den Einsatz der Klärschlammfaulung kann mehr nutzbare Energie bereitgestellt werden. Gegenüber 2012 ist aber die CO₂-Gutschrift in 2050 wesentlich schlechter, da hier der verbesserte Strommix, mit überwiegend regenerativer Energiegewinnung, für 2050 zugrunde liegt.

Die transportbedingten CO₂-Emissionen für Klärschlamm und Schlacke sind für Variante 2 generell etwa um die Hälfte niedriger als für Variante 1. Dies ist im Wesentlichen auf die geringere Schlammmenge zurückzuführen. Die Unterschiede von 2050 gegenüber 2012 erge-

ben sich auf Grund der geringeren Bevölkerungszahl bzw. Klärschlammmenge, effizienterer Transportfahrzeuge und einer besseren Bewertung des Dieselmotors im Jahr 2050.

Maßgeblichen Einfluss auf die gesamte CO₂-Bilanz haben die direkten Emissionen. Für beide Varianten wurde angenommen, dass eine geeignete Abdeckung und Abgasbehandlung für die Entwässerung und Trocknungsaggregate installiert ist. In Variante 2 schlägt jedoch der mit 0,5 % angenommene Methanschlupf der Faulgasnutzung zu Buche. Dies trifft insbesondere für das Jahr 2050 zu, da hier verglichen mit 2012 der Abbaugrad in der Klärschlammfäulung und somit die produzierte Methanmenge höher ist.

Der Düngewertgutschrift für die landwirtschaftliche Ausbringung des Klärschlammes im Jahr 2012 für Stickstoff und Phosphat wurden die in der Klärschlammmasche verbleibenden Phosphatanteile gegenüber gestellt. Durch die Verbrennung in der Variante 1 und 2 ist der Stickstoff landwirtschaftlich nicht mehr nutzbar. Es wird angenommen, dass im Jahr 2050 das zu etwa 14 Gew.-% in der Klärschlammmasche enthaltene Phosphat zu 25 % wiedergewonnen werden kann, woraus sich eine Gutschrift von -376.000 CO₂-eq kg/a ergibt [Naji et al., 2014]. Da durch die Fäulung (Variante 2) sich die Gesamtmenge an Phosphor nicht verändert, ist hier die Gutschrift für Variante 1 und 2 gleich hoch.

Nach der aufgestellten CO₂-Bilanz für das Jahr 2050 ist die einstufige Verwertung von Klärschlamm der zweistufigen Verwertung in der Region Hannover vorzuziehen, vorausgesetzt der Strommix wird mindestens zu 90% aus regenerativen Energiequellen bereitgestellt.

Ist der Anteil der regenerativen Energiequellen an der Stromerzeugung kleiner als 90%, ist die zweistufige Verwertung, mit Klärschlammfäulung, hinsichtlich der CO₂-Bilanz vorteilhafter. Aus der Praxis ist bekannt, dass Roh- und Faulschlamm hinsichtlich ihrer Entwässerbarkeit und der Rückbelastung mit Ammonium unterschiedlich zu bewerten sind [DWA-M366, 2013; UBA, 2013], was nicht direkt in Emissionen umzurechnen ist.

Des Weiteren ist Methan eine wertvollere Energiequelle als die rein thermische Abwärme aus der Verbrennung, da sie stofflich genutzt und gespeichert werden kann. Aus diesem Grund sollte die Klärschlammfäulung nicht grundsätzlich für 2050 ausgeschlossen werden, sondern eher Lösungen zur Vermeidung des Methanschlupfs bei der Faulgasnutzung gefunden werden. Bei einer Reduktion der direkten Methanemissionen von derzeit 1% auf 0,35% wären die Varianten 1 und 2, mit den vorgegebenen CO₂-Emissionsfaktoren (siehe Tab. 29) hinsichtlich der CO₂-Emissionen für das Jahr 2050 ausgeglichen.

Tab. 29: Gegenüberstellung der CO₂-Äquivalente der Energietransformation bei der thermischen Klärschlammverwertung in 2012 (Status Quo) und 2050 (Prognose)

Thermische Verwertung	2012	2050 Variante 1	2050 Variante 2
Klärschlammengen [t TS/a]	3.377	31.500	16.656
Thermische Verwertung [CO ₂ -eq kg/a]	-1.250.083	-1.132.563	-488.833
Faulgasnutzung [CO ₂ -eq kg/a]	-15.198.278	0	-288.972
Summe [CO₂-eq kg/a]	-16.448.361	-1.132.563	-777.805

7.1.11 Energiegutschriften für Wärmetauscher und Faulgasnutzung

Die Energiegutschriften stammen aus der bereitgestellten thermischen und elektrischen Energie. Beide Energieformen werden durch die Verbrennung von Faulgas im BHKW gewonnen. Die Menge dieser Energie für 2012 stammt aus der Datenerhebung.

Für 2050 wird prognostiziert, dass der gesamte anfallende Klärschlamm der Region Hannover zur Faulgasgewinnung verwendet wird. Das Klärgasvolumen wird mittels eines Klärgaspotenzials von 28,8 l/(EW·d) berechnet. Über den Heizwert von 6 kWh/m³ für das Biogas und den Wirkungsgraden des BHKW von 50 % elektrisch und 65 % thermisch wird die bereitgestellte Energie ermittelt.

Zudem wird 2050 vor jeder Kläranlage ein Wärmetauscher im Kanalnetz installiert, damit die Abwärme des Abwassers genutzt werden kann. Die produzierte Energie wird mithilfe der in Tab. 30 aufgeführten Werte berechnet, wobei V das Jahresabwasservolumen darstellt.

Tab. 30: Parameter zur Berechnung des thermischen Energiepotenzials durch den Einsatz von Wärmetauschern

Wärmetauscher (WT) im Kanalnetz	Abkürzung	Einheit	Annahme 2050
Wärmegewinn WT	c	kWh/(m ³ ·K)	1,16
Minderung durch Biofilm an WT	κ	%	80
Abkühlung Kanal	ΔT	K	2
Potenzial der therm. Energie		GWh	$W_{\text{Wärmetauscher}} = c \cdot \kappa \cdot V \cdot \Delta T$

Die Gutschriften für die gewonnene Energie sind in Tab. 31 aufgelistet. Da 2012 noch keine Wärmetauscher im Kanalnetz vorhanden sind, existieren keine Gutschriften. Die Gutschriften der Faulgasnutzung sinken, obwohl die Klärgasmenge und somit die nutzbare Energie gestiegen ist. Diese Senkung der Emissionen resultiert aus der Senkung der Emissionsfaktoren von Energie für 2050.

Tab. 31: CO₂-Gutschriften durch die Faulgasnutzung und Wärmetauscher für die Jahre 2012 und 2050

Maßnahme	2012	2050
Wärmetauscher [CO ₂ -eq kg/a]	-	-2.888.134
Faulgasnutzung (BHKW) [CO ₂ -eq kg/a]	-10.418.860	-2.513.842

7.1.12 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch erzeugt indirekte Emissionen. Diese Emissionen entstehen durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern zur Gewinnung von nutzbarer thermischer und elektrischer Energie, beispielsweise das Verbrennen von Heizöl zur Bereitstellung von thermischer Energie oder die Verbrennung von Kohle in Kohlekraftwerke zur Stromerzeugung.

In der Tab. 32 sind die jeweiligen Energieverbräuche für beide Bilanzjahre angegeben. Für das Jahr 2012 sind auf Basis der Datenerhebung die hochgerechneten Energieverbräuche der Stadt und Region Hannover angegeben. Die Berechnung der verbrauchten Energie für das Jahr 2050 wird auf Basis der Daten von 2012 ermittelt. Es wird eine Minderung des Stromverbrauchs um 20% infolge energieeffizienterer Technik in den Kläranlagen angenommen. Zudem fällt der vorgegebene Emissionsfaktor für eine Kilowattstunde elektrischen Stroms im Jahr 2050 wesentlich geringer aus. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass durch die anaerobe Schlammbehandlung sowie durch die eingesetzten Wärmetauscher im Kanalnetz auf den Einsatz von Heizöl und Erdgas zur Wärmeherzeugung auf dem Kläranlagengelände im Jahr 2050 verzichtet werden kann.

Tab. 32: CO₂-Emissionen durch den Verbrauch von Energie für die Jahre 2012 und 2050

Energieverbrauch		2012	2050
Stromverbrauch	[kWh]	43.693.074	32.351.222
Heizölverbrauch	[l]	33.000	-
Erdgasverbrauch	[m³]	138.663	-
Energieverbrauch	[CO ₂ -eq kg/a]	33.564.600	626.171

7.1.13 Detailübersicht der CO₂-Bilanzierung Abwasserbehandlung

Bilanzjahr 2012

CO₂-Bilanz für das Jahr 2012 (Ist-Zustand)			
Kläranlage			
Energieverbrauch	33.152.584	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	103.490	kg CO ₂ /a	Heizölverbrauch
	308.526	kg CO ₂ /a	Erdgasverbrauch
<i>Summe Energieverbrauch</i>			<i>33.564.600 kg CO₂/a</i>
Treibhausgasemissionen	4.396.768	kg CO ₂ /a	CO ₂ -Emissionen (fossil)
	7.447.729	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Emissionen
	11.240.372	kg CO ₂ /a	N ₂ O-Emissionen
<i>Summe Treibhausgasemissionen</i>			<i>23.084.869 kg CO₂/a</i>
Zusatzmitteleinsatz	7.182.212	kg CO ₂ /a	Zusatzmittelverbrauch
<i>Summe Zusatzmitteleinsatz</i>			<i>7.182.212 kg CO₂/a</i>
Summe Kläranlage			63.831.681 kg CO₂/a
Faulgasnutzung¹			
BHKW	-16.202.459	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	0	kg CO ₂ /a	Wärmeerzeugung
<i>Summe Energieerzeugung</i>			<i>-16.202.459 kg CO₂/a</i>
Treibhausgasemissionen	502.091	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Schlupf
<i>Summe Treibhausgasemissionen</i>			<i>502.091 kg CO₂/a</i>
Summe Faulgasnutzung			-15.700.368 kg CO₂/a
Klärschlamm Entsorgung			
Transportemissionen	416.043	kg CO ₂ /a	Dieserverbrauch
<i>Summe Transportemissionen</i>			<i>416.043 kg CO₂/a</i>
Emissionen durch Lagerung	502.091	kg CO ₂ /a	Restausgasung
<i>Summe Lagerungsemissionen</i>			<i>502.091 kg CO₂/a</i>
Treibhausgasemissionen durch	7.966	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Restentgasung
landw. Verwertung	453.523	kg CO ₂ /a	N ₂ O-Restentgasung
<i>Summe Treibhausgasemissionen</i>			<i>461.490 kg CO₂/a</i>
Nährstoffverwertung	-6.376.811	kg CO ₂ /a	Düngewert-Gutschrift
<i>Summe Nährstoffverwertung</i>			<i>-6.376.811 kg CO₂/a</i>
thermische Verwertung	-498.041	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	-752.042		Wärmeerzeugung
<i>Summe therm. Verwertung</i>			<i>-1.250.083 kg CO₂/a</i>
Summe Klärschlamm Entsorgung			-6.247.271 kg CO₂/a
GESAMTSUMME			41.884.042 kg CO₂/a
			41.884 t CO₂/a

Zusatzmittel \cong Hilfs- und Betriebsstoffe

Bilanzjahr 2050 (Variante 1)

CO ₂ -Bilanz für das Jahr 2050 (Variante 1)			
Kläranlage			
Energieverbrauch	626.171	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	-	kg CO ₂ /a	Heizölverbrauch
	-	kg CO ₂ /a	Erdgasverbrauch
Summe Energieverbrauch			626.171 kg CO₂/a
Treibhausgasemissionen	4.045.026	kg CO ₂ /a	CO ₂ -Emissionen (fossil)
	6.851.911	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Emissionen
	10.341.142	kg CO ₂ /a	N ₂ O-Emissionen
Summe Treibhausgasemissionen			21.238.079 kg CO₂/a
Zusatzmitteleinsatz	6.273.899	kg CO ₂ /a	Zusatzmittelverbrauch
Summe Zusatzmitteleinsatz			6.273.899 kg CO₂/a
Summe Kläranlage			28.138.149 kg CO₂/a
Faulgasnutzung			
BHKW	-	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	-	kg CO ₂ /a	Wärmeerzeugung
Summe Energieerzeugung			0 kg CO₂/a
Treibhausgasemissionen	-	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Schlupf
Summe Treibhausgasemissionen			0 kg CO₂/a
Summe Faulgasnutzung			0 kg CO₂/a
Klärschlamm Entsorgung			
Transportemissionen	320.989	kg CO ₂ /a	Dieserverbrauch
Summe Transportemissionen			320.989 kg CO₂/a
Emissionen durch Lagerung	2.111	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Restentgasung
		kg CO ₂ /a	N ₂ O-Restentgasung
Summe Lagerungsemissionen			2.111 kg CO₂/a
Nährstoffverwertung	-376.000	kg CO ₂ /a	Düngewert-Gutschrift
Summe Nährstoffverwertung			-376.000 kg CO₂/a
thermische Verwertung	-452.026	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	-680.537		Wärmeerzeugung
Summe therm. Verwertung			-1.132.563 kg CO₂/a
Summe Klärschlamm Entsorgung			-1.185.463 kg CO₂/a
Wärmetauscher im Kanalnetz			
Energiebereitstellung	-2.888.134	kg CO ₂ /a	
Summe Wärmetauscher			-2.888.134 kg CO₂/a
GESAMTSUMME	24.064.552	kg CO ₂ /a	
	24.065	Mg CO ₂ /a	

Zusatzmittel ≙ Hilfs- und Betriebsstoffe

Bilanzjahr 2050 (Variante 2)

CO ₂ -Bilanz für das Jahr 2050 (Variante 2)			
Kläranlage			
Energieverbrauch	626.171	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	-	kg CO ₂ /a	Heizölverbrauch
	-	kg CO ₂ /a	Erdgasverbrauch
Summe Energieverbrauch			626.171 kg CO₂/a
Treibhausgasemissionen	4.045.026	kg CO ₂ /a	CO ₂ -Emissionen (fossil)
	6.851.911	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Emissionen
	10.341.142	kg CO ₂ /a	N ₂ O-Emissionen
Summe Treibhausgasemissionen			21.238.079 kg CO₂/a
Zusatzmitteleinsatz	6.273.899	kg CO ₂ /a	Zusatzmittelverbrauch
Summe Zusatzmitteleinsatz			6.273.899 kg CO₂/a
Summe Kläranlage			28.138.149 kg CO₂/a
Faulgasnutzung			
BHKW	-383.835	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	-577.876	kg CO ₂ /a	Wärmeerzeugung
Summe Energieerzeugung			-961.711 kg CO₂/a
Treibhausgasemissionen	672.739	kg CO ₂ /a	CH ₄ -Schlupf
Summe Treibhausgasemissionen			672.739 kg CO₂/a
Summe Faulgasnutzung			-288.972 kg CO₂/a
Klärschlamm Entsorgung			
Transportemissionen	157.547	kg CO ₂ /a	Dieserverbrauch
Summe Transportemissionen			157.547 kg CO₂/a
Emissionen durch Lagerung	672.739	kg CO ₂ /a	CH ₄ und N ₂ O Restentgasung
Summe Lagerungsemissionen			672.739 kg CO₂/a
Nährstoffverwertung	-376.000	kg CO ₂ /a	Düngewert-Gutschrift
Summe Nährstoffverwertung			-376.000 kg CO₂/a
thermische Verwertung	-195.102	kg CO ₂ /a	Stromerzeugung
	-293.732		Wärmeerzeugung
Summe therm. Verwertung			-488.834 kg CO₂/a
Summe Klärschlamm Entsorgung			-34.548 kg CO₂/a
Wärmetauscher im Kanalnetz			
Energiebereitstellung	-2.888.134	kg CO ₂ /a	
Summe Wärmetauscher			-2.888.134 kg CO₂/a
GESAMTSUMME	24.926.495	kg CO ₂ /a	
	24.926	Mg CO ₂ /a	

Zusatzmittel \cong Hilfs- und Betriebsstoffe

7.2 Abfallbehandlung

7.2.1 Abfallmengenströme und Massenbilanz

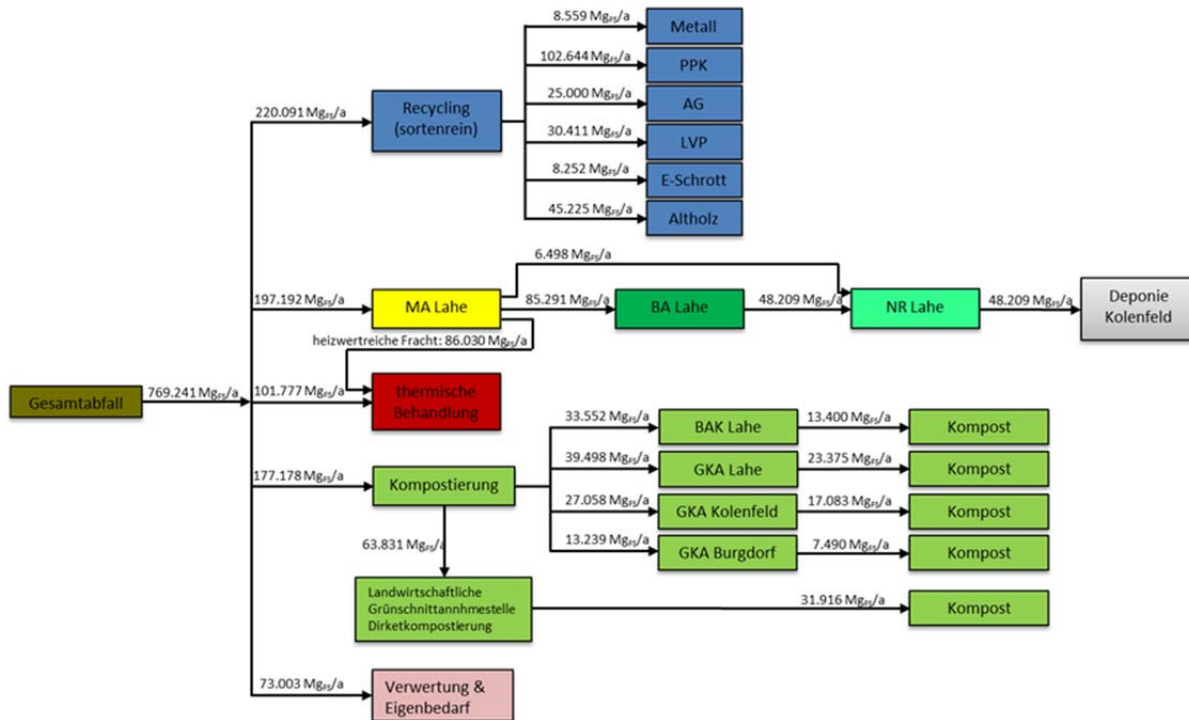


Abb. 14: Fließbild der Abfallströme für das Bilanzjahr 2012

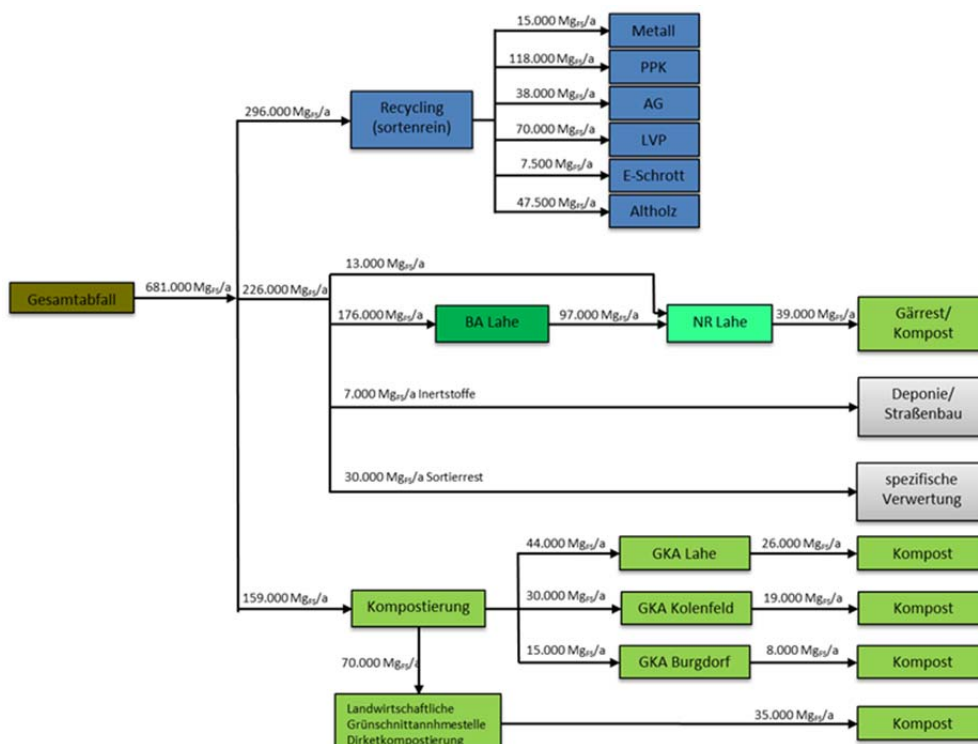


Abb. 15: Fließbild der Abfallströme für das Jahr 2050

Tab. 33: Vergleich der Abfallbehandlungsströme in den Jahren 2012 und 2050

Bilanzjahr	2012		2050	
Massenströme	[Mg _{FS} /a]	[Gew %]	[Mg _{FS} /a]	[Gew %]
Gesamtabfall	769.241	100	681.000	100
Recycling	220.091	29	296.000	43
MBA/ Vorsortierung	197.192	26	226.000	33
BA	85.291	11	176.000	26
thermische Behandlung	101.777	13	-	-
Kompostierung	177.178	23	159.000	23
Vwertung & Eigenbedarf	73.003	9	-	-
Deponierung	48.209	6	7.000-37.000	1 - 5

7.2.2 Berechnung des Kohlenstoffinventars – regenerativer und fossiler Anteil

Die verschiedenen Abfallarten, wie Hausmüll, Gewerbemüll, Sperrmüll, etc., unterscheiden sich in ihren Kohlenstoffgehalten. Da für das Jahr 2012 keine Analysenwerte vorliegen, wurden die in der Tab. 34 vorliegenden durchschnittlichen Kohlenstoffgehalte für die Berechnung herangezogen.

Tab. 34: Kohlenstoffgehalte verschiedener Abfälle [Hoffmann & Doedens, 1993]

Abfallart	Kohlenstoffgehalt des Feuchtabfalls [kg TC/Mg _{FS}]
Hausmüll (HM)	180
Sperrmüll (SM)	255
Haus- und Sperrmüll-Gemisch	200
hmä. Gewerbeabfälle	270
Marktabfälle	120
Gartenabfälle (GA)	120
Straßenkehrsicht	105
Industrie-, Gewerbeabfälle	145
Bauabfälle (BA)	50
Industrie-, Gewerbe- und Bauabfälle	107
Schlamm/Klärschlamm (KS)	80
Kunststoffe (gemittelt)	420
Papier	380
Holz	350

Neben der Angabe des Kohlenstoffgehalts ist, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, vor allem die Kenntnis des Anteils an regenerativem und fossilen Kohlenstoffs für die Berechnung der CO₂-Bilanz wichtig. Auch diesbezüglich wurden Literaturangaben herangezogen, die in Tab. 35 angegeben sind.

Tab. 35: Fossile und regenerative C-Anteile verschiedener Abfälle [Dehoust, 2005]

Parameter	Einheit	Haushaltsabfall	HMG (hmä. GA)	SBS (Sekundärbrennstoff)
Wassergehalt	[Gew.-%]	33	23	25
Heizwert (H _u)	[MJ/kg _{FS}]	9	18	18
C regenerativ	[g/kg _{FS}]	146	100	123
C fossil	[g/kg _{FS}]	78	150	228
C gesamt	[g/kg _{FS}]	224	250	351

Der regenerative C-Anteil von Grünschnitt, Bioabfall und Holzschnitt wurde zu 100 % angenommen. Da sich die Zusammensetzung des MBA-Inputs im Jahr 2012 aus Hausmüll, haushälterischen Gewerbeabfall und Sperrmüll zusammensetzt, wurde für die einzelnen Anlagenteile der MBA der fossile sowie regenerative Anteil separat berechnet. In den folgenden Tabellen und Abbildungen zeigt sich dieser Zusammenhang.

Tab. 36: Abfallzusammensetzung und Kohlenstoffgehalte des MBA-Inputs für das Jahr 2012

Jahr 2012	Abfallmenge		TC	TC	TC	TC	TC
	[Mg _{FS}]	[Gew.-%]	[kg/Mg _{FS}]	regenerativ [% von Mg _{FS}]	fossil [% von Mg _{FS}]	regenerativ [kg/Mg _{FS}]	fossil [kg/Mg _{FS}]
HM	140.411	71,2	180,0	65	35	83,3	44,9
hmäGA+SM	56.781	28,2	262,5*	40	60	30,2	45,4
HM-Gemisch	197.192	100	207,8	55,7	44,3	113,5	90,2

* Mittel aus hmäGA (270 kg TC/Mg_{FS}) und Sperrmüll (255 kg TC/Mg_{FS})

Tab. 37: Kohlenstoffgehalte der Abfallteilströme der MBA im Jahr 2012

Jahr 2012	[kg TC/Mg Abfall _{FS}]	[Mg Abfall _{FS}]	[kg TC]
MA-Input	203,8	197.192	40.178.993
hwr-Fraktion	300,0*	86.030	25.809.000
BA-Input	168,5	85.291	14.369.993
BA-Output zur Deponie Kolenfeld	119,5	48.209	5.762.893

* Abschätzung der Autoren anhand von Literaturdaten

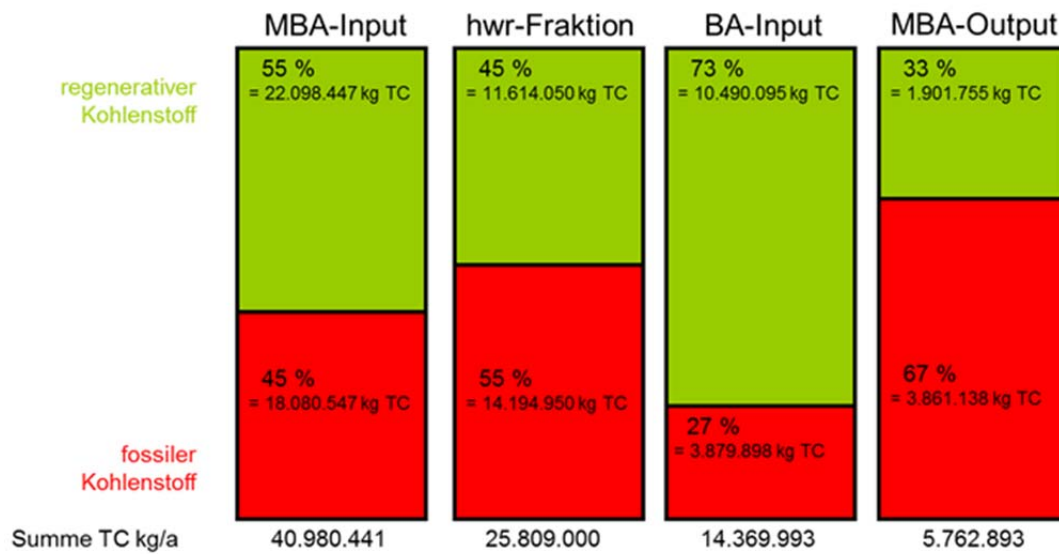


Abb. 16: Veränderung der regenerativen und fossilen Anteile in den einzelnen Anlagen-
teilen der MBA (Abbildung nicht maßstabsgetreu)

7.2.3 Deponiegasemissionen

Durch die Ablagerung von Abfällen entstehen Deponiegasemissionen. Sie sind abhängig von der Menge des abgelagerten Abfalls und dem Zeitpunkt der Ablagerung. So können auch Altablagerungen noch Jahre später erhebliche Mengen an Methan ausgasen. Die Berechnung der Methanausgasung aus unbehandeltem Abfall erfolgt nach dem Ansatz von Butz [Butz, 2006]:

$$Me [Mg/a] = M \times DOC \times D \times C \times DOC_f \times F \quad (Gl. 4)$$

Mit:

- Me = Methanemission [Mg/a];
- M = Abfallmenge [Mg_{FS} Abfall/a];
- DOC = Anteil biologisch abbaubaren Kohlenstoffs im Abfall [MgC/Mg_{FS} Abfall];
- D = Anteil des nicht gefassten und nicht biologisch oxidierten Methans (40 % durch aktive Entgasung);
- C = Methankonzentration im Deponiegas (siehe Tab. 38);
- DOC_f = Anteil des unter Deponiebedingungen zu Deponiegas umgewandelten Kohlenstoffs;
- F = Faktor zur Umrechnung des umgesetzten Kohlenstoffs zu Methan (hier 1,33).

Analog zu Gl. 4 wurde die korrespondierende CO_2 -Emission im Deponiegas mit einem Faktor von 3,66 (Umwandlung C in CO_2) berechnet.

Seit dem 01.06. 2005 darf auf Grund der Umsetzung der Technischen Anleitung Siedlungsabfallwirtschaft (TASi) bzw. der Abfallablagerungsverordnung AbfAbIV kein unbehandelter Siedlungsabfall mehr deponiert werden, weshalb zum Teil unterschiedliche Faktoren gewählt wurden (siehe Tab. 38).

Tab. 38: Parameter zur Berechnung der Deponiegasemissionen

Parameter	Lahe bis 2005 / nach 2005 unbehandelter Siedlungsabfall	Kolenfeld bis 2005 unbehandelter Siedlungsabfall	Kolenfeld 2012 / 2050 MBA-Material
DOC [MgC/Mg_{Abfall}]	0,232 / 0,05	0,219	Berechnung mit GB_{21} von 20 m^3_N/kg_{TS} , WG 40 Gew.-%, Methangehalt 35 Vol.-%
DOC_f (-)	0,56 / 0,4	0,57	
C (-)	0,42	0,49 / 0,43	
D (-)	0,4	0,4	

Durch die Maßnahme der vollständigen Oberflächenabdichtung der Deponien in der Region Hannover bis 2050, wird die CO_2 -Bilanz im Jahr 2050 nicht mehr durch Deponieausgasungen belastet. Allerdings wurden Restausgasungen des Gärrestes mit den Daten aus Kolenfeld 2050 berechnet.

7.2.4 Kompostierung

Die Kompostierung von Grün- und Bioabfällen ist ein aerober Abbauprozess, bei dem die organischen Bestandteile zum großen Teil in Wasser und Kohlenstoffdioxid umgesetzt werden. Dieser Kohlenstoffdioxid, da er aus biogenem Material stammt, wird allerdings als klimaneutral eingestuft, da die Pflanzen das freigesetzte Kohlenstoffdioxid zuvor aus der Atmosphäre aufgenommen und in Biomasse umgewandelt haben.

Allerdings entstehen bei der Kompostierung schlecht belüftete anaerobe Zonen im Mietkörper, weshalb Methan (CH_4) gebildet wird und emittiert. Auch beim Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen entsteht zum Beispiel bei einer unvollständigen Denitrifikation und während der Oxidation von Nitrit (N_2O) zu Nitrat (N_3O) Lachgas (N_2O), welches ebenfalls in die Atmosphäre emittiert und klimarelevant ist.

Für das Jahr 2012 wurde aufgrund fehlender Messdaten ein spezifischer CO_2 -Äquivalenzfaktor von 80 kg/ Mg-Inputmaterial, nach einer Studie der Bundesgütergemeinschaft Kompost e.V. aus dem Jahre 2010 (BGK, 2010), angenommen. Für das Jahr 2050 wurde hingegen nur ein spezifischer CO_2 -Äquivalenzfaktor von 1 kg/ Mg-Inputmaterial abgeschätzt, da angenommen wird, dass entsprechende Maßnahmen in der Rotteführung oder Abdeckung/ Einhausung der Rotte Körper die Emissionen in 2050 weitestgehend minimieren.

In der Tab. 39 sind die durch die Kompostierung entstehenden CO_2 -Emissionen der beiden Bilanzjahre aufgeführt.

Tab. 39: CO_2 -Emissionen durch Kompostierung für die Bilanzjahre 2012 und 2050

Kompostierung	2012	2050
THG-Emissionen [CO_2 -eq kg/a]	9.067.760	184.879
Stromverbrauch [CO_2 -eq kg/a]	1.529.812	17.209
Gesamt [CO_2 -eq kg/a]	10.597.572	202.088

7.2.5 Recycling

Durch die rohstoffliche Wiederverwendung des Recyclingmaterials LVP, Altpapier, Altglas, Metall und Elektroschrott lassen sich Primärressourcen und damit CO₂-Emissionen einsparen und kann als Gutschrift in die CO₂-Bilanz angerechnet werden. In der Tab. 40 sind die stoffspezifischen Einsparpotenziale aufgeführt.

Tab. 40: CO₂-Einsparung durch Recycling für das Jahr 2012 [Alba Group, 2011]

Recycling von	CO ₂ -Einsparung [kg CO ₂ /Mg]
Leichtverpackungen (LVP)	0,663
Altpapier	0,419
Altglas	0,169
Metall	1,608
E-Schrott	1,018

Aufgrund dessen, dass die Veränderungen der spezifischen CO₂-Faktoren im Jahr 2050 nicht vorhersehbar sind, aber einer erheblichen Veränderung unterliegen, wurden die Faktoren analog der Entwicklung der CO₂-Faktoren für Strom angepasst bzw. die spezifischen Faktoren für das Jahr 2050 wurden durch den Faktor 17 dividiert.

Zudem wird für das Jahr 2050 eine „Zero-Waste“ Gesellschaft angenommen. Deshalb wird der MBA-Input des Jahres 2050, neben der Minderung um 8 % durch den Bevölkerungsrückgang, in die Fraktionen der Abb. 17 mit den angegebenen prozentualen Anteilen aufgeteilt.

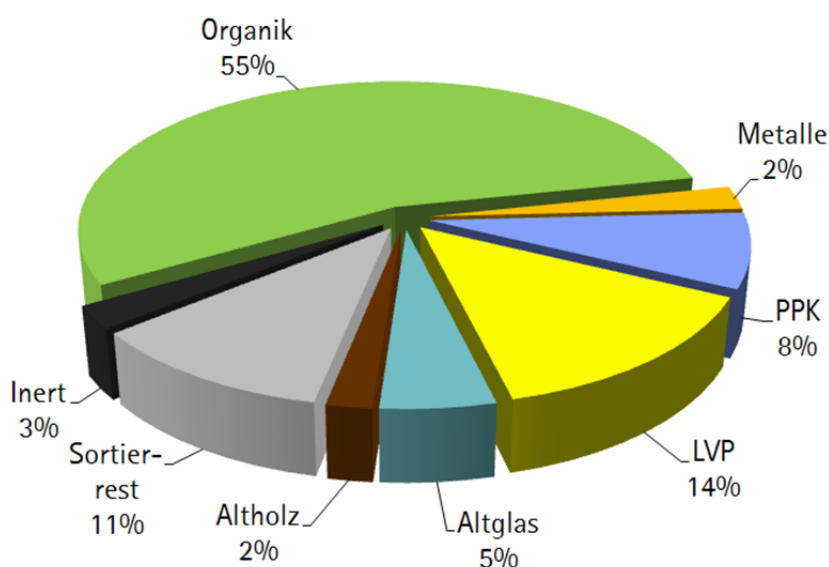


Abb. 17: angenommene Aufteilung bzw. Sortierung des Restabfalls für das Jahr 2050

Die Fraktionen Metalle, PPK, LVP und Altglas werden dem sortenreinen Recycling zugeschrieben und dazu addiert. Daraus ergeben sich für die Bilanzjahre 2012 und 2050 die in der Tab. 41 zusammengefassten Recyclingmengen und Gutschriften.

Tab. 41: Recycelte Mengen der Jahre 2012 und 2050 und korrespondierende CO₂-Einsparungen

Bilanzjahr	2012		2050	
Massenströme	Masse [Mg _{FS} /a]	Gutschrift [t CO ₂ /a]	Masse [Mg _{FS} /a]	Gutschrift [t CO ₂ /a]
LVP	30.411	-20.162	69.834	-2.724
Altpapier	102.644	-43.008	118.350	-2.917
Altglas	25.000	-4.225	37.948	-377
Metall	8.559	-13.763	15.349	-1.452
E-Schrott	8.252	-8.401	7.592	-455
Summe	174.866	-89.559	249.073	-7.924

7.2.6 Thermische Abfallbehandlung

Die thermische Abfallbehandlung aus der Region Hannover findet an drei Standorten statt, Lahe, Hameln und Buschhaus. Zur CO₂-Bilanzierung der thermischen Abfallbehandlung (Abfallverbrennung) wird die Bilanzgrenze außerhalb der Gesamtanlage derart gezogen (siehe Abb. 18), dass der Stromeigenbedarf, gedeckt durch eigene Stromproduktion, unberücksichtigt bleibt.

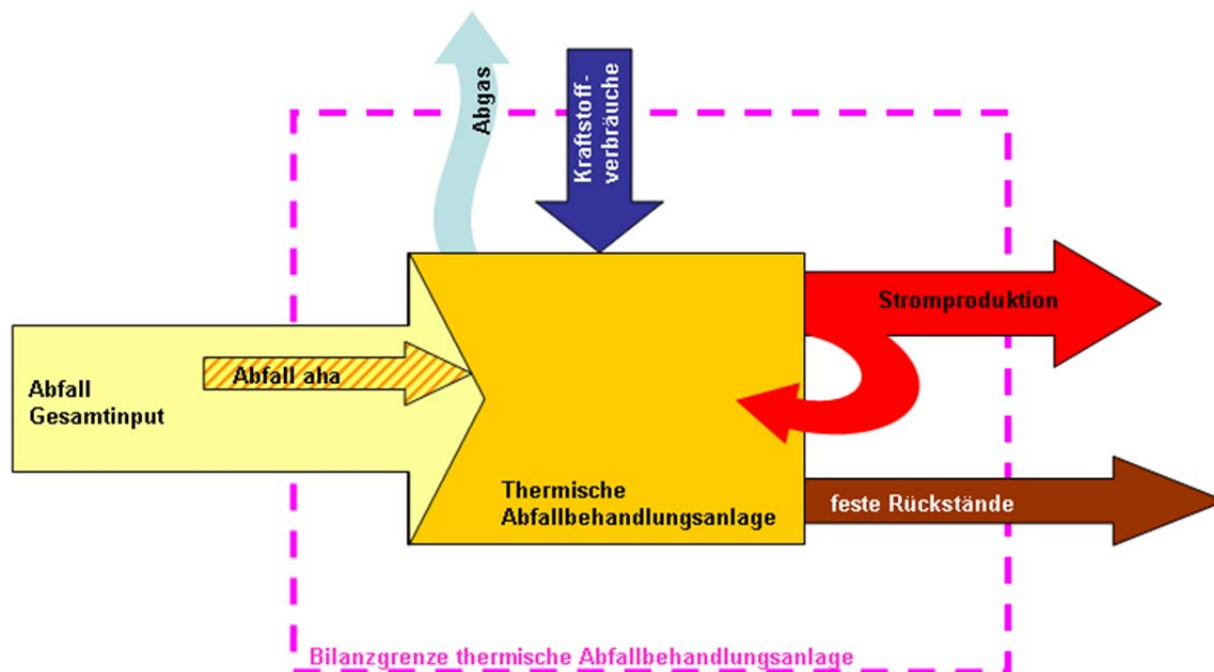


Abb. 18: Bilanzierungsgrenze bei Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung

Die Berechnung des Anteils aus den Abfällen des Zweckverbands in einer der drei MVA ergibt sich aus dem Verhältnis der Heizwerte und der Abfallmassen, der von der aha angeliefert wird, mit dem Heizwert und den Abfallmassen der gesamten Anlage. In Tab. 42 sind die wesentlichen Daten, die sich aus der thermischen Behandlung des Abfalls aus der Region Hannover im Jahr 2012 ergeben, zusammengefasst.

Tab. 42: CO₂-Bilanz der Abfallverbrennung der Region Hannover im Jahr 2012

Abfallverbrennung		
Input Verbrennung		-113,391,814 kg CO ₂ /a
Stromverbrauch		17,114,232 kg CO ₂ /a
Ölverbrauch		1,581,544 kg CO ₂ /a
Abgasausstoß		204,717,650 kg CO ₂ /a
Stromerzeugung		-126,949,786 kg CO ₂ /a
Erdgas		212 kg CO ₂ /a
Wärmeerzeugung		-3,258,320 kg CO ₂ /a
Summe Abfallverbrennung		-20,186,282 kg CO₂/a

Für das Jahr 2050 wird angenommen (s. Kap. 4.2.2), dass die Abfälle aus der Region Hannover vollständig stofflich verwertet werden und die thermische Behandlung entfällt.

7.2.7 Fuhrpark

Zur Erfassung des CO₂-Ausstoßes des Fuhrparks (Straßenreinigung, Müllabfuhr, Deponiebetrieb) konnten mangels Datenaufzeichnung keine aktuellen Werte zum Kraftstoffverbrauch erhoben werden. Aufgrund dessen wurden in Absprache mit dem Zweckverband aha die Daten aus dem Jahr 2006 herangezogen, da sich die gefahrenen Routen in den letzten Jahren unwesentlich verändert haben. Mit den vorgegebenen Emissionswerten für Diesel-Kraftstoff und einem abgeschätzten Heizwert von etwa 9,86 kWh/l ergeben sich die in Tab. 43 angegebenen CO₂-Emissionen für die jeweiligen Bilanzjahre.

Tab. 43: Durch den Fuhrpark verursachte CO₂-Emissionen der Bilanzjahre 2012 und 2050

Bilanzjahr		2012	2050
Kilometerleistung	[km]	4.423.330	4.069.464
Emissionsfaktor	[kg CO ₂ /l]	2,73	1,491
CO ₂ -Emissionen	[kg CO ₂ /a]	12.075.691	6.067.570

7.2.8 Detailübersicht der CO₂-Bilanzierung Abfallbehandlung

Bilanzjahr 2012

Standort Lahe

Altholzaufbereitung	-57.977.245 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	57.977.245 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
GKA Lahe	-17.360.703 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	7.086.602 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	10.274.101 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	3.159.840 kg CO ₂ /a	THG Ausstoß
BAK	-14.747.235 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	8.857.484 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ aus Biofilter
	5.889.752 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	1.529.812 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	2.684.160 kg CO ₂ /a	THG Ausstoß
Summe Bioabfall, Grünschnitt und Altholz Lahe	7.373.812 kg CO₂/a	
MBA	-38.402.046 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	2.063.418 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch MA
in Gesamt Lahe enthalten	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch BA
	-23.139.076 kg CO ₂ /a	Stromerzeugung BHKW
	0 kg CO ₂ /a	Wärmeerzeugung BHKW
	28.190.992 kg CO ₂ /a	Ausstoß BHKW
	13.769.451 kg CO ₂ /a	Ausstoß bei RTO-Betrieb
Summe MBA	-17.517.262 kg CO₂/a	
Deponie Lahe	0 kg CO ₂ /a	Abfallinput regenerativ zur Ablagerung
	95.867.092 kg CO ₂ /a	Ausgasung Deponie
	0 kg CO ₂ /a	abgelagerter Abfall
in Ausstoß RTO enthalten	kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
Summe Deponie Lahe	95.867.092 kg CO₂/a	
Abwasserreinigung Lahe	-13.068 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	13.068 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	208.395 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	39.891 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Lahe	248.286 kg CO₂/a	
Standort Lahe (Rest)	9.906.960 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Deponie Lahe (Deponie + MBA + Abwasserr.)	88.505.076 kg CO₂/a	
Summe Standort Lahe	95.878.888 kg CO₂/a	

Abfallverbrennung

Input Verbrennung	-113.391.814 kg CO ₂ /a
Stromverbrauch	17.114.232 kg CO ₂ /a
Ölverbrauch	1.581.544 kg CO ₂ /a
Abgasausstoß	204.717.650 kg CO ₂ /a
Stromerzeugung	-126.949.786 kg CO ₂ /a
Erdgas	212 kg CO ₂ /a
Wärmeerzeugung	-3.258.320 kg CO ₂ /a
Summe Abfallverbrennung	-20.186.282 kg CO₂/a

Standort Kolenfeld

GKA Kolenfeld	-11.892.903 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	4.384.349 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	7.508.555 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	2.164.640 kg CO ₂ /a	THG Ausstoß
Summe GKA Kolenfeld	2.164.640 kg CO₂/a	
Deponie Kolenfeld	0 kg CO ₂ /a	Kein Input, da in MBA erfasst
	140.397.216 kg CO ₂ /a	Ausgasung durch offene Einbaufäche
	3.118 kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
	5.762.750 kg CO ₂ /a	abgelagerter Abfall
Summe Deponie Kolenfeld	146.163.084 kg CO₂/a	
Abwasserreinigung Kolenfeld	-2.614 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	2.614 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	16.644 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	33.013 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Kolenfeld	49.657 kg CO₂/a	
Deponie Kolenfeld	853.712 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Standort Kolenfeld	149.231.093 kg CO₂/a	

Standort Burgdorf

GKA Burgdorf	-5.818.987 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	2.526.879 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	3.292.108 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	1.059.120 kg CO ₂ /a	THG Ausstoß
Summe GKA Burgdorf	1.059.120 kg CO₂/a	
Deponie Burgdorf	0 kg CO ₂ /a	Ausgasung Deponie
	31 kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
Summe Deponie Burgdorf	31 kg CO₂/a	
	-186.668 kg CO ₂ /a	Stromerzeugung BHKW
	631.872 kg CO ₂ /a	Ausstoß BHKW
Summe BHKW Burgdorf	445.205 kg CO₂/a	
Abwasserreinigung Burgdorf	-2.318 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	2.318 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	43.339 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	705 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Burgdorf	44.044 kg CO₂/a	
Deponie Burgdorf	340.618 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Deponie Burgdorf (Dep. + BHKW + Abwasserr.)	829.897 kg CO₂/a	
Summe Standort Burgdorf	1.889.017 kg CO₂/a	

Standort Gehrden

Abwasserreinigung Lahe	-49 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	49 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	49 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	713 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Gehrden	763 kg CO₂/a	
Deponie Gehrden	0 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Standort Gehrden	763 kg CO₂/a	

Standort Wiedenbrügge

Abwasserreinigung Lahe	-176 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	176 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	3.232 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	118 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar

Summe Abwasserreinigung Wiedenbrügge 3.350 kg CO₂/a

Deponie Wiedenbrügge in Betriebsgebäude/ Fuhrpark enthalten kg CO₂/a Stromverbrauch

Summe Standort Wiedenbrügge 3.350 kg CO₂/a

Betriebsgebäude/Fuhrpark

12.075.691 kg CO ₂ /a	Fahrzeugflotte (aus Kraftstoffverbrauch)
1.718.542 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
293.982 kg CO ₂ /a	Fernwärme
8.019.505 kg CO ₂ /a	Erdgas

Summe Betriebsgebäude/Fuhrpark 22.107.721 kg CO₂/a

Recycling

-89.558.737 kg CO ₂ /a	Recycling Region
-6.899.928 kg CO ₂ /a	Recycling Metall MBA, BAK, Sperrabfall

Summe Recycling -96.458.665 kg CO₂/a

GESAMTSUMME 152.465.883 kg CO₂/a
152.466 t CO₂/a

Bilanzjahr 2050

Standort Lahe		
Altholzaufbereitung	-56.124.114 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	56.124.114 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
GKA Lahe	-22.999.459 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	10.670.538 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	12.328.921 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	43.606 kg CO ₂ /a	THG Ausgasung
BAK	-39.137.018 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	33.718.446 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ aus Biofilter
	5.418.572 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	17.209 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	96.785 kg CO ₂ /a	THG Ausgasung
Summe Bioabfall, Grünschnitt und Altholz Lahe		157.599 kg CO₂/a
MBA	-78.196.690 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	22.735.256 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
in Gesamt Lahe enthalten	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch MA
in Gesamt Lahe enthalten	kg CO ₂ /a	Stromverbrauch BA
	-851.426 kg CO ₂ /a	Stromerzeugung BHKW
	-170.686 kg CO ₂ /a	Wärmeerzeugung BHKW
	48.771.430 kg CO ₂ /a	Ausstoß BHKW
	0 kg CO ₂ /a	Ausstoß bei RTO-Betrieb
Summe MBA		-7.712.117 kg CO₂/a
Deponie Lahe	0 kg CO ₂ /a	Abfallinput regenerativ zur Ablagerung
	0 kg CO ₂ /a	Ausgasung Deponie
	0 kg CO ₂ /a	abgelagerter Abfall
in Ausstoß RTO enthalten	kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
Summe Deponie Lahe		0 kg CO₂/a
Abwasserreinigung Lahe	0 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Lahe		0 kg CO₂/a
Standort Lahe (Rest)	134.654 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Deponie Lahe (Deponie + MBA + Abwasserr.)		-7.577.463 kg CO₂/a
Summe Standort Lahe		-7.419.864 kg CO₂/a
Abfallverbrennung		
Input Verbrennung	0 kg CO ₂ /a	
Stromverbrauch	0 kg CO ₂ /a	
Ölverbrauch	0 kg CO ₂ /a	
Abgasausstoß	0 kg CO ₂ /a	
Stromerzeugung	0 kg CO ₂ /a	
Erdgas	0 kg CO ₂ /a	
Summe Fernwärme	0 kg CO ₂ /a	
Wärmeerzeugung	0 kg CO ₂ /a	
Summe Abfallverbrennung		0 kg CO₂/a

Standort Kolenfeld		
GKA Kolenfeld	-15.755.718 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	5.808.385 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	9.947.333 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	29.872 kg CO ₂ /a	THG Ausgasung
Summe GKA Kolenfeld	29.872 kg CO₂/a	
Deponie Kolenfeld	0 kg CO ₂ /a	Kein Input, da in MBA erfasst
	3.485.215 kg CO ₂ /a	Ausgasung durch offene Einbauffläche
	0 kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
	0 kg CO ₂ /a	abgelagerter Abfall
Summe Deponie Kolenfeld	3.485.215 kg CO₂/a	
Abwasserreinigung Kolenfeld	-2.614 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	2.614 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	16.644 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	33.013 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Kolenfeld	49.657 kg CO₂/a	
Deponie Kolenfeld	9.603 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Standort Kolenfeld	3.574.348 kg CO₂/a	

Standort Burgdorf		
GKA Burgdorf	-7.708.994 kg CO ₂ /a	Input regenerativ
	3.347.610 kg CO ₂ /a	Output (Gas) regenerativ
	4.361.384 kg CO ₂ /a	Output (Feststoff) regenerativ
	14.616 kg CO ₂ /a	THG Ausgasung
Summe GKA Burgdorf	14.616 kg CO₂/a	
Deponie Burgdorf	0 kg CO ₂ /a	Ausgasung Deponie
	0 kg CO ₂ /a	Ausgasung Gasfackel
Summe Deponie Burgdorf	0 kg CO₂/a	
	0 kg CO ₂ /a	Stromerzeugung BHKW
	0 kg CO ₂ /a	Ausstoß BHKW
Summe BHKW Burgdorf	0 kg CO₂/a	
Abwasserreinigung Burgdorf	0 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Burgdorf	0 kg CO₂/a	
Deponie Burgdorf	14.267 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Deponie Burgdorf (Dep.+ BHKW + Abwasserr.)	14.267 kg CO₂/a	
Summe Standort Burgdorf	28.883 kg CO₂/a	

Standort Gehrden		
Abwasserreinigung Lahe	0 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Gehrden	0 kg CO₂/a	
Deponie Gehrden	0 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
Summe Standort Gehrden	0 kg CO₂/a	

Standort Wiedenbrügge		
Abwasserreinigung Lahe	0 kg CO ₂ /a	Input regenerativ (leicht abbaubar)
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) leicht abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (Gas) schwer abbaubar
	0 kg CO ₂ /a	Output (flüssig) schwer abbaubar
Summe Abwasserreinigung Wiedenbrügge	0 kg CO ₂ /a	
Deponie Wiedenbrügge	in Betriebsgebäude/ Fuhrpark enthalten	kg CO ₂ /a Stromverbrauch
Summe Standort Wiedenbrügge	0 kg CO₂/a	
Betriebsgebäude/Fuhrpark		
	6.067.570 kg CO ₂ /a	Fahrzeugflotte (aus Kraftstoffverbrauch)
	22.231 kg CO ₂ /a	Stromverbrauch
	0 kg CO ₂ /a	Fernwärme
	634.352 kg CO ₂ /a	Erdgas
Summe Betriebsgebäude/Fuhrpark	6.724.154 kg CO₂/a	
Recycling		
	-7.924.154 kg CO ₂ /a	Recycling Region
	-288.301 kg CO ₂ /a	Recycling Metall MBA, BAK, Sperrabfall
Summe Recycling	-8.212.455 kg CO₂/a	
GESAMTSUMME	-5.304.935 kg CO₂/a	
	-5.305 Mg CO₂/a	

8 Literatur

- [Agrarheute, 2013] Agrarheute (2013). Biogasanlage.
<http://branchenbuch.agrarheute.com/produkte/biogasanlage-215-2000155.html>.
abgerufen am 17.12.2013
- [Alba Group, 2011] Alba Group (2011). Recycling für den Klimaschutz.
http://www.recyclingnews.info/downloads/20111014_Broschuere_ALBA_Group.pdf.
abgerufen am 11.12.2013
- [Aquen, 2013] Aquen (2013). SludgeValue – Weniger Schlamm und ein Plus an Energie!.
<http://aquen.com/sludgevalue.html>. abgerufen am 17.12.2013
- [Becker et al., 2012] Becker, A.; Düputell, D.; Gärtner, A.; Hirschberger, R.; Oberdörfer, M. (2012).
Emissionen klimarelevanter Gase aus Kläranlagen. Immissionschutz, Heft 4.
- [Beckmann, 2010] Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm. Offenbach :
VDI Wissensforum, 2010.
- [BGK, 2010] Kehres, B.; Mähl, B.; Clemens, J.; Cuhls, C.; Reinhold, J.; Müsken, J. (2010).
Betrieb von Kompostierungsanlagen – mit geringen Emissionen klimarelevanter
Gase; Bundesgütergemeinschaft Kompost e.V.
http://www.kompost.de/uploads/media/6.4_1_Kompostierungsanlagen_geringe_Emission_internet.pdf.
abgerufen am 10.11.2013
- [BHKW, 2013] BHKW (2013). Funktionsschema Blockheizkraftwerk (BHKW).
http://www.bhkw.de/de/was_ist_ein_bhkw/_bhkw_funktionsschema.html. abge-
rufen am 17.12.2013
- [Bormann et al., 2009] Bormann, H., Sievers, M. & Ewert, W. (2009). Auswirkungen der thermischen
Klärschlammhydrolyse und der prozessintegrierten Nährstoffrückgewinnung auf
die Stoffstrom- und Energiebilanzen auf Kläranlagen, s.l.: CUTEC-Institut
GmbH, P.C.S. Pollution Control Service GmbH.
- [Butz, 2006] Ansatz für die Schätzung der luftseitigen Deponieemissionen für das E-PRTR;
Umweltbundesamt Deutschland, FG III 3.3 im März 2006
- [Daelmann et al., 2012] Daelmann, M.R.J.; van Voorthuizen, E.M., van Dongen, U.G.J.M., Volcke, E.I.P.;
van Loosdrecht, M.C.M. (2012). Methane emissions during municipal
wastewater treatment. Water Research, Heft Nr. 46.
- [Dehoust, 2005] Dehoust, G. (2005). Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klima-
schutz und mögliche Potenziale. Umweltforschungsplan des Bundesministeri-
ums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 205 33
314. UBA-FB III
- [DepV, 2009] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV),
Ausfertigungsdatum: 27.04.2009, (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der
Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist
- [Dockhorn, 2007] Dockhorn, T. (2007). Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der
kommunalen Abwasserwirtschaft. Heft 74. ISSN 0934-9731

- [DWA M-381, 2007] Merkblatt DWA-M 381 (2007). Eindickung von Klärschlamm, DWA-Regelwerk, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- [DWA-M-366, 2013] Merkblatt DWA-M 366 (2013). Maschinelle Schlammmentwässerung, DWA-Regelwerk, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- [DWA, 2010] DWA-Themen (2010). Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Abwasser, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef
- [Gecoc, 2013] Gecoc (2013). Schematische Darstellung unserer Ansatzpunkte bei Kläranlagen. <http://www.gecoc.de/index.php?lang=de&content=203>. abgerufen am 17.12.2013
- [Hoffmann & Doedens, 1993] Hoffmann, A.; Doedens, H. (1993). Klimarelevante Emissionen in Hannover. Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz. Heft Nr. 7
- [Hundt, 2010] Hundt, B. (2010). Energie- und Klimaeffizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung. Gießen
- [IE, 2014] Leipziger Institut für Energie (2014). CO₂-Faktoren Mitteilung des Leipziger Instituts für Energie via Email vom 13.11.2013 an Herrn Zwafink (unveröffentlicht)
- [IFEU, 2008] IFEU Heidelberg (2008) Abschlussbericht zum BMU Forschungsvorhaben Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland“, FKZ: 0327544, Materialband
- [IPCC, 2007] IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change
- [ISAH, 2013] Weichgrebe, D., Stopp, P., Voss, E. (2013) Studie über die Nutzung der Abwärmen aus den BHKW in der Gärrestbehandlung mit dem Ziel der Abwasserreduzierung aus der BA, Studie erstellt im Auftrag der aha Abfallzweckverband Region Hannover, unveröffentlicht
- [Kahn, 2013] Kahn, P. (2013). Terra Preta und das Betreibermodell. acwa aktuell. Ausgabe 10
- [LZ, 2013] Lippische Landes-Zeitung (2013). Blomberg lässt die Natur in der Kläranlage arbeiten. http://www.lz.de/home/nachrichten_aus_lippe/blomberg/blomberg/6923991_Blomberg_laesst_die_Natur_in_der_Klaeranlage_arbeiten.html. abgerufen am 17.12.2013
- [Naji et al, 2014] RecoPhos: Phosphoric Acid from Sewage Sludge Ash – Results of Preliminary Experiments, DEPOTECH, Leoben, (2014)
- [Öko-Institut, 2013a] Öko-Institut (2013). Details: Chem-anorgDünger-K-2000. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={29FD0CE5-8932-47DF-A79C-0FE2909DE802}&id=8959033344&step=4&search=>. abgerufen am 17.12.2013
- [Öko-Institut, 2013b] Öko-Institut (2013). Details: Chem-anorgDünger-N-DE-2000.

- <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={6FF9C0FB-B331-4D9D-BE8C-D11B7EC96DCD}&id=8959033344&step=4&search=>.
abgerufen am 17.12.2013
- [Öko-Institut, 2013c] Öko-Institut (2013). Details: Chem-AnorgDünger-P-2000.
<http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/themen.php?&prozessid={0E0B272D-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=8959033344&step=4&search=>. abgerufen am 17.12.2013
- [Otterpohl, 2010] Otterpohl, R. (2010). Waste Water Reuse in Buildings. Institute of Wastewater Management and Water Protection.
http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ecosan.ph%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D83%26Itemid%3D34&ei=yMGwUo25O8rMswbmX4GQDg&usq=AFQjCNERMNuuRTA6Fdn8ku_y9GCMqbQPLA&sig2=hyOucwglbU1i7SmdnjXzQw&bvm=bv.58187178,d.Yms&cad=rja. abgerufen am 17.12.2013
- [Remy et al., 2011] Remy, C.; Lesjan, B.; Hartmann, A. (2011). Die Methodik der Ökobilanz zur ganzheitlichen Erfassung des Energieverbrauchs in der Abwasserreinigung. Nr. 6.
- [Ronchetti et al., 2002] Ronchetti, Claudio, Bienz, Peter und Pridal, Roland. 2002. Ökobilanz Klärgasverstromung. Bern: Swiss TS Technical Services AG im Auftrag von Bundesamt für Energie (BFE), 2002.
- [Shahabadi et al., 2009] Shahabadi, B.M.; Yerushalmi, L. und Haghighat, F. (2009). Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. In: Water research, Band 43 (10)
- [SWB, 1993] SWB (1993). The CleanWaterways Program: Energy/Greenhouse Life Cycle Analysis. Sydney Water Board, Australia
- [Thöle et al., 2011] Thöle, D.; Grünebaum, T.; Schmitt, F.; Lorenz, G. (2011). Energie- und CO₂-Bilanz eines Wasserverbandes. Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr.6.
- [Thru, 2014] Thru (2014). www.thru.de. abgerufen am 06.01.2014
- [UBA, 2013] Wiechmann, B., Dienemann, C., Kabbe, Ch., Brandt, S., Vogel, I., Roskosch, A., Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg. Umweltbundesamt (UBA), Dessau
- [Vogt, 2008] Vogt, R. (2008). Basisdaten THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer Treibhausgasbilanzen. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
- [Wendler, 2005] Wendler, D. (2005). Erfassung und Behandlung ausgewählter Stoffströme in der Siedlungswasserwirtschaft. Heft 131. ISBN 3-921421-61-6
- [Zukunft Inc., 2013] Zukunft Inc. (2013). <http://www.zukunft-inc.de/hannover-zahlen.html>. abgerufen am 11.12.2013