



 **Öko-Institut e.V.**

Ausgewählte Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft

- *Wärmepotenzial aus Abwasser*
- *Potenzial der Faulgasnutzung*

Im Auftrag von:



**BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN ENTSORGUNGS-,
WASSER- UND ROHSTOFFWIRTSCHAFT E.V.
WIRTSCHAFTS- UND ARBEITGEBERVERBAND**

Darmstadt/Heidelberg/Berlin, Januar 2010

Ausgewählte Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft

- *Wärmepotenzial aus Abwasser*
- *Potenzial der Faulgasnutzung*

Bearbeitung:

Günter Dehoust
Georg Mehlhardt

Regine Vogt
Philipp Otter



Freiburg/Darmstadt/Berlin
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Tel.: +49 6151 8191 0
Fax: +49 6151 8191 33
E-Mail: info@oeko.de
www.oeko.de



Institut für Energie-
und Umweltforschung

Heidelberg
Wilckenstraße 10
69120 Heidelberg

Tel.: +49 6221 4767 0
Fax: +49 6221 4767 19
E-Mail: info@ifeu.de
www.ifeu.de

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	5
2	AUFGABENSTELLUNG UND AUSGANGSLAGE	6
2.1	Einordnung des Untersuchungsumfangs zu weiteren möglichen Potenzialen	6
2.2	Allgemeine Daten zur Abwasserwirtschaft in Deutschland	7
3	WÄRMEPOTENZIAL AUS ABWASSER	10
3.1	Einführung	10
3.2	Technik	10
3.3	Potenzial in Deutschland	14
3.3.1	Theoretisches Potenzial der Wärmenutzung	14
3.3.2	Möglichkeiten der Kältenutzung	19
3.3.3	Technisches und wirtschaftliches Potenzial	20
3.3.4	Treibhausgaseinsparpotenzial für Deutschland	22
3.4	Potenzial in der EU 27	24
3.4.1	Abschätzung des nutzbaren Wärmepotenzials im Abwasser	24
3.4.2	Treibhausgaseinsparpotenzial in der EU 27	27
3.5	Zusammenfassung zu Wärmepotenzial aus Abwasser	29
4	POTENZIAL DER FAULGASNUTZUNG	30
4.1	Einführung	30
4.1.1	Vorgehen Potenzialermittlung	31
4.1.2	Qualitative Beurteilung der Umstellung auf anaerobe Schlammbehandlung hinsichtlich Klimaschutzeffekten und Faulgaserzeugung	32
4.1.3	Faulgasnutzungsmöglichkeiten	35
4.2	Potenzial in Deutschland	39
4.2.1	Theoretisches Potenzial der Faulgaserzeugung und -nutzung	39
4.2.2	Technisches und wirtschaftliches Potenzial	42
4.2.3	Treibhausgaseinsparpotenzial für Deutschland	43
4.3	Potenzial in der EU 27	51
4.3.1	Theoretisches Potenzial der Faulgaserzeugung	51
4.3.2	Treibhausgaseinsparpotenzial in der EU 27	58
4.4	Zusammenfassung zum Potenzial der Faulgasnutzung	59
5	FAZIT	61
6	LITERATUR	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abwasserbehandlung in Deutschland im Jahr 2004.....	8
Abbildung 2:	Klärschlammverbleib Deutschland 2004.....	9
Abbildung 3:	Prinzip der Abwasserwärmegewinnung.....	10
Abbildung 4:	Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe im Heizbetrieb	11
Abbildung 5:	Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe im Kühlbetrieb.....	12
Abbildung 6:	Kanal- und Bypasswärmetauscher zur Nutzung von Abwasserwärme	13
Abbildung 7:	Endenergiebedarf für Wärmeanwendungen in deutschen Haushalten und in GHD	15
Abbildung 8:	Trockenwetterwerte der Zulauf und Ablauftemperatur einer Schweizer Kläranlage im Winter	17
Abbildung 9:	Jahreskosten unterschiedlicher Varianten von Wärmever- sorgungssystemen für eine Schule.....	22
Abbildung 10:	Abwasserbehandlungsmöglichkeiten – Faulgaserzeugung	30
Abbildung 11:	Mögliche Verwertungspfade für Faulgas	36
Abbildung 12:	Entwicklung von Klärgasaufkommen und Verwendung.....	40
Abbildung 13:	Klärgasverwendung in Deutschland 2008 und 2004 und in NRW 1999	42
Abbildung 14:	Ermittelte Treibhausgaseinsparpotenziale im Überblick.....	50
Abbildung 15:	Entwicklung der Biogasmengen	57
Abbildung 16:	Ermittelte Treibhausgaseinsparpotenziale für die EU 27 im Überblick	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Jahresabwassermenge in Deutschland 2004 in Mio. m³.....	15
Tabelle 2:	Ausbaugröße und Anzahl der Klärwerke Deutschlands nach Einwohnerwerten.....	16
Tabelle 3:	Wärmepotenziale aus Abwasser in Deutschland bei Nutzung über elektrische Wärmepumpe oder Gaswärmepumpe.....	18
Tabelle 4:	Treibhausgaseinsparung für Abwasserwärmepotenzial und dessen Nutzbarmachung über Wärmepumpensysteme in Deutschland	23
Tabelle 5:	Verfügbare Informationen zum Anschlussgrad an die Abwasserreinigung in den Ländern der Europäischen Union	25
Tabelle 6:	Theoretisches Potenzial der Wärmenutzung in den Ländern der Europäischen Union	27
Tabelle 7:	Wärmepotenziale aus Abwasser in der EU 27 bei Nutzung über elektrische Wärmepumpe oder Gaswärmepumpe.....	28
Tabelle 8:	Treibhausgaseinsparung für Abwasserwärmepotenzial und dessen Nutzbarmachung über Wärmepumpensysteme in der EU 27	28
Tabelle 9:	Abhängigkeit des zu erwartenden Klärgasanfalls von der Verfahrenspraxis der Abwasserreinigung	34
Tabelle 10:	Spezifische Klärgasproduktion	35
Tabelle 11:	Abschätzung des Klärgaspotenzials durch Umstellung (Werte gerundet)	41
Tabelle 12:	Angenommene Verwendung Klärgas (nach Heizwert) Ist- Zustand	45
Tabelle 13:	Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW	45
Tabelle 14:	Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad	46
Tabelle 15:	Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad	47
Tabelle 16:	Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad	47
Tabelle 17:	Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad	48

Tabelle 18:	Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in BZ-BHKW mit 46 % Nettostromwirkungsgrad	49
Tabelle 19:	Überblick der ermittelten Treibhausgaseinsparpotenziale.....	51
Tabelle 20:	Klärschlammaufkommen und -entsorgung in der EU 27.....	52
Tabelle 21:	Berechnung des potenziellen Klärschlammaufkommens.....	54
Tabelle 22:	Berechnung der potenziellen Primärenergieproduktion	55
Tabelle 23:	Überblick der ermittelten Treibhausgaseinsparpotenziale für die EU 27	59

1 Einleitung

In dieser Studie werden die Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft für Deutschland und soweit die Datenlage dies zulässt für die EU 27 beispielhaft, anhand der beiden Bereiche

- Nutzung der Abwärme aus dem Abwasser (Kanalisation) und
- Faulgasnutzung

untersucht.

Weitere Bereiche der Abwasserwirtschaft wie Optimierung des Energieverbrauchs von Kläranlagen, Mitbehandlung von Kofermenten, energetische Nutzung von Klärschlämmen und Nutzung der Abwärme aus dem Abwasser mittels Wärmepumpen auf der Kläranlage sowie Verminderung der Abwassermenge durch höhere Dichtigkeit im Kanalnetz und Reduktion des Fremdwasseranteils sind nicht Bestandteil der Untersuchungen. Um dennoch eine ungefähre Vorstellung zu geben, wie die beiden ausgewählten Bereiche innerhalb der Abwasserwirtschaft hinsichtlich ihres Einsparpotenzials einzuordnen sind, erfolgt vorab eine Einordnung des Untersuchungsumfangs zu weiteren möglichen Potenzialen.

Damit sollen anhand zweier Beispiele für schnell und kostengünstig realisierbare Maßnahmen Potenziale in der Abwasserwirtschaft aufgezeigt werden, die heute in der allgemeinen Diskussion um Klimaschutz wenig Beachtung finden.

Die ambitionierten Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Deutschland und in der EU, die in diesem Umfang notwendig sind, um die heute schon sichtbaren Schäden des Klimawandels einzudämmen, machen die konsequente Umsetzung aller Potenziale notwendig. Der BDE will mit dieser Studie einen möglichen Beitrag für den Bereich Abwasserwirtschaft aufzeigen.

2 Aufgabenstellung und Ausgangslage

2.1 Einordnung des Untersuchungsumfangs zu weiteren möglichen Potenzialen

Die Abwasserbehandlung, von der Einleitung in die Kanalisation über die Abwasserreinigung in der Kläranlage bis zur Klärschlamm Entsorgung, bietet an unterschiedlichen Stellen ein Klimaschutzpotenzial. Die wichtigsten Abschnitte sind, vom Anfall des Abwassers bis zur Behandlung der Reste aus der Kläranlage:

- Verminderung der Abwassermenge durch höhere Dichtigkeit im Kanalnetz und Reduktion des Fremdwasseranteils
- Nutzung von Abwärme aus dem Abwasser der Kanalisation
- Energieverbrauch von Kläranlagen
- Faulgaserzeugung und -nutzung
- Klärschlamm Entsorgung

Von diesen Aspekten wurde zur Untersuchung in dieser Studie als Maßnahme außerhalb von Kläranlagen die **Nutzung von Abwärme aus dem Abwasser der Kanalisation** und als Maßnahme innerhalb von Kläranlagen die **Faulgaserzeugung und -nutzung** ausgewählt.

Von den weiteren genannten Bereichen ist die **Verminderung der Abwassermenge** durch die Sanierung des Kanalnetzes und die damit verbundene Reduktion des Fremdwasseranteils unumstritten eine Möglichkeit die Aufwendungen zur Abwasserreinigung zu reduzieren. Eine quantitative Aussage über das damit verbundene Klimaschutzpotenzial ist nicht möglich.

Der **Energieverbrauch von Kläranlagen** und Möglichkeiten von Optimierungsmaßnahmen sind z.B. in (UBA 2008a) umfassend analysiert worden. Der Stromverbrauch von Kläranlagen liegt bei rd. 4.400 GWh/a. Dies entspricht weniger als 1 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland. Etwa 17 % davon (ca. 750 GWh/a) decken die Kläranlagen aus eigener Stromproduktion durch die Nutzung von Klärgasen. Zusätzlich geben sie etwa 120 GWh/a (etwa 3 % ihres Gesamtverbrauchs) in die öffentlichen Netze ab.

Allerdings sind die Kläranlagen in Städten und Gemeinden mit einem Anteil von ca. 20 % am kommunalen Stromverbrauch der größte Stromverbraucher vor Schulen, Krankenhäusern, Straßenbeleuchtung, etc. Ebenfalls in (UBA 2008a) wurde für Kläranlagen > 10.000 EW ein Zielwert im Sinne eines theoretischen Potenzials für den Strombedarf ermittelt, der etwa eine Halbierung des mittleren spezifischen Stromverbrauchs¹ darstellt (18 statt derzeit 35 kWh/(E*a)). Diese Kläranlagen – nach Anlagenzahl sind dies nur 22 %, die aber 91 % der Schmutzwassermenge behandeln – verursachen mit 3.812 GWh/a den Hauptanteil des Strombedarfs der Kläranlagen in Deutschland. Würden diese ihren Strombedarf entsprechend der Zielwertvorgabe halbieren (entspricht Reduzierung des gesamten Stromverbrauchs um etwa 40 %), könnten nach Marginalstromansatz (vgl. Kap. 4.2.3) rd. 1,6 Mio. t

¹ Die mögliche Reduktion des Stromverbrauchs auf der Kläranlage berücksichtigt nicht die Eigenproduktion, sondern bezieht sich auf den Gesamtverbrauch.

CO₂-Äq/a eingespart werden bzw. rd. 0,2 % der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland. Als realistisches Einsparpotenzial schätzen die Autoren (UBA 2008a) eine Reduzierung des Stromverbrauchs um ca. 10-20 % ein.

Die Klimaschutzpotenziale durch die Optimierung der **Klärschlammentsorgung** werden kontrovers diskutiert. Zum einen ist Klärschlamm ein schlechter Brennstoff, der in der Kette Klärschlamm Trocknung und Monoverbrennung im Normalfall keinen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, da der Energieüberschuss aus der Verbrennung den Bedarf bei der Trocknung kaum decken kann. Energetisch etwas besser schneidet die Mitverbrennung des Klärschlammes im Kohlekraftwerk ab. Hier ist aber zu berücksichtigen, dass die Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken im Allgemeinen nicht auf die Schwermetallfrachten ausgelegt ist und dass hiermit eine Schadstoffverlagerung aus dem Wasser- in den Luftpfad verbunden sein kann. Um den mineralischen Rohstoff Phosphat nutzen zu können, müsste die energetische Nutzung zusätzlich mit einer Phosphatrückgewinnung aus den Aschen ausgerüstet werden, für die unter den derzeitigen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen keine wirtschaftlichen Lösungen realisiert sind. Die Nutzung des Klärschlammes in der Landwirtschaft, heute immer noch die häufigste Nutzungsform, ist aufgrund der Schadstoffverfrachtung in Böden und Pflanzen allerdings ebenfalls umstritten (Öko-Institut/IFEU 2006).

Nachfolgend werden die Bereiche Nutzung des Abwärmepotenzials aus dem Kanalnetz und Potenzial der Faulgaserzeugung und -nutzung jeweils zunächst für Deutschland und im Weiteren für die EU 27 untersucht und die resultierenden Treibhausgaseinsparpotenziale aufgezeigt.

Insgesamt kann basierend auf den vorhandenen Studien und mit den vertieften Untersuchungserkenntnissen dieser Studie kein Gesamtüberblick über das Klimaschutzpotenzial der Abwasserwirtschaft gegeben werden. Zum einen sind die Einsparpotenziale nicht umfassend genug bekannt, zum anderen lassen unterschiedliche Ansätze der Berechnung keinen unmittelbaren Vergleich zu. Dies würde einer deutlich umfassenderen Projektarbeit bedürfen, die weit über den Rahmen der vorliegenden Studie hinausgeht.

2.2 Allgemeine Daten zur Abwasserwirtschaft in Deutschland

Daten zur öffentlichen Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung werden dreijährlich durch das Statistische Bundesamt veröffentlicht (Fachserie 19, Reihe 2.1). Nach der derzeit noch aktuellen Fassung (StBA 2006) wurden im Jahr 2004 insgesamt in Deutschland 5.371,7 Mio. m³ Wasser gefördert, davon rund 74 % Grund- und Quellwasser. In privaten Haushalten und Kleingewerbe wurden davon knapp 60 % verbraucht. Dies entspricht einem täglichen Wasserverbrauch von 126 l/(E*d).

An die öffentliche Kanalisation sind 94 % der Einwohner Deutschlands angeschlossen. Das Kanalnetz erstreckt sich über knapp 515.000 km. Die insgesamt in die öffentliche Kanalisation geleitete Jahresschmutzwassermenge betrug 5.271,3 Mio. m³, wovon knapp 99 % in den rund 10.000 öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen in Deutschland behandelt wurden. Zudem fielen in diesen Anlagen noch 4.205,7 Mio. m³ Fremd- und Niederschlagswasser an. Die daraus resultierende Jahresabwassermenge von 9.410 Mio. m³ wurde fast ausschließlich in biologischen Anlagen behandelt (Abbildung 1).

Nahezu alle Kläranlagen in Deutschland sind biologische Anlagen. Zusätzliche Verfahrensstufen haben nur etwa 55 % der Kläranlagen, die aber 97 % der Schmutzwassermenge be-

handeln. Die Hälfte dieser Anlagen mit zusätzlicher Verfahrensstufe weisen eine Ausbaugröße über 10.000 EW auf, diese behandeln 91 % der Schmutzwassermenge. Lediglich über Filtration werden mit rd. 18 % bisher nur geringere Mengen an Schmutzwasser behandelt (in 3 % der Anlagen).

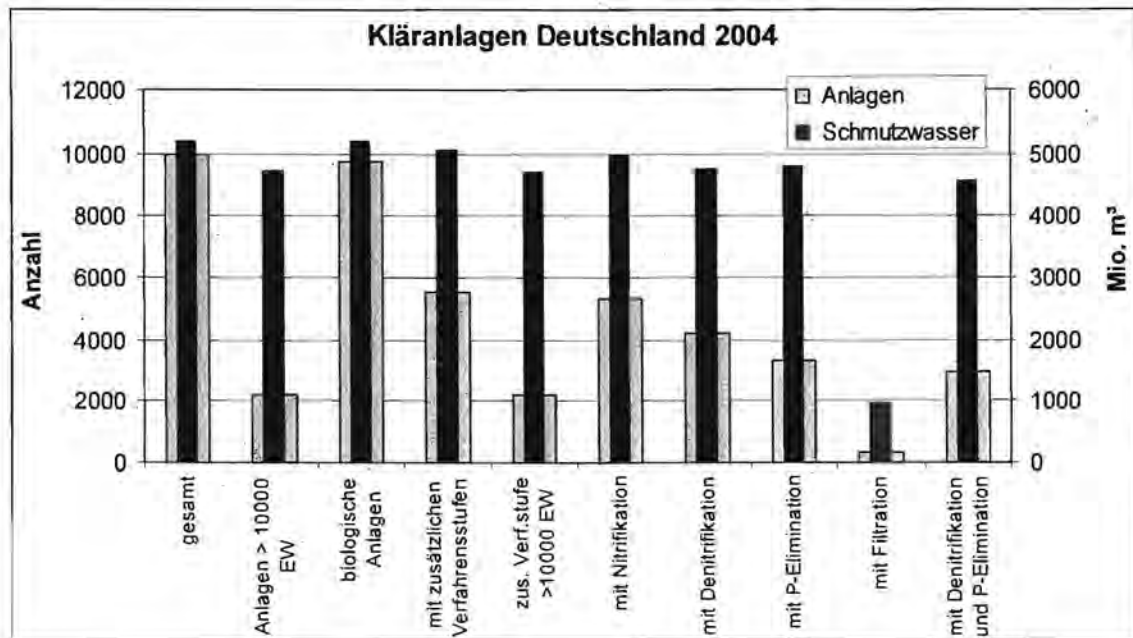


Abbildung 1: Abwasserbehandlung in Deutschland im Jahr 2004 nach (StBA 2006)

Für 6.998 Kläranlagen weist die Statistik auch die Art der Klärschlammbehandlung aus. Nach Anlagenzahl überwiegt knapp die anaerobe Schlammstabilisierung (3.136 Anlagen), Angaben über die Größenklassenverteilung dieser Anlagen oder die in diesen Anlagen behandelte Schmutzwasser- oder Rohschlammmenge sind nicht angegeben. Aus einer anderen Quelle (UBA 2008b) kann jedoch entnommen werden, dass 75 % des Rohschlammes anaerob behandelt wird. Letztendlich fielen nach (StBA 2006) im Jahr 2004 insgesamt etwa 2,26 Mio. Tonnen Trockensubstanz Klärschlamm an. Den Verbleib dieser Menge zeigt Abbildung 2.

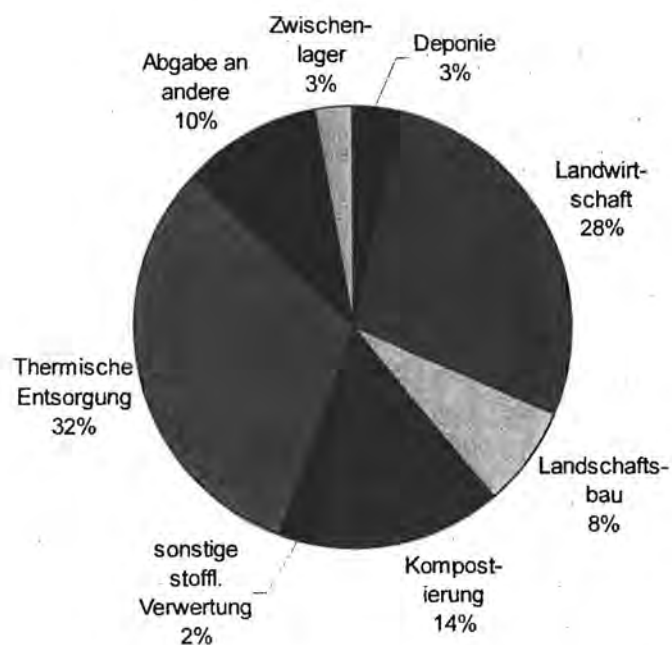


Abbildung 2: Klärschlammverbleib Deutschland 2004 nach (StBA 2006)

3 Wärmepotenzial aus Abwasser

3.1 Einführung

Im Durchschnitt verbraucht eine Person in Deutschland täglich ca. 126 Liter Wasser (Uni-Oldenburg 2007). Davon beläuft sich der Warmwasserbedarf für Baden, Duschen, Waschen bei einem Temperaturniveau von ca. 45 °C auf 30-50 Liter (Schneider et al. 2005). Allein der Endenergieverbrauch zur Bereitstellung des warmen Wasser in deutschen Haushalten betrug 2006 knapp 88 TWh (BMWi 2008). Mit der Nutzung des Warmwassers geht dabei bisher auch die noch vorhandene Wärme im Abwasserkanal verloren – bei gut gedämmten Wohngebäuden ist dies die letzte größere Wärmeverlustquelle. Hinzu kommen die Abwässer aus Gewerbe, Handel, Dienstleitungen und Industrie. Ein Teil dieser Energie könnte jedoch mit Hilfe von Wärmepumpen wieder gewonnen und auf ein nutzbares Niveau gebracht werden.

Ziel dieses Arbeitspapiers ist es, das in Deutschland vorhandene und nutzbare Wärmepotenzial der Energiequelle Abwasser und das sich daraus ergebene CO₂-Reduktionspotenzial abzuschätzen. Zudem werden auch die einsetzbaren Technologien erläutert.

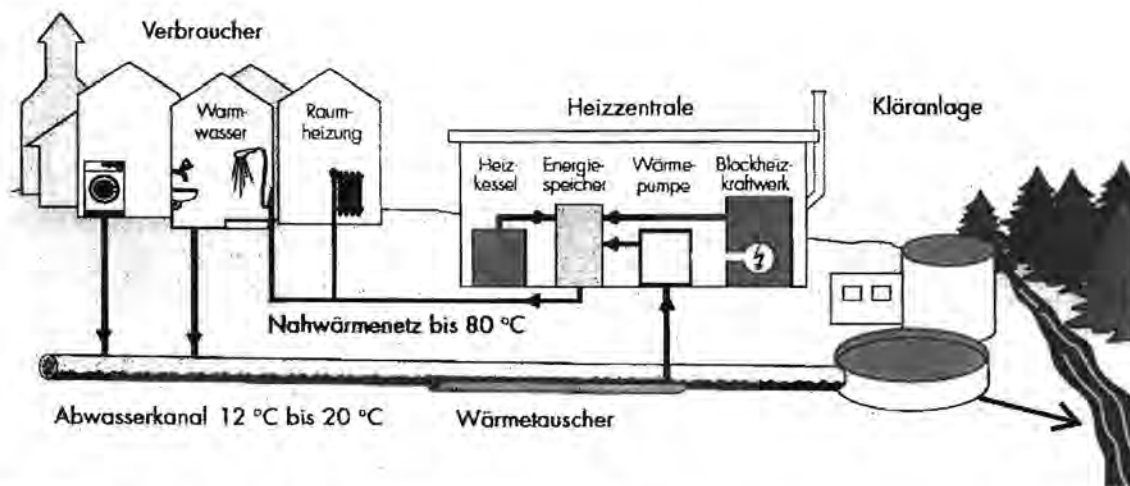


Abbildung 3: Prinzip der Abwasserwärmegewinnung
Quelle: (Müller et al. 2005)

3.2 Technik

Wärmepumpen

Wärmepumpen sind in der Lage Wärme eines niedrigen Temperaturniveaus unter Aufwendung von Arbeit (Kompressionswärmepumpe) bzw. Wärme (Sorptionswärmepumpe) auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben und somit zu Heizzwecken oder der Warmwasserbereitung nutzbar zu machen. Die für den Betrieb der Wärmepumpe notwendige Energie ist dabei geringer als die bereitgestellte Wärme und macht beispielsweise bei modernen elektrischen

schen Kompressionswärmepumpen nur ca. 20–30 % aus. Anhand der folgenden Abbildung wird die Funktionsweise einer Wärmepumpe mit realistischen Temperaturniveaus von Wärmequelle und Wärmesenke kurz geschildert.

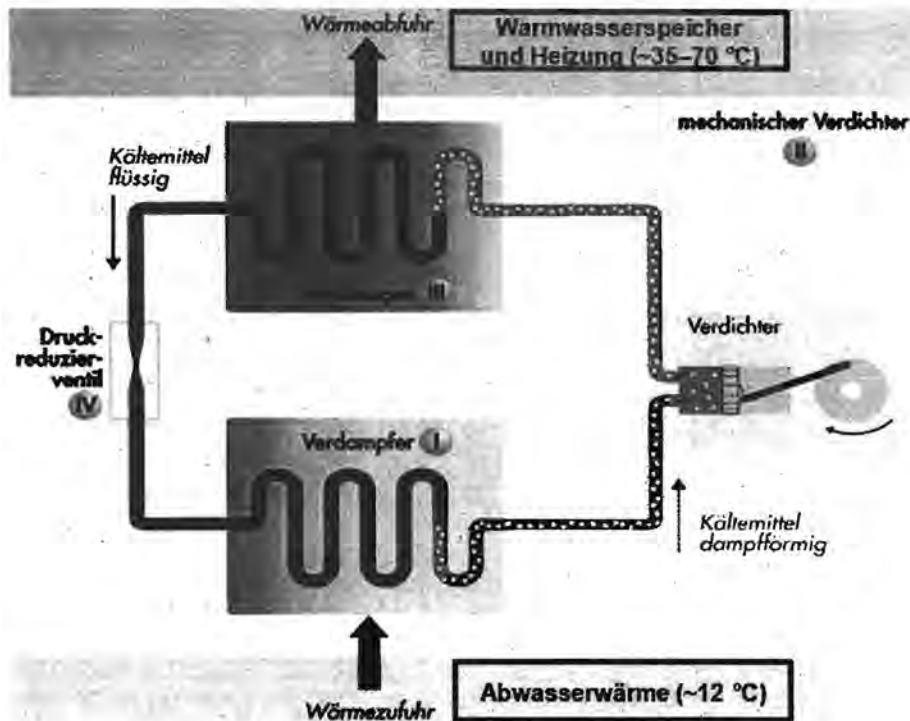


Abbildung 4: Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe im Heizbetrieb
Quelle: (ASUE 2006), ergänzt durch IFEU

Die vier wesentlichen Bestandteile einer Wärmepumpe sind Verdampfer, Kondensator, Verdichter und Drossel bzw. Druckreduzierventil. Ein flüssiges Arbeitsmedium wird im Verdampfer bei geringem Druck durch Wärmezufuhr auf niedrigem Temperaturniveau verdampft. Im Fall der Abwasserwärmepumpe findet hier die Wärmeentnahme des Abwassers statt. Das Gas wird dann im Verdichter komprimiert, wodurch es sich erwärmt, und in den Verflüssiger geleitet. Dieser wird ständig vom Heizmedium mit einer geringeren Temperatur als die des Gases umspült, welches hier seine Wärme wieder abgibt und kondensiert. Das flüssige Arbeitsmedium entspannt dann über eine Drossel und gelangt zurück in den Verdampfer wo es aufgrund des geringen Drucks wieder bei niedriger Temperatur zu sieden beginnt. Der Kreislauf beginnt von vorne. Durch Umkehrung dessen kann mit dem Abwasser auch aktiv gekühlt werden. Wärmepumpen die hierzu in der Lage sind werden als reversible Wärmepumpen bezeichnet. Realisiert wird dieser Betrieb i.d.R. durch ein 4-Wege-Ventil, welches eine Funktionsumkehr der beiden Wärmetauscher ermöglicht (effiziento 2009). Der Kondensator wird also zum Verdampfer und der Verdampfer zum Kondensator, wobei die Wärme dem zu kühlenden Raum entnommen und an das Abwasser abgegeben wird. Eine zweite Drossel entspannt dabei das Gas in die umgekehrte Richtung.

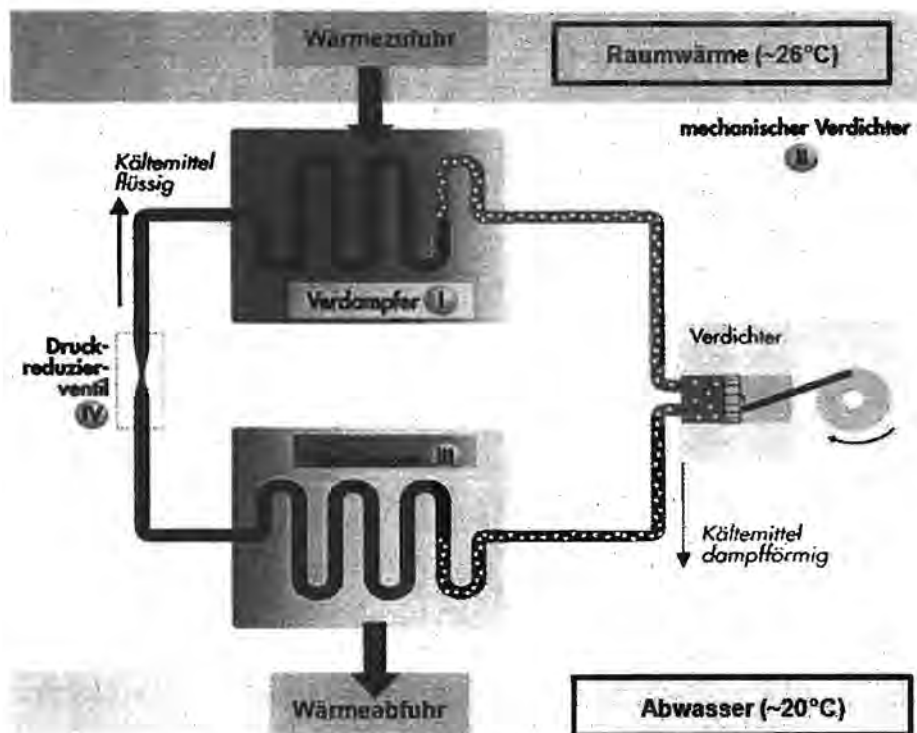


Abbildung 5: Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe im Kühlbetrieb²
Quelle: (ASUE 2006), geändert und ergänzt durch IFEU

Grundsätzlich sind für Wärmeanwendungen möglichst hohe Quelltemperaturen und für Kälteanwendungen möglichst geringe Temperaturen der Wärmesenke zu nutzen. Des Weiteren erhöht sich der Wirkungsgrad einer Wärmepumpe im Heizbetrieb bei geringen Vorlauftemperaturen, im Kältebetrieb bei hohen Kühltemperaturen.

Die über ein Jahr von der Wärmepumpe bereitgestellte Wärmemenge in Relation zum Stromverbrauch einer elektrischen Wärmepumpe wird als Jahresarbeitszahl (JAZ) bezeichnet und dient zur energetischen Bewertung dieser. Bei einer möglichen JAZ von beispielsweise 4 werden 75 % Umweltwärme eingekoppelt. Zur ökologischen Bewertung der elektrischen Wärmepumpe ist der Primärenergiefaktor des verwendeten Stroms zu beachten. Dieser liegt in Deutschland bei etwa 3. Entsprechend sollte eine elektrische Wärmepumpe eine Jahresarbeitszahl von mehr als 3 aufweisen, um Kraftwerks- und Verteilverluste ausgleichen zu können und ökologische Vorteile gegenüber der Nutzung von beispielsweise Gas zur Wärmeerzeugung zu haben.

Eine alternative Wärmepumpentechnologie ist die – bisher nur wenig verbreitete – Gas-Wärmepumpe (DWA 2008). Bei dieser findet die Verdichtung entweder mechanisch durch Gasmotoren, oder durch Verbrennung in so genannten thermischen Verdichtern statt. Ihre Effizienz wird über die dimensionslose Jahresheizzahl (JHZ), dem Verhältnis vom jährlichen Wärmeenergieertrag zur eingesetzten Brennstoffenergie, charakterisiert. Werte für die JHZ liegen derzeit im Bereich zwischen 1,35 und 1,5, was bedeutet, dass hier nur ca. 25-35 % Umweltwärme eingekoppelt werden (IFEU/Wuppertal-Institut 2008). Gas-Wärmepumpen

² Der Verständlichkeit halber wurde in dieser Darstellung auf das 4-Wege-Ventil und die zweite Drossel verzichtet, dafür aber die Fließrichtung des Kältemittels umgekehrt

benötigen im Vergleich zu elektrischen Wärmepumpen mit gleicher Leistung daher mehr Endenergie. Durch den deutlich günstigeren Primärenergiefaktor (PE-Faktor) von Gas, sind Gas-Wärmepumpen ökologisch betrachtet jedoch nicht schlechter als elektrische Wärmepumpen.³ Der große Vorteil der Gaswärmepumpen liegt darin, dass durch die geringere Umweltwärmeeinkopplung, Wärmetauscherflächen deutlich kleiner ausfallen können bzw. bei gleichem Energieentzug mehr Wärme bereitgestellt werden kann.

Wärmetauscher

Um die Wärmequelle Abwasser „anzuzapfen“ bedarf es spezieller Kanalwärmetauscher. Diese werden entsprechend des vorhandenen Kanalprofils als vorgefertigte Elemente hergestellt und können dann nachträglich in Kanälen ab einer Nennweite von DN 800 installiert werden. Beim Kanalneubau werden Kanalelemente mit werkseitig integriertem Wärmetauscher verwendet und so Kostensynergien genutzt. Die Wärmetauscherflächen bestehen aus einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit und sind meist doppelagig, zum Durchströmen eines Zwischenmediums, gestaltet. Bei einer praktikablen Temperaturdifferenz von 3-4 K liegt die Leistung mit der die Wärme dem Abwasser entnommen wird zwischen 2 und 4 kW pro m² (DBU 2005). Dabei ist zu beachten, dass die Bildung einer Sichelhaut die Wärmetauscherleistung um bis zu 50 % reduzieren kann. Die Länge eines Kanalwärmetauschers kann ohne weiteres 200-300 m betragen (DWA 2008).

Bypasswärmetauscher entnehmen einen Teilstrom des Abwassers und führen ihn in eine begehbare Kompaktanlage, wo die Wärme über Platten- oder Doppelrohrwärmetauscher abgegeben wird. Vorteile gegenüber den Kanalwärmetauschern sind leichter Zugang und Unabhängigkeit von Kanalgröße und Geometrie. Jedoch sind sie aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen nur für größere Systeme geeignet (Christ, Mitsdoerffer 2008).

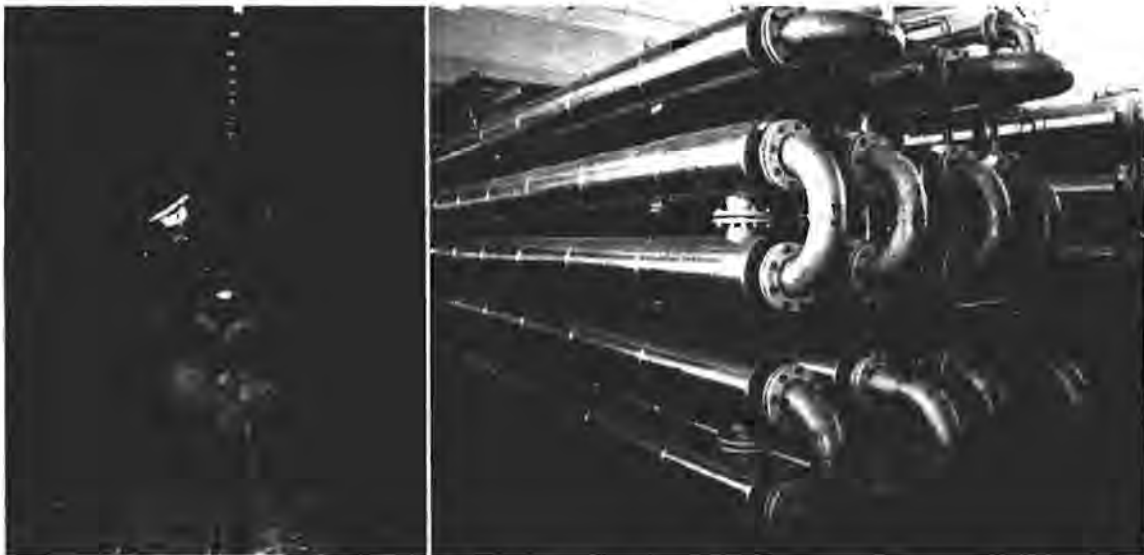


Abbildung 6: Kanal- und Bypasswärmetauscher zur Nutzung von Abwasserwärme Quelle: (Christ, Mitsdoerffer 2008)

³ Bei einem heutigen Stromwirkungsgrad von Kraftwerken von 35 % ist eine Gas-Wärmepumpe mit einer JHZ von 1,4 ökologisch gleichwertig zu einer elektrischen Wärmepumpe mit einer JAZ von 4 (IFEU/Wuppertal-Institut 2008).

Liegt der Wärmeverbraucher weit vom Kanal entfernt, wird das Zwischenmedium mit dem niedrigen Temperaturniveau des Abwassers in unisolierten Leitungen zur Wärmepumpe transportiert, dort abgekühlt und zurückgeführt. Die von der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme wird dann direkt an den Verbraucher geleitet. So können ohne weiteres Distanzen von bis zu einem Kilometer zwischen Kanalisation und Verbraucher überbrückt werden. Versorgt ein Nahwärmeverbund mehrere kleinere Verbraucher gemeinsam mit Wärme, wirken die Wärmeverluste begrenzend auf die Länge der Leitung. Als groben Richtwert sind Leitungen bis 100 m anzusetzen (DBU 2005).

Verbraucher und Dimensionierung:

Ein sinnvoller Einsatz der Abwasserwärmenutzung ist nur bei größeren Abnehmer mit einem Heizwärmebedarf von mindestens 150 kW gegeben (Christ, Mitsdoerffer, 2008). Geeignet sind daher neben Wohnkomplexen, öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Sporthallen oder Verwaltungsgebäude. Um günstige Jahresarbeitszahlen zu erreichen sind möglichst niedrige Betriebstemperaturen vorteilhaft.⁴ Zudem hat es sich bewährt die Wärmepumpen parallel mit anderen Heizsystemen wie Gasbrennwertgeräten oder Blockheizkraftwerken zu fahren. Dadurch können Wärmepumpe und Wärmetauscher kleiner dimensioniert und somit wirtschaftlicher bei hoher Versorgungssicherheit betrieben werden. Die DWA gibt als Faustformel an, dass die Wärmepumpe auf ca. ein Drittel des gesamten Wärmeleistungsbedarf ausgelegt sein sollte und so rund drei Viertel des jährlichen Raumwärmebedarfs abdeckt (DWA 2008).

Wegen sich ständig ändernder wirtschaftlicher Bedingungen wird für die Entscheidungsgrundlage und Dimensionierung einer Abwasserwärmanlage immer eine standortbezogene Machbarkeitsstudie empfohlen.

3.3 Potenzial in Deutschland

3.3.1 Theoretisches Potenzial der Wärmenutzung

Wärmeverbrauch:

In der folgenden Abbildung ist der Endenergiebedarf für Wärmeanwendungen der privaten Haushalte und des Gewerbe-, Handels-, und Dienstleistungssektors von 2006 dargestellt. Dieser summiert sich auf 850 TWh. Wegen des relativ geringen Temperaturniveaus können Wärmepumpen hier effizient zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden.

⁴ Bei Vorlauftemperaturen über 70°C sind Jahresarbeitszahlen größer 3 nur schwer zu erreichen.

Wärmebedarf in priv. Haushalten und GHD [TWh]



Abbildung 7: Endenergiebedarf für Wärmeanwendungen in deutschen Haushalten und in GHD (BMWi 2008)

Abwasservolumenstrom:

Für die Berechnung des Wärmemengenpotenzials sind Angaben über die vorhandene und nutzbare Abwassermenge notwendig.

Tabelle 1: Jahresabwassermenge in Deutschland 2004 in Mio. m³

Schmutzwasser	5.204
Fremdwasser	1.812
Regenwasser	2.393
Gesamt	9.410

Quelle: (destatis 2006)

Demnach fiel in Deutschland 2004 ein Abwasservolumen von 9,41 Mrd. m³, bestehend aus Schmutz-, Fremd- und Regenwasser, an. Da Letzteres periodisch auftritt steht dieses im Gegensatz zu Schmutz- und Fremdwasser nicht ständig zur Wärmeentnahme zur Verfügung⁵. Daraus ergibt sich in Deutschland eine Abwassermenge von 7,02 Mrd. m³ pro Jahr bzw. von durchschnittlich 234 Liter pro Einwohner und Tag. Um sicherzustellen, dass die Wärmetauscher ständig mit Wasser bedeckt sind, setzt die DWA in Ihrem „Regelwerk zur Energiegewinnung aus Abwasser“ (DWA 2008) einen minimalen Trockenwetterabfluss von mindestens 15 l/s im Tagesmittel voraus. Um zu ermitteln ab welcher Größe einer Gemeinde der Zulauf zum Klärwerk ausreichend Wasser führt, sind in Tabelle 2 Angaben der Kläranlagen mit mehr als 5.000 Einwohnerwerten (EW) dargestellt.⁶

⁵ In Kanalsystemen mit getrennter Wasserefassung hat das Regenwasser grundsätzlich keine Relevanz.

⁶ Der Einwohnerwert (EW) ergibt sich aus der Summe der angeschlossenen Einwohner und dem Einwohnergleichwert. Als Einwohnergleichwert (EGW B 60) wird eine Messzahl bezeichnet, welche die

Tabelle 2: Ausbaugröße und Anzahl der Klärwerke Deutschlands nach Einwohnerwerten

Ausbaugröße-EW	Anlagen	EW- insgesamt [in 1.000]	EGW B 60 [in 1000]	Ein- wohner [in 1000]	Schmutz- wasser [1.000 m³/a]	Fremd- wasser [1.000 m³/a]	Summe [1.000 m³/a]	Summe [l/s*Anlage]
5.000 – 10.000	897	5.154	1.247	3.907	214.300	110.200	324.500	11,5
10.000 – 20.000	817	9.248	2.671	6.577	371.700	184.700	556.400	21,6
20.000 – 50.000	832	20.838	7.210	13.628	836.100	390.600	1.226.700	46,8
50.000 – 100.000	313	17.365	6.771	10.593	683.800	250.900	934.700	94,7
100.000 u. mehr	252	65.242	27.627	37.615	2.844.700	739.900	3.584.600	451,1
Summe ab 5.000	3.111	117.847	45.526	72.320	4.905.600	1.676.300	6.626.900	67,5
Summe ab 10.000	2.214	112.693	44.279	68.413	4.736.300	1.566.100	6.302.400	90,3

Quelle (destatis 2006)

Tabelle 2 kann entnommen werden, dass in Kläranlagen der Ausbaugröße von 5.000 bis 10.000 EW im Schnitt nur ein Trockenwetterabfluss von 11,5 l/s zustande kommt und diese somit für die Wärmenutzung nicht geeignet sind. In Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 10.000 bis 20.000 EW steht mit einem Trockenwetterzulauf von durchschnittlich 21,6 l/s ausreichend Wasser zur Verfügung⁷. Die gesamte Schmutz- und Fremdwasserfracht für Kläranlagen > 10.000 EW belief sich 2004 auf 6,302 Mrd. m³.

In Deutschland steht somit ein jährlicher Volumenstrom von 6,302 Mrd. m³ bzw. ca. 200.000 Liter pro Sekunde für den Wärmeentzug zur Verfügung.

Temperaturgradient:

Die Reinigungsleistung von Kläranlagen nimmt mit der Abwassertemperatur ab. Hiervon am stärksten betroffen sind die Prozesse der Stickstoffeliminierung (Nitrifikation und Denitrifikation). Können kurzzeitige Temperaturschwankungen, beispielsweise durch kleine Regenschauer in der biologischen Stufe einer Kläranlage noch gut gedämpft werden (Abbildung 8), so sinkt die Nitrifikationsleistung bei dauerhafter Abkühlung, was einen höheren Stickstoffgehalt im Ablauf zur Folge hat. Im Normalfall liegt eine Abkühlung von 1 K für großzügig dimensionierte Kläranlagen im Bereich der üblichen Schwankungen und stellt somit kein Problem dar. Als allgemeines Grenzkriterium wurde eine mittlere Temperaturreduzierung von 0,5 K über einen Zeitraum von 24 Stunden als unproblematisch angesehen, wenn in den kritischen Wintermonaten (Dezember bis Februar) eine Temperatur im Abwasser von durchschnittlich 10 °C nicht unterschritten wird (DBU 2005)⁸.

Während der Heizperiode variieren die Abwassertemperaturen im Kanal zwischen 10 °C und 15 °C (siehe Abbildung 8) (DWA 2008). Für die Potenzialabschätzung wird daher mit der

Verschmutzung in gewerblichem oder industriellem Schmutzwasser mit derjenigen von häuslichem Schmutzwasser verglichen. Dabei wird von einem fünftägigen biochemischen Sauerstoffbedarf des Abwassers von 60 g pro Einwohner und Tag ausgegangen. (destatis 2006).

⁷ Durchschnittlich sind an Anlagen der Ausbaugröße 5.000-10.000 EW 4.360 Einwohner, an Anlagen der Ausbaugröße 10.000-20.000 EW 8.050 Einwohner angeschlossen.

⁸ 10 °C ist die Bemessungstemperatur nach ATV-Arbeitsblatt 131 für die Nitrifikation von Kläranlagen in Deutschland.

o. g. Reduzierung von 0,5 K gerechnet. Diese ist als konservativ zu bewerten, da im konkreten Fall auch höhere Temperaturreduzierungen möglich sind. Dies beispielsweise auch dann, wenn eine Wiedererwärmung des Abwassers auf dem Weg zum Klärwerk durch höhere Boden- und Lufttemperaturen oder die Auslegung der Kläranlage festzustellen ist⁹. In jedem Fall ist eine Genehmigung des Kanalisations- bzw. Kläranlagenbetreibers einzuholen (DBU 2005).

Als Grundlage für die Abschätzung des durchschnittlichen Potenzials für das gesamte, in Frage kommende Kanalnetz berücksichtigt dieser konservativ gewählte Temperaturgradient, dass der Wärmebedarf jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt und dass nicht alle technisch denkbaren Standorte genutzt werden und. Dort wo man sich für eine Nutzung entscheidet, wird der tatsächlich mögliche Temperaturgradient dann schon aus wirtschaftlichen Erwägungen effektiv genutzt.

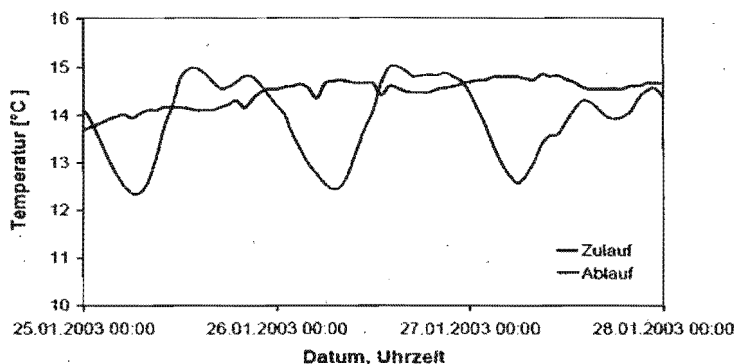


Abb. 3.1: Trockenwetterwerte der Zulauf- und Ablauftemperatur der ARA Werdhölzli in Zürich vom 25. bis 27. Januar 2003

Abbildung 8: Trockenwetterwerte der Zulauf und Ablauftemperatur einer Schweizer Kläranlage im Winter (Wanner, 2004)

In der Praxis wird die Temperatur in Städten mit mehreren ausreichend großen Kanälen stärker abgesenkt, da die Wärmepumpe nicht durchgehend in Betrieb ist und nicht jeder Kanal zum Wärmeentzug erschlossen werden kann. Das abgekühlte Wasser wird dann beim Zusammentreffen mehrerer Abwasserströme wiedererwärmt. Praxiserfahrungen in der Schweiz zeigen, dass selbst bei kleineren Kläranlagen mit mehr als 3.000 angeschlossenen Einwohnern in der Regel keine Probleme mit dem Wärmeentzug aufgetreten sind (Schinnerl o.J.).

Die Wärmeleistung des Abwassers kann durch die folgende Formel bestimmt werden:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$$

⁹ Befindet sich eine Kläranlage in der Nähe zu einem Wärmeverbraucher kann auch dem gereinigten Abwasser Wärme entzogen werden. Hier wäre eine höhere Temperaturreduzierungen möglich.

Wobei die spezifische Wärmekapazität von Wasser 1,163 Wh/kg*K beträgt und für flüssiges Wasser von einer konstanten Dichte ausgegangen wird¹⁰. Der Massenstrom kann daher durch den Volumenstrom ersetzt werden.

Mit dem oben abgeleiteten jährlich verfügbaren Volumenstrom von 6,302 Mrd. m³ und der konservativ angenommenen Temperaturreduktion von 0,5 K berechnet sich für Deutschland eine durchschnittliche Wärmeleistung des Abwassers von 418 MW.

Um diese Wärmeleistung nutzbar zu machen, muss die Abwassertemperatur in der Heizperiode um 10-15 °C angehoben werden (vgl. Kapitel 3.2). Hierzu wird eine Wärmepumpe eingesetzt. Die mittels Wärmepumpe erzeugte Wärmeleistung wird mit folgender Formel berechnet:

$$P_{WP} = \frac{P_{Abw} \cdot COP}{COP - 1}^{11}$$

Mit der ermittelten Wärmeleistung des Abwassers (P_{Abw}) ergibt sich daraus bei einer elektrischen Wärmepumpe mit einer JAZ von 4 (COP) ein jährliches Wärmepotenzial von 558 MW bzw. 4.887 GWh/a. Der erforderliche Stromeinsatz liegt bei 139 MW. Für Gaswärmepumpen mit einer guten JHZ von 1,5 (COP) ergäbe sich ein jährliches Wärmepotenzial von 1.255 MW bzw. 10.995 GWh/a. Der erforderliche Gaseinsatz liegt bei 837 MW¹² (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wärmepotenziale aus Abwasser in Deutschland bei Nutzung über elektrische Wärmepumpe oder Gaswärmepumpe

	Elektrische Wärmepumpe		Gaswärmepumpe	
	Wärmeleistung in MW	Wärmepotenzial in GWh/a	Wärmeleistung in MW	Wärmepotenzial in GWh/a
Abwasser	418	3.665	418	3.665
Strom	139	1.222		
Gas			837	7.330
Summe	558	4.887	1.255	10.995

¹⁰ Aus einem Kubikmeter Wasser können somit mindestens 0,58 kWh Wärme entzogen werden.

¹¹ P_{WP} : Wärmeleistung Wärmepumpe; P_{Abw} : Wärmeleistung Abwasser, COP: Coefficient of Performance (gewonnene Wärme / Inputenergie), entspricht der JAZ bzw. JHZ

¹² Bei der Gaswärmepumpe wird die Verdichtungsarbeit durch Wärme aus der Gasverbrennung geleistet und nicht durch Strom wie bei der elektrischen Wärmepumpe. Für die gleiche Verdichtungsarbeit müssen mehr Kilowattstunden thermische Energie („mehr Gas“) eingesetzt werden als elektrische Energie. Deswegen ergibt sich bei der Gaswärmepumpe ein höheres Wärmepotenzial als bei der elektrischen Wärmepumpe (Wärmepotenzial = Wärme im Abwasser + eingesetzte Energie). Vorteil der Gaswärmepumpe ist eine höhere Energieausnutzungsmöglichkeit des eingesetzten Primärenergieträgers Gas, da fast der gesamte Energiegehalt zur Erhöhung des Wärmeniveaus genutzt werden kann, während Strom an anderer Stelle aus Primärenergieträgern erzeugt wurde und die dabei anfallende Abwärme nicht verfügbar ist. Die hier beschriebenen Pumpen sind ökologisch gleichwertig (vgl. Kapitel 3.2).

Bei einer empfohlenen Mindestgröße von 150 kW_{th} pro Aggregat besteht in Deutschland damit das Potenzial für etwa 3.700 elektrische Wärmepumpen bzw. bis zu 8.400 Gaswärmepumpen.

Pro Haushalt werden in Deutschland jährlich durchschnittlich etwa 13,7 MWh Raumwärme gebraucht. Rein rechnerisch entspräche das ermittelte Wärmepotenzial aus Abwasser von 3.665 GWh/a dem Raumwärmebedarf von etwa 270.000 Haushalten. Das entspricht einer Stadt von der Größe Kölns. Die Wärmemenge aus Abwasser ist jedoch nicht direkt nutzbar, ihr Temperaturniveau muss über Wärmepumpe erhöht werden. Die mittels elektrischer Wärmepumpe erzeugbaren 4.887 GWh/a entsprechen dem Raumwärmebedarf von rd. 355.000 Haushalten, die mittels Gaswärmepumpe erzeugbaren 10.995 GWh/a dem Bedarf von rd. 800.000 Haushalten. Welche der beiden Pumpenarten zum Einsatz kommen sollen, ist auf Basis der konkreten Randbedingungen im Einzelfall abzuwägen (Wärmebedarf vor Ort, Gasanschluss, etc.).

Andere Studien geben ein deutlich höheres Wärmepotenzial an. Hier schwanken die Angaben zwischen 1,5 und 4 Millionen Haushalten (Müller et al. 2005, Piller et al. 2007). Diese Werte können nur bei höherer Temperaturreduzierung (3-4 K) und/oder schlechteren JAZ bzw. JHZ erreicht werden.

3.3.2 Möglichkeiten der Kältenutzung

In Deutschland werden jährlich 66 TWh Strom und 11 TWh nicht-elektrische Energie für die technische Kälteerzeugung verwendet. Das entspricht 14 % des Strom- bzw. knapp 6 % des Primärenergiebedarfs. Die Nahrungsmittelindustrie hat mit 67 % den größten Anteil daran, gefolgt von der Gebäudeklimatisierung und Industrie mit 22 % bzw. 9 %. Die Tendenz im Gebäudeklimatisierungsbereich ist mit 100.000 zusätzlichen Anlagen pro Jahr in Deutschland stark steigend. Dabei sind Klimageräte in Wohngebäuden in Deutschland (noch) nicht typisch¹³. Die meisten Klimageräte werden in Gebäuden installiert in denen sich viele Menschen versammeln (im öffentlichen als auch im Gewerbebereich) und deren Wärme abgeführt werden muss. Die zunehmende Beliebtheit von Glasfassaden führt zu zusätzlichem Kältebedarf (BINE 2006). Diese Gebäudetypen eignen sich auch gut für die Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe. Mit dieser stehen alle für den Kühlbetrieb notwendigen Komponenten zur Verfügung, eine extra Klimaanlage ist – bei guter Auslegung – nicht mehr notwendig. Dabei können die Verfahren mit der ein Abwasserwärmepumpensystem die Kälte bereitstellt, wie im Folgenden kurz geschildert, sehr unterschiedlich sein. Werden die Heizflächen eines Gebäudes zur Kühlung verwendet ist bei allen Varianten darauf zu achten, dass es zu keiner Taupunktunterschreitung und somit zu Kondensatbildung kommt. In unseren Breiten können Temperaturen von 20 °C an den Verdampfern problemlos gefahren werden, wirken sich somit jedoch als limitierender Faktor für die Kälteleistung dieser einfachen Systeme aus (Afjei et al. 2007)¹⁴. Ist eine stärkere Abkühlung notwendig, müssen entsprechende Kühlmodule installiert werden, welche die Feuchtigkeit abführen können (Christ, Mitsdoerffer 2009).

¹³ Weniger als 1 % des Endenergieverbrauchs im Haushalt wird von Klimaanlage verbraucht (Seefeldt et al. 2007).

¹⁴ Eine Fußtemperatur jenseits von 20 °C und 29 °C wird als unbehaglich empfunden (Afjei et al. 2007).

Reversibler Betrieb der Wärmepumpe

Wie oben geschildert könnte jede Wärmepumpe durch den reversiblen Betrieb auch als Kältemaschine beispielsweise zur Raumklimatisierung eingesetzt werden. Hier würden die zu kühlenden Räume als Wärmequelle und der Abwasserstrom als Wärmesenke dienen. Im Vergleich zum Heizbetrieb ist die Leistung des Kühlbetriebes etwas geringer. Begründet ist dies dadurch, dass die im Verdichter entstehende Wärme im Heizbetrieb genutzt werden kann, im Kühlbetrieb jedoch abgeführt werden muss (effiziento 2009). Effizienz steigend wirkt sich hingegen der in Abbildung 5 gezeigte geringere Temperaturhub aus.

Kombinierter Heiz- und Kühlbetrieb

In dieser Betriebsweise ist die Wärmepumpe im Sommer weiterhin für die Warmwasserbereitung zuständig und wird den Bedarf bei guter Auslegung zu 100 % decken können. Hierfür läuft die Wärmepumpe im Heizbetrieb. Anstatt den Abwasserstrom als Wärmequelle zu verwenden kann bei Bedarf auch auf die Raumluft zurückgegriffen werden. Ist hier ein gleichzeitiger Kühl- und Wärmebedarf nicht gegeben, empfiehlt es sich neben dem Warmwasserspeicher einen Kältespeicher zu installieren. In diesen wird bei Kühlbedarf die Raumwärme, unter der Bereitstellung von Kälte, eingelagert. Dieses Temperaturniveau kann wiederum genutzt werden, die Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung zu speisen. Ist der Speicher ausreichend abgekühlt bzw. die Temperatur nur unter erhöhtem Energieaufwand weiter absenkbar, wird die Wärme, wie beim reinen Heizbetrieb, aus dem Abwasserkanal entzogen.

Die Auslegung eines solchen Systems erfordert jedoch viel Erfahrung mit dem Betreiben von Wärmepumpen, Kenntnisse über genauen Bedarf an Wärme und Kälte und ist von Fall zu Fall individuell auszulegen. Der kombinierte Betrieb stellt sich durch die „gleichzeitige“ Nutzung von Kälte und Wärme energetisch als besonders vorteilhaft dar.

Freie Kühlung:

Liegt das Temperaturniveau des Abwassers unterhalb des gewünschten Niveaus, kann dieses über die Kanalwärmtauscher direkt zu Kühlung eingesetzt werden. Das Kältemittel zirkuliert in diesem Fall ohne den Betrieb der Wärmepumpe zwischen den zu kühlenden Räumen und den Wärmetauschern.

Potenzial:

Da, wie oben beschrieben, die technischen Möglichkeiten für den Kühlbetrieb einer Wärmepumpenanlage sehr vielfältig sind¹⁵ und pauschal weder Leistungswerte der Wärmepumpen noch die Abgabe der Wärmemenge an den Abwasserstrom angegeben werden kann, ist eine Berechnung für das theoretische Potenzial der Kältenutzung durch Abwasser nicht möglich.

3.3.3 Technisches und wirtschaftliches Potenzial

Um eine Wärmepumpe technisch effizient betreiben zu können sind die folgenden Angaben als Richtwerte anzusehen:

- Trockenwetterabfluss min. 15 l/s

¹⁵ Die beschriebenen Verfahren können auch auf unterschiedlichste Weisen miteinander kombiniert werden.

- Bei Einsatz von Kanalwärmetauschern min. DN 800, sonst Bypasswärmetauscher
- Wärmeabnehmer für Wärmepumpenleistung von min. 150 kW_{th}
- Kalte Fernwärmeleitungen bis 1 km
- Nahwärmeleitungen bis ~ 100 m
- Genehmigung der Kläranlagenbetriebe für den Wärmeentzug des Abwassers

Ob eine Anlage wirtschaftlich ist, muss von Fall zu Fall geklärt werden. Sind die hier genannten technischen Voraussetzungen erfüllt, so stellen sich die beschriebenen Wärmepumpensysteme in der Regel wirtschaftlicher als konventionelle Alternativen dar. Da in der Potenzialabschätzung im Vergleich zu anderen Studien von nur 0,5 K Temperaturgradient ausgegangen wurde, ist davon auszugehen, dass das wirtschaftliche Potenzial nahe am theoretischen liegt. Würden statt der zuvor zugrunde gelegten empfohlenen Mindestgröße von 150 kW_{th} pro Aggregat, Wärmepumpenanlagen von durchschnittlich 500 kW_{th} umgesetzt, so könnten in der gesamten Bundesrepublik mit den ermittelten Potenzialen rund 1.100 elektrische Wärmepumpen bzw. rund 2.500 Gaswärmepumpenanlagen installiert werden. Damit ist die Anzahl möglicher Standorte beschränkt. Hier wird angenommen, dass es weit mehr Standorte gibt, an denen der Betrieb wirtschaftlich ist.¹⁶ Diese Annahme ist als realistisch einzuschätzen, da die Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen am ehesten bei größeren Projekten wie Schulen, Krankenhäuser, Sporthallen, Schwimmbäder und anderen öffentlichen Gebäuden gegeben ist. Weitere Einsätze für größere Wärmepumpen sind im Bereich von Industrie und Gewerbe gegeben. Geht man von durchschnittlich 2.000 Einzelprojekten aus, die erforderlich sind um das prognostizierte Wärmepotenzial zu nutzen, so bedeutet dies bezogen auf die 81 deutschen Großstädte über 100.000 Einwohner (3 davon über 1 Mio., 11 zwischen 0,5 und 1 Mio.; 24 zwischen 0,2 und 0,5 Mio. Einwohner vgl. wikipedia 2009), dass etwa 25 Projekte je Stadt über 100.000 Einwohner ausreichen, um das Potenzial umzusetzen. Bezogen auf die etwa 25 Mio. Einwohner, die in diesen 81 Städten wohnen, käme ein Projekt auf ca. 13.000 Einwohner.

In (Christ, Mitsdoerffer 2008) wurde für das Fallbeispiel einer Schule gezeigt, dass verschiedene Varianten der Abwasserwärmenutzung sich gegenüber einem konventionellen Gas-Brennwertkessel wirtschaftlicher darstellen. Untersucht wurde eine Schule mit 1.100 Schülern, die 40 m von einem Hauptsammler mit 30 l/s Trockenwetterabfluss entfernt liegt. Das konventionelle Referenzsystem Gas-Brennwertkessel wurde jeweils mit einem Kanal- bzw. Bypasswärmetauschersystem verglichen. Zudem wurde zwischen elektrischer und mit Gas betriebener Wärmepumpe unterschieden. Zur Abdeckung von Spitzenlasten wurde ergänzend zu den Wärmepumpensystemen ein Gas-Brennwertkessel angenommen. Die Jahreskosten wurden entsprechend der dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 ermittelt. Als Berechnungsgrundlagen sind ein mittlerer Zinssatz von 5 % p.a. und ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren angegeben. Die Abschätzung der Preissteigerungsrate für Strom und Gas erfolgte mit Hilfe der tatsächlichen Preissteigerungsrate der letzten 7 Jahre. Für Gas ergab dies eine durchschnittliche Preissteigerungsrate von 11 %, für Strom wurden 3,6 % in der Berechnung angesetzt. Abbildung 9 zeigt im Ergebnis, dass jede Variante der Abwärmenutzung gegenüber dem Gas-Brennwertkessel wirtschaftlich ist. Erwartungsgemäß

¹⁶ Die Firma Rabtherm geht allein in Deutschland von 20.000 möglichen Standorten aus (Studer 2008)

sind bei den Anlagen der Wärmeerzeugung weniger die Kapitalkosten von Bedeutung (blaues Balkensegment), als vielmehr die Energiekosten über die Betriebsdauer (oranges Balkensegment). Entsprechend ist das Ergebnis sehr stark abhängig von Energiepreisstiegraten v. a. bei Erdgas. Dies wurde in (Christ, Mitsdoerffer 2008) in einer Sensitivitätsanalyse untersucht mit dem Ergebnis, dass unter den gegebenen Voraussetzungen eine Abwasserwärmennutzungsanlage ab einer Preissteigerungsrate von 3,6 % bei Strom und 6 % bei Gas gegenüber einem Gas-Brennwertkessel wirtschaftlich betrieben werden kann.

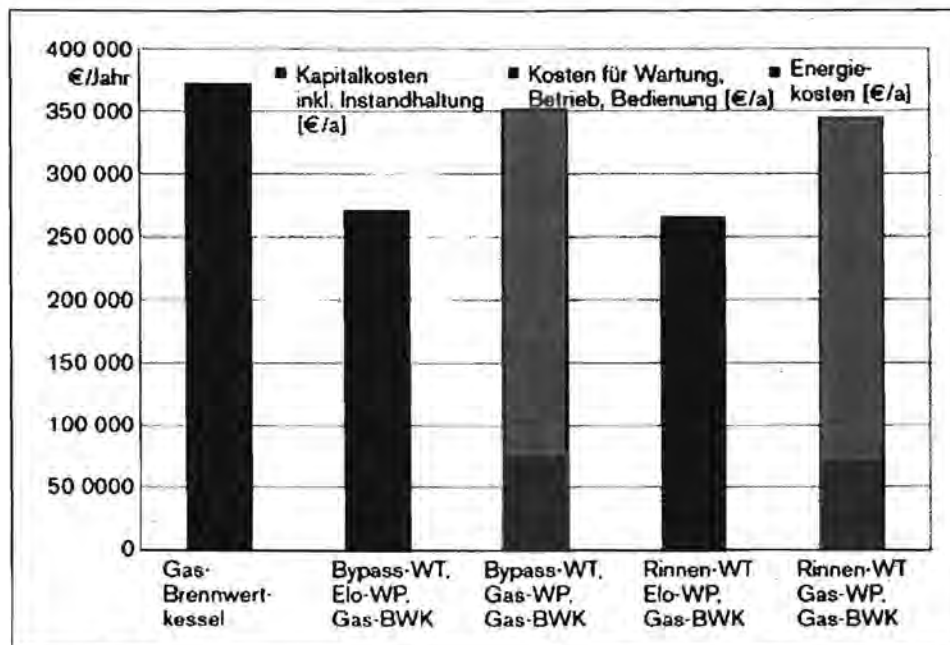


Abbildung 9: Jahreskosten unterschiedlicher Varianten von Wärmeversorgungssystemen für eine Schule; Gaspreissteigerungsrate +11% p.a., Strom +3,6% p.a. (Quelle: Christ, Mitsdoerffer 2008)

3.3.4 Treibhausgaseinsparpotenzial für Deutschland

In Abschnitt 3.3.1 wurde das Wärmepotenzial aus Abwasser in Deutschland konservativ zu 418 MW bzw. 3.665 GWh/a ermittelt. Je nachdem, ob dieses Wärmepotenzial über elektrische Wärmepumpen oder Gaswärmepumpen nutzbar gemacht wird, ergeben sich daraus unterschiedliche jährlich nutzbare Wärmemengen und sind zur Bereitstellung dieser unterschiedliche Mengen an Strom bzw. Erdgas einzusetzen.

Zur Ermittlung des Einsparpotenzials von Treibhausgasen wird hier angenommen, dass das gesamte Wärmeleistungspotenzial genutzt werden kann. Nachfolgend wird die erzielbare Treibhausgaseinsparung zunächst für das ermittelte Wärmepotenzial aus Abwasser dargestellt. Da die Abwasserwärme nur über den Einsatz von Wärmepumpen nutzbar gemacht werden kann, wird zudem auch das Treibhausgaseinsparpotenzial der beiden Pumpensysteme aufgezeigt. Der dabei erforderliche Energieeinsatz (Strom, Gas) wird in der Berechnung berücksichtigt. Als Nutzung wird eine Verwendung als Heizwärme in Haushalten unterstellt. Heizungswärme in Haushalten wird in Deutschland etwa zu 50 % aus Erdgas erzeugt und zu 50 % aus Heizöl. Dieser Mix wird zur Anrechnung der Gutschriften verwen-

det. Es werden konservativ Emissionsfaktoren für innovative Heizsysteme verwendet und für die Strombereitstellung der Emissionsfaktor für die durchschnittliche Stromerzeugung in Deutschland:

Gas (Brennwertkessel):	249 g CO ₂ -Äq/kWh _{th}
Öl (Brennwertkessel):	311 g CO ₂ -Äq/kWh _{th}
Strom (Mix D 2006):	598 g CO ₂ -Äq/kWh _{el}

Damit ergibt sich die in Tabelle 4 gezeigte Treibhausgaseinsparung für das ermittelte Wärmepotenzial aus Abwasser bzw. für dessen Nutzbarmachung über die beiden möglichen Pumpensysteme.

Tabelle 4: Treibhausgaseinsparung für Abwasserwärmepotenzial und dessen Nutzbarmachung über Wärmepumpensysteme in Deutschland

	Einheit	Abwasserwärme (rd. 15°C)	Elektrische Wärmepumpe	Gaswärmepumpe
Wärmepotenzial	GWh/a	3.665	4.887	10.995
Energieeinsatz	GWh/a		1.222	7.330
Treibhausgasbelastung aus Energieeinsatz	t CO ₂ -Äq/a		730.742	1.825.209
Treibhausgaseinsparung aus Wärmepotenzial	t CO ₂ -Äq/a	1.026.157	1.368.209	3.078.470
Nettoeinsparung Treibhausgase	t CO₂-Äq/a		637.467	1.253.377

Durch das hier ermittelte Abwasserwärmepotenzial könnten rd. 1 Mio. t CO₂-Äq eingespart werden. Allerdings liegt das Temperaturniveau der Abwasserwärme mit etwa 10-15°C in der Heizperiode zu niedrig. Die Temperatur muss erst über Wärmepumpe angehoben werden.

Bei Einsatz einer elektrischen Wärmepumpe liegt die Nettoeinsparung an Treibhausgasen bei rd. 0,6 Mio. t CO₂-Äq/a, bei Einsatz einer Gaswärmepumpe bei rd. 1,25 Mio. t CO₂-Äq/a. Die etwa doppelt so hohe Treibhausgaseinsparung der Gaswärmepumpe gegenüber der elektrischen Wärmepumpe ergibt sich, da über diese etwa doppelt so viel Wärme erzeugt wird. Im Grundsatz sind die beiden hier beschriebenen Pumpensysteme ökologisch gleichwertig. Welche Pumpe eingesetzt wird, ist in Abhängigkeit des Wärmebedarfs im Anwendungsfall abzuwägen.

Derzeit werden in Deutschland jährlich 930 Mio. Tonnen Treibhausgase emittiert (UBA 2008b). Pro Einwohner in Deutschland sind dies 11,3 t CO₂-Äq/a. Das Einsparpotenzial der Abwasserwärmenutzung über Wärmepumpen entspricht damit den Jahresemissionen, wie sie durchschnittlich von rd. 56.000 bis 111.000 Einwohnern in Deutschland verursacht werden. Dieses Einsparpotenzial könnte durch Anlagen, die auch zur Kälteerzeugung eingesetzt werden, noch erhöht werden. Zumindest würde hierdurch die Erreichung der prognostizierten Einsparpotenziale erleichtert (vgl. auch Kapitel 3.3.2).

3.4 Potenzial in der EU 27

3.4.1 Abschätzung des nutzbaren Wärmepotenzials im Abwasser

Hinsichtlich der Abschätzung eines Potenzials auf europäischer Ebene ist die Datenlage insgesamt vergleichsweise eingeschränkt und lückenhaft. Die weitestgehende Verfügbarkeit findet sich für den Parameter „angeschlossene Einwohner an kommunale Kläranlagen mit sekundärer Behandlung bzw. mit tertiärer Behandlung in Prozent. Allerdings sind auch für diese Angaben keine einheitlichen Bezugsjahre verfügbar. Die Bezugsjahre der jeweils aktuellen bei Eurostat verfügbaren Daten reichen für einzelne Länder bis 1994 zurück, für andere Länder liegen die Angaben bis 2007 vor (siehe Tabelle 5).

Es liegen zwar auch Zahlen zum Anschlussgrad an die Kanalisation mit einer verhältnismäßig guten Abdeckung für die EU 25 vor, auf die Verwendung dieser Angaben wurde allerdings verzichtet, da hierunter auch z.B. die Strecken in ländlichen Regionen zur direkten Ableitung in das nächste Gewässer erfasst werden. Die Angaben zu den angeschlossenen Einwohnern an Kläranlagen mit sekundärer oder tertiärer Behandlung spiegeln also auch ein Mindestmaß an Urbanisierung wieder.

In Verbindung mit den absoluten aktuellen Bevölkerungszahlen lassen sich die Prozentangaben in absolute Angaben überführen. (siehe Tabelle 5 letzte Spalte). Insgesamt ergibt sich eine Gesamtbevölkerung die an qualifizierte Kanalisation mit anschließender Abwasserreinigung angeschlossen ist von 378,8 Mio. Einwohnern. Allerdings sollte beachtet werden, dass allein 84 % hiervon in den 7 Ländern Deutschland, Spanien, Frankreich, Italien, Niederlande, Polen und UK leben.

Tabelle 5: Verfügbare Informationen zum Anschlussgrad an die Abwasserreinigung in den Ländern der Europäischen Union (EU 27)

	Angeschlossene Einwohner						
	„Sekundärbehandlung“			„Tertiärbehandlung“			Sekundär + Tertiär Behandlung
	Berichts Jahr ¹⁾	%	Mio. ²⁾	Berichts Jahr ¹⁾	%	Mio. ²⁾	Mio. Einwohner
Belgien	2005	19	2,0	1998	16	1,7	3,7
Bulgarien	2007	39	3,0	2007	1	0,1	3,1
Tschech. Republik	2007	15	1,6	2007	60	6,2	7,8
Dänemark	1998	3	0,2	1998	84	4,6	4,8
Deutschland	2005	1	0,8	2005	96	79,0	79,8
Estland	2005	25	0,3	2005	48	0,6	0,9
Irland	2005	70	3,0	2005	12	0,5	3,5
Griechenland	1997	14	1,6	1997	10	1,1	2,7
Spanien	2007	56	25,1	2007	42	18,8	43,9
Frankreich	2004	37	23,5	2007	42	26,7	50,2
Italien	2005	10	5,9	2005	84	49,9	55,8
Zypern	2005	12	0,1	2005	18	0,1	0,2
Lettland	2007	25	0,6	2007	38	0,9	1,5
Litauen	2007	25	0,8	2007	36	1,2	2,0
Luxemburg	2003	66	0,3	2003	22	0,1	0,4
Ungarn	2004	22	2,2	2004	20	2,0	4,2
Malta	2007	0	0,0	2007	13	0,1	0,1
Niederlande	2002	14	2,3	2004	91	14,9	17,2
Österreich	2006	4	0,3	2006	88	7,3	7,6
Polen	2007	21	8,0	2007	41	15,6	23,6
Portugal	2007	34	3,6	2007	14	1,5	5,1
Rumänien	:	:	:	:	:	:	:
Slowenien	2007	34	0,7	2007	13	0,3	1,0
Slowak. Republik	:	:	:	:	:	:	:
Finnland	2001	0	0,0	2002	81	4,3	4,3
Schweden	2006	5	0,5	2006	81	7,4	7,9
Vereinigtes König- reich	1994	64	39,0	1994	14	8,5	47,5
Summe EU 27 ³⁾	–	–	125,4	--	--	253,4	378,8

- ¹⁾ Letztes Jahr für das Angaben zum Anschluss in % vorliegen; Quelle: Eurostat: Date of extraction: Mon, 30 Mar 09 05:06:41; Last update: Thu Feb 12 09:51:03 MET 2009
- ²⁾ Berechnung mit der verfügbaren Angabe zum Anschluss in % sowie mit den Einwohnerzahlen für 2007; Quelle für die Einwohnerzahlen: Eurostat: Date of extraction: Mon, 30 Mar 09 05:37:39; Last update: Fri Feb 13 22:30:20 MET 2009
- ³⁾ ohne Rumänien und Slowakei
- : = keine Angaben verfügbar

Mangels qualifizierter Informationen werden für die Abschätzung der verfügbaren Wassermengen und Wärmepotentiale die folgenden Annahmen getroffen:

- 10 % der Anwohner sind an Kanalnetze angeschlossen bei denen der Abwasserstrom für qualifizierte Wärmetauscher nicht ausreicht < 15 l/s (zum Vergleich: in Deutschland sind das 5 %).
- Durchschnittlich wird eine Wassermenge von 75 m³/a pro angeschlossenen Einwohner angesetzt (Deutschland zwischen 80 und 90 m³/a)
- Die nutzbare Kapazität für Wärmegewinnung beträgt 0,5°K entsprechend 0,58 kWh Wärme (entspricht dem Ansatz für Deutschland)

Damit ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten verfügbaren Wasser- und Wärmemengen. Anhand dieser Berechnungsmethode ergäbe sich für Deutschland lediglich ein theoretisches Potenzial der Wärmenutzung von 356,6 MW, gegenüber den 418 MW entsprechend der detaillierten nationalen Berechnung.

Als Summe ergibt diese vorsichtige Schätzung für die EU 27 ein Potenzial von 1.693 MW oder bezogen auf die Gesamtbevölkerung von 495,1 Mio. Einwohnern im Jahr 2007 ein spezifisches Potenzial von 3,4 Watt je Einwohner. Mit diesem Potenzial kann der Wärmebedarf von ca. 1 Mio. Haushalte gedeckt werden.

Die oben ermittelten 418 MW für Deutschland ergeben bei 82,2 Mio. Einwohnern ein spezifisches Potenzial von 5,1 Watt je Einwohner. Würde in Europa in den nächsten Jahren ein ähnlich hoher Anschlussgrad und der spezifische Wert wie in Deutschland erreicht, stünde entsprechend den Annahmen für Deutschland EU-weit ein Potenzial von 2.520 MW zur Verfügung. Da wie beschrieben, das für Deutschland prognostizierte Potenzial konservativ angesetzt wurde, wäre eine entsprechende Umsetzung in Europa, auch unter Berücksichtigung des geringeren Wärmebedarfs in Südeuropa möglich. Insbesondere wenn dort die Wärme verstärkt zur Kälteerzeugung eingesetzt würde (vgl. auch Kapitel 3.3.2).

Tabelle 6: Theoretisches Potenzial der Wärmenutzung in den Ländern der Europäischen Union (EU 27)

	Mrd. m ³	MW
Belgien	0,250	16,5
Bulgarien	0,209	13,9
Tschech. Republik	0,527	34,9
Dänemark	0,324	21,5
Deutschland	5,387	356,6
Estland	0,061	4,0
Irland	0,236	15,6
Griechenland	0,182	12,1
Spanien	2,963	196,2
Frankreich	3,389	224,4
Italien	3,767	249,4
Zypern	0,014	0,9
Lettland	0,101	6,7
Litauen	0,135	8,9
Luxemburg	0,027	1,8
Ungarn	0,284	18,8
Malta	0,007	0,4
Niederlande	1,161	76,9
Österreich	0,513	34,0
Polen	1,593	105,5
Portugal	0,344	22,8
Rumänien	:	:
Slowenien	0,068	4,5
Slowak. Republik	:	:
Finnland	0,290	19,2
Schweden	0,533	35,3
Vereinigtes Königreich	3,206	212,3
Summe EU 27 ¹⁾	25,569	1692,9

Quelle: eigene Berechnungen

¹⁾ ohne Rumänien und Slowakei

: = keine Angaben verfügbar

3.4.2 Treibhausgaseinsparpotenzial in der EU 27

In Abschnitt 3.3.4 wurde das Treibhausgaseinsparpotenzial aus Abwasser in Deutschland ermittelt. Nach dem gleichen Vorgehen erfolgt in diesem Kapitel die entsprechende Berechnung für die EU 27, in Abhängigkeit der Nutzbarmachung mittels elektrischer Wärmepumpen oder Gaswärmepumpen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Wärmepotenziale aus Abwasser in der EU 27 bei Nutzung über elektrische Wärmepumpe oder Gaswärmepumpe

	Elektrische Wärmepumpe (JAZ = 4)		Gaswärmepumpe (JHZ = 1,5)	
	Wärmeleistung in MW	Wärmepotenzial in GWh/a	Wärmeleistung in MW	Wärmepotenzial in GWh/a
Abwasser	1.693	14.830	1.693	14.830
Strom	564	4.940		
Gas			3.386	29.660
Summe	2.257	19.770	5.079	44.490

Abweichungen in den Summen ergeben sich durch Rundungsungenauigkeiten

Für die EU 27 werden bzgl. der Gasbereitstellung bzw. der Gutschriften für erzeugte Wärme die gleichen Emissionsfaktoren angesetzt wie für Deutschland. Abweichend wird für die Strombereitstellung der Wert für EU 27 Strom angesetzt:

Gas (Brennwertkessel): 249 g CO₂-Äq/kWh_{th}

Öl (Brennwertkessel): 311 g CO₂-Äq/kWh_{th}

Strom (Mix EU27 2004): 541 g CO₂-Äq/kWh_{el}

Damit ergeben sich die in Tabelle 8 gezeigten Treibhausgaseinsparungen.

Tabelle 8: Treibhausgaseinsparung für Abwasserwärmepotenzial und dessen Nutzbarmachung über Wärmepumpensysteme in der EU 27

	Einheit	Abwasserwärme (rd. 15°C)	Elektrische Wärmepumpe	Gaswärmepumpe
Wärmepotenzial	GWh/a	14.830	19.770	44.490
Energieeinsatz	GWh/a		4.940	29.660
Treibhausgasbelastung aus Energieeinsatz	t CO ₂ -Äq/a		2.676.406	7.385.242
Treibhausgaseinsparung aus Wärmepotenzial	t CO ₂ -Äq/a	4.152.345	5.536.460	12.457.035
Nettoeinsparung Treibhausgase	t CO₂-Äq/a		2.860.054	5.071.793

Durch das hier ermittelte Abwasserwärmepotenzial für die EU 27 könnten rd. 4,1 Mio. t CO₂-Äq eingespart werden. Diese Wärme ist aber aufgrund der niedrigen Temperatur (10-15°C in der Heizperiode) erst über Wärmepumpe nutzbar. Bei Einsatz einer elektrischen Wärmepumpe liegt die Nettoeinsparung an Treibhausgasen bei rd. 2,86 Mio. t CO₂-Äq/a, bei Einsatz einer Gaswärmepumpe bei rd. 5,07 Mio. t CO₂-Äq/a. Auch hier gilt wie schon bei den Ergebnissen für Deutschland beschrieben, dass die etwa doppelt so hohe Treibhausgaseinsparung der Gaswärmepumpe gegenüber der elektrischen Wärmepumpe sich aufgrund der etwa doppelt so hohen erzeugten Wärmemenge ergibt, die zu 75 % aus Erdgas resultiert.

Spezifisch liegen die Treibhausgaseinsparungen grob gleich. Welche Wärmepumpe eingesetzt wird, ist in Abhängigkeit des Wärmebedarfs im Anwendungsfall abzuwägen.

In der EU 27 wurden im Jahr 2007 insgesamt 5.047 Mio. t CO₂-Äq emittiert (EC 2008). Pro Einwohner in der EU 27 sind dies im Durchschnitt 10,2 t CO₂-Äq/a. Das Einsparpotenzial der Abwasserwärmenutzung entspricht damit in der EU 27 den Treibhausgasjahresemissionen wie sie von durchschnittlich 280.000 bis 497.000 EU-Bürgern verursacht werden. Unterstellt man für die EU 27 ein spezifisches nutzbares Wärmepotenzial im Abwasser wie in Deutschland, läge das Einsparpotenzial zwischen 4,2 Mio. und 7,5 Mio. t CO₂-Äq/a. Wiederum besteht ein deutlich höheres Einsparpotenzial bei Kältenutzung.

3.5 Zusammenfassung zu Wärmepotenzial aus Abwasser

Abwasser stellt eine eigene langfristig sichere Energiequelle dar. In der Schweiz aber auch in Deutschland gibt es zahlreiche Systeme und Praxisbeispiele, welche die Alltagstauglichkeit der Wärmenutzung aus dem Abwasser unter Beweis stellen. Der wirtschaftliche Betrieb ist immer dann gegeben, wenn sich geeignete Abnehmer in ausreichender Nähe finden.

Nach konservativen Abschätzungen und Berechnungen können mittels der Wärmenutzung aus der Abwasserkanalisation je nach eingesetzter Technologie in Deutschland 0,6 Mio. bis 1,25 Mio. t CO₂-Äq/a eingespart werden. Dies entspräche den Treibhausgasemissionen wie sie von 56.000 bis 111.000 Einwohnern in Deutschland verursacht werden). In der EU 27 könnten bei vorsichtiger Abschätzung der Potenziale insgesamt 2,86 Mio. bis 5,07 Mio. t CO₂-Äq/a eingespart werden. Dies ist mehr als das 4-fache von Deutschland und vergleichbar mit den Treibhausgasemissionen, wie sie von 280.000 bis 497.000 EU-Bürgern verursacht werden.

Da sich die Abwasserwärmenutzung i. d. R. als wirtschaftlich darstellt, sollte allgemein verstärkt darauf hingewiesen werden, diese als eine etablierte Möglichkeit der Wärme- und Kälteerzeugung zu berücksichtigen. Besonders im städtischen Bereich mit hoher Bebauungsdichte können mit der Nutzung des Kanalabwassers in der Einzelfallbetrachtung häufig günstiger Treibhausgasemissionen reduziert werden, als das bei den sonst üblichen effizienten bzw. erneuerbaren Technologien (Solarthermie, Photovoltaik, BHKW, etc.) der Fall wäre.

4 Potenzial der Faulgasnutzung

4.1 Einführung

Aus dem kommunalen und industriellen Bereich anfallendes Abwasser kann auf unterschiedliche Arten behandelt werden. Grundvoraussetzung für eine Faulgaserzeugung ist die Sammlung des Abwassers und die anaerobe Behandlung von anfallendem Rohschlamm (Abbildung 10). In Industrieländern wird Abwasser nur noch vereinzelt nicht gesammelt und stattdessen in abflusslosen Gruben gefasst. In Entwicklungsländern ist dies häufiger der Fall, oft wird Abwasser dort auch unbehandelt in Gewässer eingeleitet oder auf Böden aufgebracht. Die Abwasserbehandlung in Kläranlagen kann aerob oder anaerob erfolgen. In industrialisierten Ländern überwiegt die aerobe Abwasserbehandlung in zentralen Anlagen.

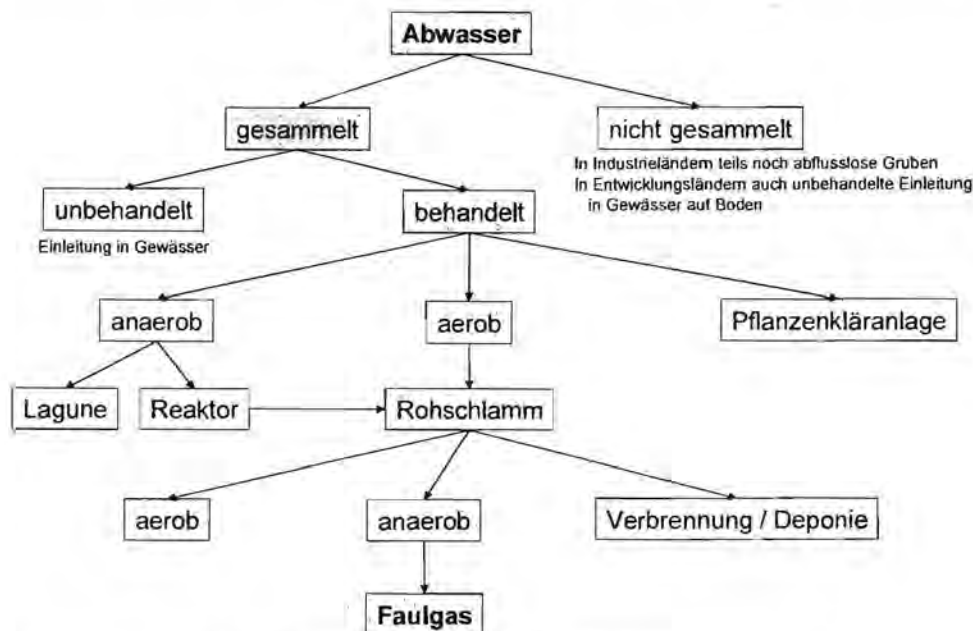


Abbildung 10: Abwasserbehandlungsmöglichkeiten – Faulgaserzeugung

Die zentrale Abwasserbehandlung kann aus einer primären, sekundären und tertiären Behandlungsstufe bestehen. Aus allen drei Bereichen fällt Rohschlamm an. Primärschlamm aus der mechanischen Vorklärung (physikalische Abtrennung von absetzbaren Stoffen), Sekundärschlamm (Überschussschlamm oder Tropfkörperschlamm¹⁷) aus der zweiten, biologischen Behandlungsstufe, der durch den Zuwachs an nicht zurückgeführtem belebten Schlamm gebildet wird (Zuwachs Biomasse und Feinpartikel) und Tertiärschlamm, der aus der dritten Reinigungsstufe durch Fällung, Flockung oder nachgeschaltete Abwasserfilter

¹⁷ Biologische Reinigungsstufen sind in Deutschland zumeist als Belebungsverfahren ausgelegt. Tropfkörperverfahren sind v. a. an kleineren Kläranlagen anzutreffen. Hinsichtlich der Behandlungserfolge unterscheiden sich die beiden Verfahren nicht signifikant (MUNLV 2001).

entsteht (Phosphateliminierung, weitergehende Reinigung). Diese unbehandelten Schlämme aus der Abwasserbehandlung bilden den Rohschlamm, der üblicherweise einen Trockensubstanzgehalt von 2-5 % aufweist. Aufgrund des hohen Anteils organischer Substanzen muss Rohschlamm weiter behandelt bzw. stabilisiert werden. Ziel der Schlammstabilisierung ist es, den Schlamm soweit zu verändern, dass die Faulprozesse nicht mehr unkontrolliert ablaufen können. Grundsätzlich kommen folgende Behandlungsarten für Rohschlamm in Frage:

- anaerobe Stabilisierung in Faulbehältern, wobei Faulgas entsteht
- aerobe Behandlung (offenes Becken mit Sauerstoffeinleitung)
- (ggf. nach Entwässerung) Verbrennung oder Deponierung

Die Deponierung ist in Deutschland nicht mehr erlaubt. Die Stabilisierung erfolgt in Deutschland zum überwiegenden Teil anaerob, d.h. unter Ausschluss von Luft in ein- oder zweistufigen Faulbehältern auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, zumeist allerdings bei etwa 35°C. Durch die Faulung des Rohschlammes wird der enthaltene organische Anteil um etwa die Hälfte abgebaut. Die Technik der Schlammfaulung ist langjährig etabliert, Unterschiede sind in der Prozessführung und in Reaktortypen gegeben. Aus der Faulung entsteht Faulgas und des Weiteren Klärschlamm.

Im Rahmen dieser Studie wird vereinbarungsgemäß ausschließlich das Optimierungs- bzw. Treibhausgaseinsparungspotenzial aus der Faulgaserzeugung und -nutzung untersucht. Die nach der Rohschlammbehandlung folgende Klärschlamm Entsorgung ist explizit aus der Untersuchung ausgenommen.

4.1.1 Vorgehen Potenzialermittlung

Die Potenzialanalyse wird in zwei Stufen durchgeführt.

- 1) Zum einen wird ermittelt wie viele der bestehenden Abwasserbehandlungsanlagen bislang keine anaerobe Schlammbehandlung durchführen. Die daraus potenziell resultierende Klärgasmenge wird in die Betrachtung einbezogen.
- 2) Des Weiteren wird untersucht wie produziertes Klärgas aktuell eingesetzt wird und welche Potenziale sich aus einer optimierten Klärgasnutzung ergeben können.

Für Deutschland wird nicht untersucht, welche Effekte sich aus einem 100%igen Anschlussgrad ergeben würden. Da nach aktuellem Berichtsstand des Statistischen Bundesamtes (STBA 2006) im Jahr 2004 bereits 94% der Einwohner an Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossen waren, wird davon ausgegangen, dass eine Steigerung auf 100% aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll ist. Für die Potenzialermittlung der EU 27 wird im Einzelnen geprüft, ob eine Steigerung des Anschlussgrades in die Betrachtung mit aufgenommen werden kann.

Der Betrachtungsrahmen der Potenzialermittlung ist auf die Faulgaserzeugung und -nutzung fokussiert. Die Quantifizierung des Beitrages zum Klimaschutz erfolgt für die oben genannten beiden Punkte. Ausgehend von der Ist-Situation wird die mögliche Treibhausgaseinsparung durch eine höhere Klärgasmenge und durch effizientere Klärgasnutzungsoptionen berechnet. Veränderungen, die sich gegenüber der in Deutschland auch gegebenen Praxis der aeroben Schlammstabilisierung sowie der direkten Rohschlammverbrennung (ggf. nach Entwässerung) ergeben wurden untersucht, diese können aber im Rahmen des Projektes nur qualitativ in die Bewertung einfließen. Für eine Untersuchung im Sinne der Ökobilanz-

norm wäre eine vollständige quantitative Lebensweganalyse des Ist-Zustandes gegenüber Optimierungsvarianten erforderlich. Wie jedoch die nachfolgende qualitative Beurteilung zeigen wird, können die ermittelten Potenziale diesbezüglich als ergebnissicher angesehen werden.

4.1.2 Qualitative Beurteilung der Umstellung auf anaerobe Schlammbehandlung hinsichtlich Klimaschutzeffekten und Faulgaserzeugung

Für die qualitative Beurteilung einer Umstellung wird zunächst davon ausgegangen, dass die Abwasserbehandlung grundsätzlich aerob erfolgt. Dies ist in Deutschland, aber auch weitgehend in Industrieländern der Fall. Damit besteht die Umstellung einzig aus dem Wechsel von entweder einer aeroben Schlammstabilisierung oder einer Rohschlammverbrennung zu einer anaeroben Schlammstabilisierung. Ggf. treffen für die EU 27 weitere Schlammbehandlungsverfahren zu. Insofern diese in relevanten Größenordnungen erfolgen, werden sie im EU 27 Teil aufgegriffen.

Die aerobe Schlammbehandlung ist genauso wie die aerobe Abwasserbehandlung in Folge der Anwesenheit von Sauerstoff nicht mit nennenswerten **Methanemissionen** verbunden (IPCC 2006, UBA 2009). Die anaerobe Schlammbehandlung dagegen hat die Methanergzeugung zum Ziel. Eine offene Schlammfäulung wie sie z.B. Anfang der 90er Jahre noch in Ostdeutschland betrieben wurde, hat heutzutage in Deutschland keine Relevanz mehr (UBA 2009). Die anaerobe Schlammbehandlung erfolgt in gasdichten Faulbehältern mit Gasfassung und anschließender Nutzung des erzeugten Faulgases. Bei entsprechender Betriebsführung und Ausstattung der Anlagen ist nur mit geringen Methanverlusten zu rechnen, so dass im Grundsatz nicht von einer Erhöhung der Methanemissionen bei Umstellung von aerob auf anaerobe Schlammbehandlung ausgegangen wird.

Als weitere relevante Treibhausgasemissionen treten bei der Abwasserbehandlung **Lachgasemissionen** auf. Diese entstehen auf der Kläranlage ausschließlich bei der Stickstoffeliminierung als Zwischenprodukt der biologischen Abbauprozesse Nitrifikation und insbesondere der Denitrifikation. Diese weitergehende biologische Behandlung spielt für eine Umstellung von aerob auf anaerobe Schlammstabilisierung zunächst keine Rolle. Allerdings sind es z.B. in Deutschland v. a. kleinere Anlagen, die Schlamm aerob stabilisieren und diese Anlagen verfügen häufig nur über eine einfache biologische Behandlung (C-Elimination). Sollte mit einer Umstellung auf eine anaerobe Schlammbehandlung auch die Einführung einer weitergehenden biologischen Abwasserbehandlung durch Nitrifikation/Denitrifikation verbunden sein, so würden hieraus Lachgasemissionen aus der Kläranlage entstehen. Allerdings gilt nach (IPCC 2006), dass Lachgasemissionen durch Nitrifikation/Denitrifikation generell anfallen nachdem gereinigtes Abwasser in Oberflächengewässer abgeleitet wurde. Die dort entstehenden Emissionen liegen typischerweise viel höher als die auf der Kläranlage anfallenden, zudem wären nach (IPCC 2006) die auf der Kläranlage gegebenen Lachgasemissionen von den nach der Einleitung Anfallenden abzuziehen, d. h. sie entstehen in jedem Fall, nur würde für einen kleinen Teil davon der Ort der Entstehung verlagert werden. Insofern ist für eine Umstellung hier kein Einfluss durch Lachgasemissionen zu berücksichtigen.

Anders liegt der Fall bei einer Umstellung von einer **Rohschlammverbrennung** auf Fäulung. Die Rohschlammverbrennung erfolgt i. d. R. durch Monoverbrennung in einer Wirbelschichtfeuerungsanlage. Zur Einhaltung der NO_x-Emissionen wird die Feuerung dieser Anlagen unter niedrigen Temperaturen und sauerstoffarm gefahren. Dies hat höhere N₂O-Emissionen zur Konsequenz. Die Ursachen des N₂O-Bildungsmechanismus sind bislang nicht bekannt.

Die Problematik findet sich z.B. auch in (ATV 1996) beschrieben. Nach Auskunft von Betreibern liegen die resultierenden Lachgasemissionen etwa bei 180 mg/Nm^3 teilweise aber auch darüber¹⁸. Bei der Rohschlammverbrennung wirkt sich dieser Umstand gegenüber einer Verbrennung von anaerob stabilisiertem Schlamm nachteiliger aus. Aufgrund des etwa doppelt so hohen Organikgehaltes im Rohschlamm wird ein höheres Abgasvolumen und damit eine höhere Lachgasfracht verursacht. Zudem erfordert die Rohschlammverbrennung aufgrund des hohen Wassergehaltes im Rohschlamm (60-90% je nach Vorbehandlung) in der Regel eine Zufeuerung mit beispielsweise Erdgas. Im Rahmen dieser Untersuchung werden diese Effekte nicht in das Treibhausgaseinsparpotenzial eingerechnet, da dies einer umfassenderen Bilanzierung bedürfte, die über den Projektumfang hinausgeht. Ausgehend von Ergebnissen in (IFEU 2009) kann aber festgehalten werden, dass eine Umstellung von einer Rohschlammverbrennung auf anaerobe Schlammbehandlung das Treibhausgaseinsparpotenzial weiter steigern würde.

Sind Kläranlagen nur mit einer C-Eliminierung ausgestattet, so hat dies auch Einfluss auf die **Rohschlammmenge und -qualität** und damit auf das **Faulgasbildungspotenzial**. Die Nitrifikation/Denitrifikation führt in der Regel zu einer Verringerung der organischen Substanz im Rohschlamm, zum einen da die Denitrifikation auf die Anwesenheit von organischem Kohlenstoff angewiesen ist, zum anderen, da die Nitrifikanten (autotroph) langsamer wachsen als heterotrophe Mikroorganismen¹⁹ und insofern ein höheres Schlammalter als bei einer reinen C-Elimination nötig ist, was wiederum eine geringere Abbaurate im Fermenter und damit geringere Gasausbeute zur Folge hat. Auch von Einfluss für die Gasausbeute ist die Vorklärung bzw. der daraus für die Faulung verfügbare Primärschlamm. Bei sehr kleiner Vorklärung ($< 0,5 \text{ h}$) bzw. Verzicht auf die Vorklärung ist mit deutlich geringerer Faulgasproduktion zu rechnen. Anlagen ohne Vorklärung werden nur selten mit einer Schlammfaulung betrieben, da dies unwirtschaftlich sein kann. Die Vorklärung sollte allerdings auch nicht zu lange sein ($< 2 \text{ h}$), da sich dies nachteilig auf die Denitrifikation auswirken kann (C-Mangel). In Abhängigkeit von der Betriebsweise der biologischen Reinigungsstufe sind nach (ATV DVWK 2002) die in Tabelle 9 zusammengestellten Gasausbeuten zu erwarten.

¹⁸ Mitteilung der Anlage Vera in Hamburg; bestätigt in laufendem Projektzusammenhang (IFEU 2009)

¹⁹ autotrophe (ernähren sich ausschließlich von anorganischen Stoffen) Mikroorganismen haben nur eine überaus geringe Vermehrungsrate. Die Generationszeit von Nitrifikanten liegt bei ca. 12 Stunden, die der heterotrophen (benötigen Kohlenstoff aus synthetisierten organischen Verbindungen) Mikroorganismen dagegen bei nur 2 Stunden.

Tabelle 9: Abhängigkeit des zu erwartenden Klärgasanfalls von der Verfahrenspraxis der Abwasserreinigung (ATV-DVWK 2002)

Betriebsweise der biologischen Reinigungsstufe	organische Belastung der Belebung	zu erwartender spezifischer Klärgasanfall
Schlammalter in der Belebungsstufe (BB) $t_{TS} = 8$ d (Nitrifikation im Sommer, ggf. Teildenitrifikation)	Zulauf Belebung 35 g BSB ₅ /(EW · d) (große Vorklämung)	Mittelwert: 20,7 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 16,5 - 25 l/(EW*d)
Schlammalter (BB) $t_{TS} = 15$ d (weitgehende Nitrifikation u. Denitrifikation ganzjährig)	Zulauf Belebung 35 g BSB ₅ /(EW · d)	Mittelwert: 18,3 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 14,5 - 22 l/(EW*d)
Schlammalter (BB) $t_{TS} = 15$ d	Zulauf Belebung 48 g BSB ₅ /(EW · d) (keine Vorklämung, Grobentschlammung)	Mittelwert: 13,2 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 10,5 - 15,9 l/(EW*d)
Schlammalter (BB) $t_{TS} = 15$ d	Zulauf Belebung 60 g BSB ₅ /(EW · d) (ohne Vorklämung)	Mittelwert: 7,8 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 6,2 - 9,4 l/(EW*d)
Aerobe Stabilisierung $t_{TS} = 25$ d	Zulauf Belebung 60 g BSB ₅ /(EW · d) (ohne Vorklämung)	Mittelwert: 4,4 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 3,5 - 5,3 l/(EW*d)

Die anfallende Faulgasmenge ist – ebenso wie die Gasinhaltsstoffe – nicht nur abhängig von der Zusammensetzung des Rohschlammes und der Verfahrensführung der Abwasserbehandlung, sondern auch von der Verweildauer und dem Auslastungsgrad im Faulbehälter, der Faulbehältertemperatur und -ausrüstung. Nach (MUNLV 1999) ist bei einer Halbierung der Verweilzeit im Fermenter mit einer Verringerung der Faulgasmenge um 10 % zu rechnen. Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren ist zu erkennen, dass Quantität und Qualität von Kläranlage zu Kläranlage deutlich schwanken können. Die spezifische Faulgasproduktion befindet sich in Schwankungsbreiten von etwa 275 - 500 l/kg eingetragener organischer Trockensubstanz. Abgesehen von verfahrensspezifischen Maßnahmen auf der Kläranlage kann eine Steigerung der Faulgasproduktion auf Werte über 25 l/(E*d) durch die Mitbehandlung industrieller Abwässer oder durch die Co-Fermentation von Substraten z.B. aus Lebensmittel verarbeitenden Betrieben (Öle, Fette, etc.) erreicht werden (bte, IFEU, ISA 2004). Mittlere spezifische Werte dürften bei 17 l/(E*d) liegen, dieser Wert wurde in (MUFV 2007) zur Ermittlung der Gasmenge bei Umstellung aller aerober Anlagen auf Faulung angesetzt. Insgesamt schwanken jedoch die Literaturangaben recht deutlich, so wird z.B. in (UBA 2008a) basierend auf den Angaben des statistischen Bundesamtes für 2004 ein spezifischer Faulgasanfall von 19,7 l/(EW*d) angegeben. Umgerechnet entspräche dies etwa einem spezifischen Wert bezogen auf angeschlossene Einwohner von >30 l/(E*d). Im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ (MUNLV 1999) werden die in Tabelle 10 aufgeführten Richt- und Idealwerte für den spezifischen Klärgasanfall bezogen auf die zugeführte organische Substanz genannt.

Tabelle 10: Spezifische Klärgasproduktion (MUNLV 1999)

Kläranlagengröße	spezifische Faulgasproduktion [l/kg oTR]			
	C-Elimination		(C + N)-Elimination	
	Richtwert	Idealwert	Richtwert	Idealwert
5.000 – 10.000 EW _{BSB5}	500	525	450	475
10.000 – 100.000 EW _{BSB5}	(500) ¹⁾	(525) ¹⁾	450	475
> 100.000 EW _{BSB5}	-	-	450	475
Richtwert: Aus bestehenden Feinanalysen und der Bestandsaufnahme an Kläranlagen in NRW über 10.000 EW abgeleiteter Wert, der realistisch erreicht werden kann. Idealwert: Aufgrund theoretischer Berechnungen anhand einer Modellanlage ermittelter Wert, der unter optimalen Voraussetzungen erreicht werden kann. EW: aktuelle Einwohnerwerte BSB₅, berechnet aus aktuellem Jahresmittel BSB₅ im Zulauf zur Kläranlage [60 g/(E·d)]. ¹⁾: Werte in Klammern, da diese Anlagen nach den damals geltenden rechtlichen Vorgaben nur noch für eine Übergangszeit betrieben werden durften.				

Auch für den mittleren Rohschlammanfall und die darin enthaltene organische Substanz gibt es Faustwerte. Auch hier finden sich in der Literatur ähnliche Werte, die sowohl mit Bezugsgröße (E·d) als auch (EW·d) angegeben sind. So wird in (Uni Kassel 2009) die einwohner-spezifische Rohschlammmenge mit 80 g/(E·d) angegeben, dagegen findet sich bei (Schmelz 2006) der Wert von 80 g/(EW·d) und in (UBA 2008a) wird der spezifische Rohschlammanfall für Anlagen mit Vorklärung und Schlammfäulung auf 75 g/(EW·d) beziffert²⁰. Der organische Anteil im Rohschlamm wird in (Uni Kassel 2009) angegeben als Glühverlust mit 60-70%. In (UBA 2008a) wird der o. g. spezifische Rohschlammanfall weiter differenziert nach Primär-schlamm- und Überschussschlammmanfall und für beide separat der organische Anteil angegeben, umgerechnet ergibt sich daraus ein mittlerer organischer Anteil im Rohschlamm von 69%. Beide Veröffentlichungen führen damit zu einem ähnlichen Wert an spezifischem organischem Trockenrückstandanfall, nur einmal bezogen auf Einwohner (52 g oTR/(E·d)) und einmal auf Einwohnerwerte (51 g oTR/(EW·d)).

4.1.3 Faulgasnutzungsmöglichkeiten

Faulgas besteht durchschnittlich zu ca. 64 Vol% aus Methan, zu 35 Vol% aus Kohlendioxid sowie aus geringen Mengen an Ammoniak, Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Schwefelwasserstoff und anderen Spurenstoffen (insgesamt ca. 1 Vol%). Nach (ATV-DVWK 2002) enthält Faulgas nach heutigem Kenntnisstand keine nennenswerten umweltrelevanten Verunreinigungen. Faulgas kann zu mechanischer, elektrischer und/oder thermischer Energie transformiert werden kann. Gegenwärtig ist die Faulgasverwertung auf wenige Pfade beschränkt. Dies sind im Wesentlichen die klassische Nutzung in Faulgas-Blockheizkraftwerken (BHKW) oder mittels Direktantrieben in der betrieblichen Kläranlagenpraxis. Vielfach erfolgt auch nur eine reine Wärmenutzung in Heizkesseln und auch Verluste über Fackel sind ein relevanter Aspekt. Derzeit eröffnen sich neben den etablierten Verwertungsmöglichkeiten neue Per-

²⁰ Denkbar ist auch, dass im Einzelnen nicht streng unterschieden wird zwischen angeschlossenen Einwohnern (E) und Einwohnerwerten (EW)

spektiven durch innovative Technologien der Wasserstoffenergiewirtschaft und der Brückentechnologie Erdgas, die ein vielschichtigeres Anwendungsspektrum und höhere elektrische Wirkungsgrade versprechen. Gegenwärtige und künftig mögliche Verwertungspfade für Faulgas auf kommunalen Kläranlagen zeigt Abbildung 11.

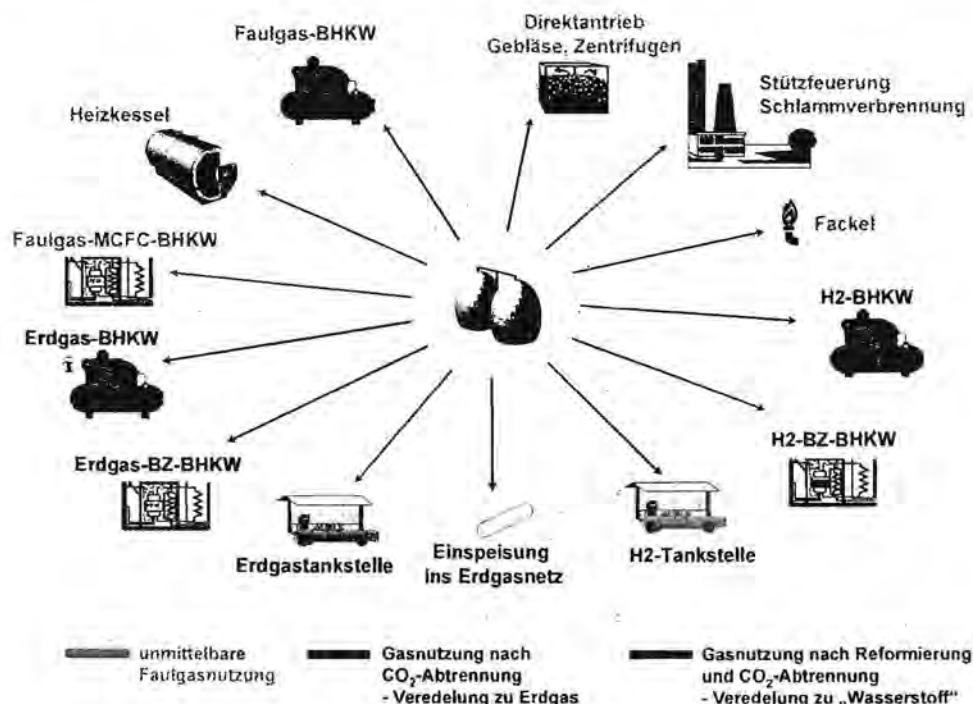


Abbildung 11: Mögliche Verwertungspfade für Faulgas (bte, IFEU, ISA 2004)

Aus den verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten wird im Rahmen dieser Studie in erster Linie auf die Nutzung in Faulgas-BHKW eingegangen. Ausgehend von der Ist-Situation wird die Effizienz der Verstromung ermittelt. Die Potenzialanalyse umfasst dann sowohl das Potenzial, das sich aus einer ausschließlichen Nutzung in Gas-BHKW ergibt und des Weiteren das Potenzial, das sich durch gesteigerte Effizienzen darstellt. Abschließend werden für das Gesamtpotenzial die potenziellen Klärgasmengen einbezogen, die sich ergeben, wenn alle Kläranlagen Faulgas erzeugen würden.

Als Ausblick wird im Weiteren das Einsparpotenzial durch die Nutzung von Klärgas in Brennstoffzellen-BHKW aufgezeigt. Diese Option ist allerdings höchstens als langfristig realisierbar anzusehen, da zwar die Technik sich derzeit in ersten Installationen bewährt (s. u.), aber die Kosten einen wirtschaftlichen Erwerb ohne Zuschuss kaum möglich machen.

Strom- und Wärmeerzeugung mit Faulgas-BHKW

In Deutschland entspricht die Verwertung von Faulgas in stationären BHKW zur Strom- und Wärmeerzeugung dem Stand der Technik. Je nach Leistungsgröße der Aggregate werden herstellerseitig elektrische Bruttowirkungsgrade zwischen 28 % und 41 % angegeben und 43 % bis 58 % für Wärme ((ASUE 2005), Köhler-Ziegler, GE Jenbacher Gasmotoren, SEV Datenblätter). Der erzeugte Strom wird vorwiegend für den Eigenbedarf der Kläranlage verwendet. Die erzeugte Wärmeenergie wird im Wesentlichen zur Wärmeversorgung der in der

Regel mesophilen Faulung und der Gebäude auf der Kläranlage genutzt. Zusätzlich kommt auf einigen Kläranlagen die Abgas- und Kühlwasserwärme zur Unterstützung der Wärmeversorgung von Schlamm Trocknungsanlagen zum Einsatz.

Im Durchschnitt wird in Deutschland in der Praxis ein elektrischer Wirkungsgrad aus der Klärgasverstromung von etwa 30 % erreicht (UBA 2008a). Demgegenüber sind nach Datenblättern von Köhler und Ziegler bzw. in (ASUE 2005), die explizit Werte für Klärgasmaschinen angeben, elektrische Wirkungsgrade von bis zu 41 % möglich, dies allerdings nur für größere Leistungsklassen ab etwa 1 MW_{el}. Aber auch unter den kleineren Leistungsklassen befinden sich Aggregate mit vergleichsweise hohem Wirkungsgrad. So z.B. mit 33 kW_{el} ein MAN Motor mit 33 % elektrischem Wirkungsgrad oder im Bereich 90 kW_{el} bis 150 kW_{el} Maschinen die elektrische Wirkungsgrade von 36 % bis 38 % aufweisen (s. a. Anhang).

Die Statistik der Klärgasverwertung in Deutschland erhebt keine Angaben zu Leistungsklassen auf den Kläranlagen. Grundsätzlich könnte über Hochrechnungen versucht werden zu ermitteln, für welche Kläranlagen-Größenklassen welche BHKW-Leistungsklassen grundsätzlich in Frage kommen. Dies würde allerdings über den Rahmen dieser Studie hinausgehen, auch ergibt sich daraus höchstwahrscheinlich aufgrund der hohen Bandbreiten bzw. Unsicherheiten bzgl. des Klärgasanfalls kein höherer Erkenntnisgewinn wie ein entsprechender Versuch hinsichtlich der Ermittlung des Klärgaspotenzials zeigt (vgl. Kap. 4.2.1). Insofern wird zur Einschätzung des Treibhausgaseinsparpotenzials durch Effizienzsteigerung vereinfacht für die nachfolgenden beiden BHKW Größenklassen, die sich in den Datenblättern von (ASUE 2005) und Köhler-Ziegler finden (s. Anhang), eine Ableitung vorgenommen:

- 1) 75 kW_{el} BHKW, elektrischer Wirkungsgrad 35 %, thermischer Wirkungsgrad 52 %
- 2) 520 kW_{el} BHKW, elektrischer Wirkungsgrad 39 %, thermischer Wirkungsgrad 41 %

Die ausgewählten Beispielaggregate werden nach Herstellerangaben im Magerbetrieb ohne Abgasreinigung gefahren. Da in den Datenblättern aber auch Aggregate mit hohen Wirkungsgraden und 3-Wege-Katalysator zu finden sind (z.B. MAN E 2876 LE in (ASUE 2005)), wird hinsichtlich der Wirkungsgrade lediglich noch der Eigenbedarf mit 1 % berücksichtigt, so dass Nettostromwirkungsgrade von 34 % und 38 % für die Potenzialberechnung angesetzt werden.

Bei beiden Aggregaten handelt es sich um Gas-Ottomotoren, die auch im Einsatz auf Kläranlagen überwiegen. Gas-Dieselmotoren erreichen zwar teilweise gerade im kleinen Leistungsbereich höhere Wirkungsgrade, weisen aber auch höhere Abgasemissionen insbesondere hinsichtlich des Methanschlupfes auf. In einer Messstudie des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU Bayern 2006) an verschiedenen Biogas-Motoren zeigte sich, dass Gasmotor-BHKW im Mittel etwa 290 mg/Nm³ Kohlenwasserstoffe emittieren für die angenommen wird, dass es sich überwiegend um Methan handelt und Zündstrahlmotoren wiesen sogar mit 560 mg/Nm³ einen fast doppelt so hohen Wert auf. Bezogen auf die zugeführte Methanmenge im Biogas entsprechen diese Abgaswerte Methanverlusten von etwa 0,5 % für Gasmotoren und 0,9 % für Zündstrahlmotoren. Der gemessene Methanschlupf für Biogas-Motoren dürfte in ähnlicher Weise auch für Klärgas-BHKW relevant sein. Im Rahmen der Potenzialstudie wird wie oben erläutert jedoch auf diese Emissionen nicht eingegangen. Grundsätzlich sollte aber geprüft werden, ob sich ein Methanschlupf auch bei Klärgas-BHKW bestätigt und es sollten ggf. Minderungsmaßnahmen beachtet werden (z.B. BHKW mit Oxidationskatalysator).

Hochtemperatur-BZ-BHKW

Durch Brennstoffzellen kann chemische Energie direkt - entsprechend ohne Umwandlung in Wärme oder Bewegungsenergie - in nutzbare, elektrische Energie umgewandelt werden. Mit Brennstoffzellensystemen können daher höhere elektrische Wirkungsgrade und hohe Gesamtwirkungsgrade erreicht werden. Die verschiedenen Brennstoffzellentypen (Nieder-, Mittel-, Hochtemperatur-Brennstoffzellen)²¹ stellen unterschiedliche Anforderungen an das Brenngas. Letztendlich brauchen alle Typen (bis auf die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle, DMFC) Wasserstoff.

Sollen andere kohlenstoffhaltige Brenngase wie Methan eingesetzt werden, müssen sie zu Wasserstoff reformiert und/oder konvertiert werden. Niedertemperatur-BZ benötigen dafür einen externen beheizten Reformer/Konverter, während in Hochtemperatur-BZ wie der MCFC (Molten Carbon Fuel Cell oder Schmelzkarbonat-BZ) und der SOFC (Solid Oxid Fuel Cell oder Festoxid-BZ) dieser Prozess intern durch die im Zellenstapel anfallende Reaktionswärme erfolgen kann. Die MCFC hat dabei für den Einsatz von Klärgas den weiteren Vorteil, dass sie nicht nur gegen CO und CO₂ unempfindlich ist, sondern CO₂ an der Kathode benötigt und das Angebot von CO₂ an der Kathode sich sogar vorteilhaft auf den Wirkungsgrad auswirkt. Eine CO₂-Abtrennung kann entfallen, das Gas muss lediglich von Halogenen und Siloxanen gereinigt werden. Nach (UBA 2008a) können mit der MCFC elektrische Gesamtwirkungsgrade im Klärgasbetrieb zwischen 40 und 55 % erreicht werden.

Die MCFC ist kommerziell am weitesten verbreitet. Der Einsatz von Bio- oder Klärgas in der MCFC wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben getestet, so z.B. in einem Projekt des Wupperverbandes mit Fraunhofer UMSICHT oder durch das Abwasserwerk der Stadt Ahlen/Westfalen (bte, IFEU, ISA 2004). Ebenfalls wurde der Einsatz von Biogas in einem von E.ON Energie AG und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. finanzierten Projekt der Schmack Biogas AG untersucht (FNR 2005). Die weltweit erste MCFC für den Einsatz von Biogas in großtechnischem Maßstab wurde im Oktober 2006 auf der Biogasanlage Leonberg in Betrieb genommen. Die dortigen zwei Module mit je 250 kW elektrischer Leistung und 180 kW thermischer Leistung verfügen über einen elektrischen Bruttowirkungsgrad von 47 % bei einem Eigenbedarfsanteil von ca. 1-2 %, der thermische Wirkungsgrad beträgt 23 % (bei einer Betriebstemperatur von 400°C). Erste entsprechende klärgasbetriebene Brennstoffzellen gingen gegen Ende 2007 in Betrieb. Eine MCFC auf der Kläranlage Moosburg mit einer thermischen Leistung von 170 kW und einer Nutzleistung von bis zu 245 kW bei einem Wirkungsgrad von etwa 47 %²² und eine MCFC auf dem Klärwerk Stuttgart-Möhringen mit 280 kW elektrischer Leistung bei einem Wirkungsgrad von fast 50 %²³, die im November 2007 in Betrieb ging²⁴.

²¹ Ausführliche Beschreibungen zu Brennstoffzellentypen finden sich z.B. in (FNR 2005) und (bte, IFEU, ISA 2004)

²² <http://www.klaerwerk.info/Schlammbehandlung/Klaeranlage-Moosburg-deckt-zukuenftig-eigenen-Energiebedarf>

²³ http://www.stuttgart-stadtentwaesserung.de/Downloads/Presse/PRESSEINFORMATION_HotModule.pdf

²⁴ Daneben gibt es Vorhaben mit anderen Brennstoffzellentypen, so wird z.B. die Klärgasverstromung mittels PAFC-Technologie (Mitteltemperatur-BZ) seit Mai 2000 im Klärwerk Köln-Rodenkirchen erprobt. Allerdings ist u. a. aus Kostengründen die Weiterentwicklung der PAFC von der Herstellerfirma mittlerweile eingestellt worden (UNI Stuttgart o.J.).

4.2 Potenzial in Deutschland

In Deutschland wird Abwasser überwiegend gesammelt und in Kläranlagen behandelt. Zum aktuellsten Berichtsstand des Statistischen Bundesamtes (STBA 2006) waren in Deutschland 94 % der Einwohner an Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossen. Wie in Kapitel 4.1.1 erläutert bezieht sich die Potenzialerhebung ausschließlich auf die derzeit bereits angeschlossenen Einwohner. Die Potenzialerhebung wird in zwei Stufen durchgeführt:

- es wird das zusätzliche Klärgaspotenzial durch Umstellung ermittelt
- für die derzeitige Klärgasverwertung wird eine Effizienzsteigerung angenommen

4.2.1 Theoretisches Potenzial der Faulgaserzeugung und -nutzung

In Kapitel 4.1.2 wurde gezeigt, dass die Umstellung von aerober Schlammbehandlung auf Faulung auf der Kläranlage selbst mit keinen relevanten Effekten bzgl. des Klimaschutzes verbunden ist. Ebenfalls dort sind die Veränderungen, die sich durch die Aufgabe einer Rohschlammverbrennung ergeben, qualitativ beschrieben. Diese werden nicht für die Potenzialermittlung berücksichtigt.

Um das Klärgaspotenzial zu ermitteln, das sich aus einer Umstellung ergeben würde, wurde zunächst versucht dieses anhand der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Werte zu spezifischem Klärgasanfall (in $l/(E \cdot d)$ bzw. $l/(EW \cdot d)$) sowie zu spezifischem Anfall an organischer Substanz im Rohschlamm (in $g/(E \cdot d)$ bzw. $g/(EW \cdot d)$) in Verbindung mit den Richtwerten der spezifischen Faulgasproduktion (in $l/kg \text{ oTR}$) zu berechnen. Die daraus resultierenden potenziellen Klärgasmengen unterscheiden sich allerdings so erheblich (um den Faktor zwei) und liefern zudem teils untere Werte, die sogar unterhalb der vom Statistischen Bundesamt berichteten Klärgasmengen liegen, dass dieses Vorgehen als ungeeignet erachtet wird, da nicht bestimmt werden kann, welches die „passenden“ oder „richtigen“ Faustwerte sind.

Anstatt dessen werden als Basis für die Abschätzung des Klärgaspotenzials die Angaben nach (StBA 2009) zu Klärgasaufkommen und Verwendung in Verbindung mit Aussagen nach (UBA 2008a) verwendet. Dies hat auch den Vorteil, dadurch die Abschätzung auf Basis aktueller Zahlen durchführen zu können. Nach (StBA 2009) wurden im Jahr 2008 insgesamt 5.088 GWh Klärgas erzeugt. Die Entwicklung des Klärgasaufkommens und dessen Verwendung zeigt Abbildung 12. Die Angaben des Statistischen Bundesamtes beziehen sich dabei auf den Energiegehalt des Rohgases (oberer Heizwert bzw. Brennwert).

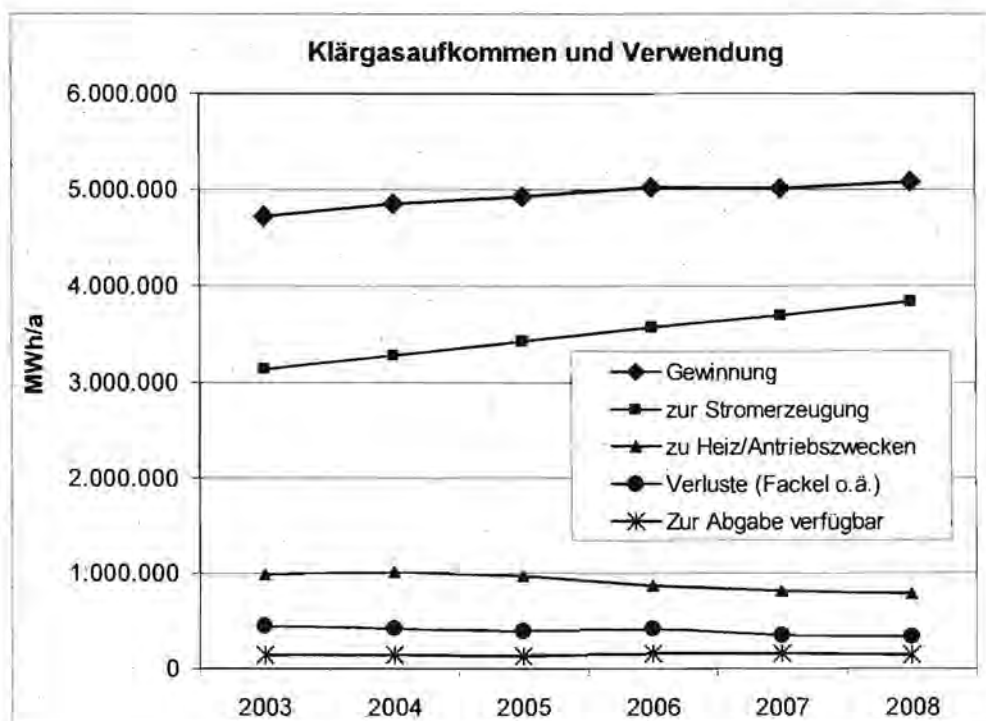


Abbildung 12: Entwicklung von Klärgasaufkommen und Verwendung (StBA 2009)

Gegenüber dem Jahr 2004 ist die erzeugte Klärgasmenge um 4,7 % angestiegen. Der Bezug zum Jahr 2004 ist an dieser Stelle von Bedeutung, da für 2004 die letztgültigen aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamtes für den Bereich Wasser- und Abwasserwirtschaft vorliegen (StBA 2006)²⁵ und diese Daten auch den Auswertungen in (UBA 2008a) zugrunde lagen.

Nach (UBA 2008a) wurde der in Deutschland anfallende Rohschlamm

- zu 75 % anaerob in Faulbehältern stabilisiert
- zu 12 % aerob behandelt
- zu 13 % verbrannt, an andere Anlagen abgegeben oder anderweitig behandelt

Eine aerobe Schlammbehandlung erfolgt überwiegend in kleinen Kläranlagen < 10000 EW, dies konnte auch durch die zuvor beschriebenen Berechnungsversuche auf Basis von Faustwerten für das Jahr 2004 in etwa bestätigt werden. Allerdings befinden sich darunter auch einige große Anlagen. Für die kleineren Anlagen ist eine Umstellung i. d. R. nicht wirtschaftlich bzw. ggf. nur dann wirtschaftlich, wenn sowieso Neuinvestitionen anstehen. Für größere Anlagen sollte eine Umstellung aber wirtschaftlich sein. Aus der Statistik (StBA 2006) stehen keine Angaben zur Verfügung auf welche Kläranlagen Größenklassen sich die 12 % aerob behandelte Rohschlamm verteilen. Auch bestehen keine detaillierten Angaben dazu wie sich die 13 % auf Rohschlammverbrennung, Abgabe an andere Anlagen oder an-

²⁵ Die Fachserie 19, Reihe 2.1 erscheint in dreijähriger Abfolge, die für 2009 anstehende Veröffentlichung wird nach Auskunft des Statistischen Bundesamtes voraussichtlich im August/September erscheinen (persönliche Auskunft Hr. Grundmann, Juni 2009)

derweitige Behandlung aufteilen. In Summe wird für den Stand 2004 angenommen, dass von den 25 % bis dahin nicht anaerob behandelten Rohschlammengen in Deutschland 20 % durch Umstellung für eine Faulgaserzeugung erschlossen werden können. Die ausgenommenen 5 % sind v. a. kleine Anlagen, für die eine Umstellung unwirtschaftlich ist.

Zur Berechnung des aktuell davon noch bestehenden Potenzials werden die Werte für 2004 hochgerechnet auf eine theoretische 95 %ige anaerobe Schlammstabilisierung. Zudem wird die bis zum Jahr 2008 erfolgte Steigerung der Klärgaserzeugung berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass die Steigerung auf eine weitere Erschließung der bisher nicht anaerob behandelten Mengen zurückzuführen ist und nicht etwa aus einer Steigerung der zu behandelnden Abwasser- und damit Rohschlammmenge resultiert. In Tabelle 11 sind die zugrunde gelegten Kennwerte und das wie beschrieben ermittelte Potenzial dargestellt.

Tabelle 11: Abschätzung des Klärgaspotenzials durch Umstellung (Werte gerundet)

	m ³ Rohgas	MWh (Brennwert)	MWh (Heizwert)
2004 (75% Rohschlamm)	684.000.000	4.861.000	4.170.000
2008	721.720.000	5.088.000	4.365.000
Potenzial 95% Bezug 2004	866.400.000	6.157.000	5.282.000
Potenzial 2008 (Differenz Potenzial 2004 und Ist 2008)	144.680.000	1.069.000	917.000

Damit könnten in Deutschland zusätzlich zu den im Jahr 2008 erzeugten rund 5.088 GWh Klärgas weitere rund 1.069 GWh durch Umstellung erzeugt werden, bzw. nach Heizwert läge das zusätzliche Potenzial bei rund 917 GWh Klärgas.

Das in Deutschland erzeugte Klärgas wird mittlerweile überwiegend zur Stromerzeugung genutzt. Auch sind die Verluste über z.B. Fackel deutlich zurückgegangen wie Abbildung 13 zeigt. Für die Potenzialanalyse wird angenommen, dass es sich bei den mittlerweile gegebenen Verlusten von 6 % um unvermeidbare Verluste handelt, die u. a. durch Stillstandszeiten des BHKW durch Wartung o. ä. entstehen. Die entsprechende Klärgasmenge wird nicht in die Potenzialanalyse mit einbezogen. Der mittlere Stromwirkungsgrad ergibt sich aus den Angaben in (StBA 2009) zu rund 31 % für das Jahr 2008 (Menge „Eigenstromerzeugung“ 1.021 GWh bezogen auf Menge „Eigenverbrauch zur Stromerzeugung“ 3.291 GWh nach unterem Heizwert).

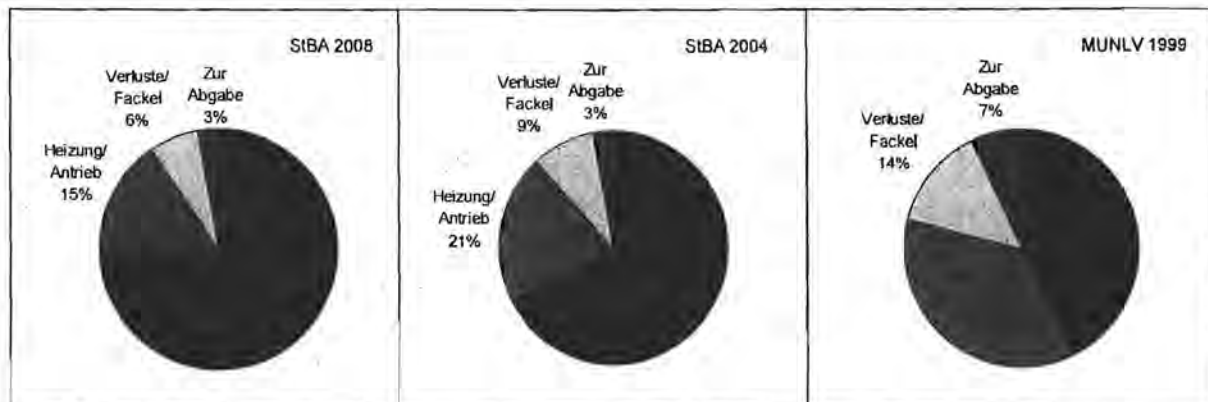


Abbildung 13: Klärgasverwendung in Deutschland 2008 und 2004 (StBA 2009) und in NRW 1999 (MUNLV 1999)

Für die Potenzialanalyse wird in einem ersten Schritt angenommen, dass die 2008 erzeugte Klärgasmenge vollständig in Faulgas-BHKW genutzt wird. Gegenüber einer reinen Anwendung zu Heizzwecken oder als Direktantrieb ist dies aus energetischer Sicht und auch aus Klimaschutzsicht vorteilhaft (bte, IFEU, ISA 2004). Die zur Abgabe verfügbaren Mengen werden nach (StBA 2009) überwiegend an Energieversorgungsunternehmen abgegeben, es wird angenommen durch Stromeinspeisung. Für die verbleibende kleine Menge an Endabnehmer ist die letztendliche Anwendung nicht bekannt, es wird aber nicht davon ausgegangen, dass dadurch aus Klimaschutzsicht ein nennenswerter Vorteil gegenüber einer Verstromung im BHKW gegeben ist.

→ Grundsätzlich könnte die gesamte erzeugte Klärgasmenge (4.083 GWh statt 3.417 GWh bezogen auf den Heizwert) in **Faulgas-BHKW** mit mittlerem **Wirkungsgrad von 31 %** genutzt werden. Der thermische Wirkungsgrad wird mit 49 % angenommen.

Die mögliche Steigerung des Treibhausgaseinsparpotenzials durch Effizienzsteigerung der BHKW wird wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben in zwei Stufen ermittelt.

→ Als Wirkungsgradsteigerung für Faulgas-BHKW werden **Nettostromwirkungsgrade von 34 %** (75 kW_{el}) und **38 %** (520 kW_{el}) betrachtet. Die zugehörigen Wärmewirkungsgrade betragen 52 % bzw. 41 %.

Für den Ausblick eines Klärgaseinsatzes in BZ-BHKW werden die Betriebsdaten der MCFC auf der Biogasanlage Leonberg verwendet. Abweichend von der Angabe des Bruttostromwirkungsgrades von 47 % abzgl. der 1-2 % Eigenbedarf, wird der elektrische Nettostromwirkungsgrad konservativ auf 43 % gesetzt.

→ Für die Annahme des Einsatzes der Klärgasmenge in BZ-BHKW wird der Nettostromwirkungsgrad zu **43 %** angenommen. Der thermische Wirkungsgrad beträgt 23 %.

4.2.2 Technisches und wirtschaftliches Potenzial

Nach der gegenwärtigen Kosten- und Erlössituation ist eine Umstellung von aerober Schlammstabilisierung auf Faulung zwar technisch problemlos machbar, aber nicht wirtschaftlich, wenn es sich um kleinere Anlagen handelt. Für diese kommt aus wirtschaftlicher Sicht eine Umstellung nur in Frage, wenn sowieso Neuinvestitionen anstehen wie z.B. für eine erforderliche Erweiterung infolge höherer Schlammbelastung. Als alternative Möglichkeit können kleinere Anlagen ihren Schlamm an eine zentrale Kläranlage abgeben. Hierbei sind

aber mögliche hohe Stickstoffrückbelastungen für die behandelnde Kläranlage zu beachten. Aus wirtschaftlicher Sicht sind die Transportkosten der limitierende Faktor für diese Option.

Anders stellt sich die Sachlage für große Kläranlagen dar, die Rohschlamm aerob behandeln und diesen z.B. an die Landwirtschaft abgeben oder in betriebseigenen Verbrennungsanlagen direkt einsetzen. Weder aus der Rohschlammverbrennung noch aus der Anwendung in der Landwirtschaft dürften sich nennenswerte Erlöse ergeben. Bei einer Verbrennung muss für eine vollständige Verbrennung i. d. R. Erdgas o. ä. zugefeuert werden, der Einsatz in der Landwirtschaft erfolgt gegen Gebühr oder kostenlos. Dagegen erzielt die Faulung Erlöse und der anfallende Klärschlamm kann weiterhin stofflich verwertet oder verbrannt werden.

Der Ausblick des Einsatzes der Klärgasmenge in MCFC-BZ-BHKW dient lediglich zur Information. Zwar wird die Technik mittlerweile im großtechnischen Maßstab eingesetzt, allerdings liegen die spezifischen Investitionskosten für BZ-BHKW auf absehbare Zeit noch bei einem Vielfachen der konventionellen BHKW. Hinzu kommt v. a. bei kleineren Anlagen, dass die höhere Strom- dafür aber niedrigere Wärmeproduktion in der Winterzeit zu einem erhöhten Bedarf an Heizöl / Erdgas führen kann.

Als technisch-wirtschaftliches Potenzial sind insofern von den nachfolgend ermittelten Treibhausgaseinsparpotenzialen lediglich diejenigen zu erachten, die in Verbindung mit einer vollständigen Nutzung des derzeit erzeugten Klärgases in Faulgas-BHKW stehen, sowie jene, die auf einer Wirkungsgradsteigerung für Faulgas-BHKW basieren. Eine Umstellung von aerober Schlammstabilisierung auf Faulung ist bei den größeren Kläranlagen als technisch-wirtschaftlich anzusehen. Deren genaue Zahl ist allerdings aus der öffentlichen Statistik nicht abzulesen.

4.2.3 Treibhausgaseinsparpotenzial für Deutschland

Nachfolgend wird das Treibhausgaseinsparpotenzial basierend auf den voran gegangenen ermittelten Potenzialdaten der Klärgaserzeugung und -nutzung dargestellt. Dabei wird stufenweise ausgehend vom Ist Zustand das Treibhausgaseinsparpotenzial für

1. eine vollständige Klärgasnutzung in BHKW mit durchschnittlichem Wirkungsgrad
2. eine zusätzliche Effizienzsteigerung für Faulgas-BHKW in zwei Stufen
3. eine zusätzliche Nutzung des Klärgaspotenzials durch Umstellung von aerober auf anaerobe Schlammbehandlung
4. eine alternative Nutzung des dann gesamt erzeugten Klärgases in einem BZ-BHKW

aufgezeigt. Die Szenarien bauen aufeinander auf und sind in der Reihenfolge nach ihrer Wahrscheinlichkeit einer Realisierung gewählt. Die Stufen 1 und 2 werden dabei in ihrem Ergebnis als technisch-wirtschaftliches Potenzial erachtet. Für Stufe 3 müssen Faulbehälter installiert werden, dies wird nur im Falle größerer Kläranlagen als wirtschaftlich machbar angenommen. Ansonsten bilden die Stufe 3 (d.h. wenn kleinere Kläranlagen betroffen sind) und die Stufe 4 das theoretische Potenzial für Treibhausgaseinsparungen ab.

Die auf den Kläranlagen über Heizkessel oder BHKW erzeugte Wärme dient i. d. R. überwiegend dem Eigenbedarf zur Beheizung der Fermenter oder ggf. einer Klärschlamm-trocknung. Eine Abgabe von Überschusswärme an Dritte ist eher die Ausnahme. In der nachfolgenden Berechnung wird angenommen, dass über das Jahr gemittelt 10 % der Überschusswärme extern genutzt werden können, nur diese Menge wird zur Einsparung von Treibhausgasemissionen angerechnet.

Zur Anrechnung der erzeugten Energie werden analog dem Vorgehen in Kapitel 1 für die Wärmesubstitution konservativ Emissionsfaktoren für innovative Heizsysteme verwendet. Für die Stromsubstitution, die in Kapitel 1 nicht gegeben war (nur Strombedarf), gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Anrechnung:

- a) es wird die im Bezugsraum gegebene durchschnittliche Strombereitstellung aus dem EVU-Netz als substituiert angerechnet;
- b) es wird betrachtet, welche eingesetzten Brennstoffe zur Energieerzeugung tatsächlich bzw. realistischer Weise ersetzt werden (Marginalbetrachtung).

Der Fall b wird üblicherweise für die Anrechnung der Energiebereitstellung aus Erneuerbaren Energien in Klimabilanzen verwendet und orientiert sich an der entsprechenden BMU-Methode. Das in diesem Zusammenhang neu vorgelegte Gutachten (ISI 2009) macht entsprechende Angaben für das Jahr 2006 und 2007. In dieser Studie werden die Angaben für 2006 zugrunde gelegt²⁶, wonach durch erzeugten Strom zu 16 % Strom aus Braunkohle, zu 59 % aus Steinkohle und zu 25 % aus Erdgas ersetzt wurde. Da der nach (ISI 2009) hierfür angegebene Emissionsfaktor für Treibhausgasemissionen nur die direkten Emissionen berücksichtigt und die der Brennstoffbereitstellung außer Acht lässt, wird abweichend ein Faktor aus eigenen Berechnungen verwendet. Damit werden folgende Emissionsfaktoren zur Anrechnung der erzeugten Energie verwendet:

Gas (Brennwertkessel): 249 g CO₂-Äq/kWh_{th}

Öl (Brennwertkessel): 311 g CO₂-Äq/kWh_{th}

Marginalstrom (D 2006): 887 g CO₂-Äq/kWh_{el}

Gegenüber dem Emissionsfaktor für die durchschnittliche Strombereitstellung in Deutschland (598 g CO₂-Äq/kWh_{el}) liegt der Marginalstromfaktor deutlich höher und führt entsprechend zu deutlich höheren Treibhausgaseinsparpotenzialen. Zur Einschätzung, welcher Unterschied sich bei Verwendung des deutschen Strommix zur Anrechnung der Gutschrift ergeben würde, wird jeweils zu den ermittelten Treibhausgaseinsparpotenzialen angegeben, um wie viel Prozent geringer diese lägen.

0. Abschätzung der Treibhausgaseinsparung durch Klärgasnutzung im Ist-Zustand („IST“)

Zur Abschätzung des Ist Zustandes (Abbildung 13) wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die 15 % „Heizung/Antrieb“ vollständig zu Heizzwecken überwiegend zur Deckung des Eigenbedarfs eingesetzt wurden, als mittlerer Kesselwirkungsgrad wurden 95 % angesetzt. Zusätzlich zu den 75 % „Stromerzeugung“ wird auch für die 3 % „zur Abgabe“ von einer Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung ausgegangen. Der Wärmewirkungsgrad wird mit 49 % angenommen, so dass sich ein Gesamtwirkungsgrad für den Einsatz in Faulgas-BHKW von 80 % ergibt. Für die erzeugte Wärme wird im Jahresmittel angenommen, dass diese zu 10 % extern genutzt werden kann und dort den Einsatz fossiler Energie ersetzt. Diese Annahme wurde generell über alle Szenarien beibehalten, eine Steigerung der extern

²⁶ Im Jahr 2007 waren es ebenfalls 25 % Strom aus Erdgas, aber deutlich abweichend nur 2 % Strom aus Braunkohle und 73 % aus Steinkohle. Grund für die Verschiebung von Braun- zu Steinkohle ist der Ausfall mehrerer Kernkraftwerke, der durch Steinkohlestrom ausgeglichen werden musste sowie die niedrigeren CO₂-Zertifikatspreise. Dieses Bezugsjahr wird insofern als weniger repräsentativ angesehen.

nutzbaren Wärme wurde nicht angenommen. Der Wärmeeigenbedarf wird für den Fermenter und damit die Klärgaserzeugung gebraucht, dieser Anteil kann folglich nicht als Treibhausgaseinsparung angerechnet werden. Die Verluste von 6 % werden wie erläutert (Kapitel 4.2.2) als unvermeidbar angesehen.

Tabelle 12: Angenommene Verwendung Klärgas (nach Heizwert) Ist-Zustand

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	3.417	1.060.365
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)	3.417	230.699
Heizwärmeerzeugung (Annahme 10 % externe Nutzung)	666	
Verluste	282	
Summe	4.365	

Daraus ergibt sich für den Ist-Zustand der Klärgasnutzung folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution = 940.540 t CO₂-Äq/a

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution = 64.600 t CO₂-Äq/a

Treibhausgaseinsparung gesamt („IST“) = 1.005.140 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung im Ist Zustand um rd. 30 % niedriger.

1. Treibhausgaseinsparung durch vollständige Klärgasnutzung in BHKW mit durchschnittlichem Wirkungsgrad („BHKW 31/49“)

Ausgehend von der zuvor dargestellten Ist Situation wird in diesem Szenario als Optimierung angenommen, dass die gesamte derzeit in Deutschland erzeugte Klärgasmenge in Faulgas-BHKW genutzt wird. Als Wirkungsgrade werden hierfür zunächst die mittleren Wirkungsgrade wie in der Ist Situation von 31 % elektrisch und 49 % thermisch übernommen.

Tabelle 13: Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.083	1.266.916
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		200.076
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	282	
Summe	4.365	

Daraus ergibt sich für die vollständige Klärgasnutzung in Faulgas-BHKW gemäß dem Ist Zustand folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution = 1.123.760 t CO₂-Äq/a

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution = 56.020 t CO₂-Äq/a

Treibhausgaseinsparung gesamt „BHKW 31/49“ = 1.179.780 t CO₂-Äq/a

Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST = 174.640 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 31 % niedriger.

2. Treibhausgaseinsparung durch zusätzliche Effizienzsteigerung für Faulgas-BHKW in zwei Stufen

In diesem Szenario wird angenommen, dass das gesamt in Deutschland erzeugte Klärgas in Faulgas-BHKW eingesetzt wird, die gegenüber dem mittleren Ist Zustand eine höhere Effizienz hinsichtlich des Stromwirkungsgrades aufweisen. Es wurden zwei verschiedene Größenklassen mit entsprechend unterschiedlichen Wirkungsgraden angesetzt, die mögliche Unterschiede nach Klärgasanfall auf den Anlagen darstellen sollen. Für die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen und ausgewählten BHKW-Typen wurde jeweils ein Stromeigenbedarf von 1 % angesetzt.

a) Einsatz im Faulgas-BHKW mit Nettostromwirkungsgrad 34 % und 52 % Wärmewirkungsgrad („BHKW 34/52“)

Tabelle 14: Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.083	1.388.285
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		212.360
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	282	
Summe	4.365	

Daraus ergibt sich für die vollständige Klärgasnutzung in Faulgas-BHKW mit einem Nettostromwirkungsgrad von 34 % folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution = 1.231.400 t CO₂-Äq/a

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution = 59.450 t CO₂-Äq/a

Treibhausgaseinsparung gesamt „BHKW 34/52“ = 1.290.860 t CO₂-Äq/a

Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST = 285.720 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 31 % niedriger.

b) Einsatz im Faulgas-BHKW mit Nettostromwirkungsgrad 38 % und 41 % Wärmewirkungsgrad („BHKW 38/41“)

Tabelle 15: Vollständige Verwendung Klärgas (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.083	1.551.613
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		167.411
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	282	
Summe	4.365	

Daraus ergibt sich für die vollständige Klärgasnutzung in Faulgas-BHKW mit einem Nettostromwirkungsgrad von 38 % folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution = 1.376.280 t CO₂-Äq/a

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution = 46.880 t CO₂-Äq/a

Treibhausgaseinsparung gesamt „BHKW 38/41“ = 1.423.160 t CO₂-Äq/a

Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST = 418.020 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 31,5 % niedriger.

3. Treibhausgaseinsparung durch zusätzliche Nutzung des Klärgaspotenzials durch Umstellung („U_BHKW 34/52“)

Dieses Szenario entspricht dem Szenario 2, der Nutzung von Klärgas in Faulgas-BHKW mit höheren Stromwirkungsgraden. Zusätzlich wird hier die Klärgasmenge berücksichtigt, die durch eine anteilige Umstellung der bislang noch aeroben Schlammstabilisierung in Deutschland auf Faulung zusätzlich erzeugt werden könnte. In Kapitel 4.2.1 wurde dieses Potenzial zu 917 GWh Klärgas (nach Heizwert) bestimmt. Abzüglich der als unvermeidbar erachteten Verluste von rund 6 % ergibt sich daraus die gesamt nutzbare Klärgasmenge zu 4.941 GWh.

a) Einsatz Klärgaspotenzial im Faulgas-BHKW mit Nettostromwirkungsgrad 34 % und 52 % Wärmewirkungsgrad („U_BHKW 34/52“)

Tabelle 16: Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.941	1.679.884
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		256.923
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	341	
Summe	5.282	

Daraus ergibt sich für die vollständige Nutzung des abgeleiteten Klärgaspotenzials in Faulgas-BHKW mit einem Nettostromwirkungsgrad von 34 % folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution =	1.490.060 t CO ₂ -Äq/a
Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution =	71.940 t CO ₂ -Äq/a
Treibhausgaseinsparung gesamt „U_BHKW 34/52“=	1.562.000 t CO₂-Äq/a
Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST =	556.860 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 31 % niedriger.

b) Einsatz Klärgaspotenzial im Faulgas-BHKW mit Nettostromwirkungsgrad 38 % und 41 % Wärmewirkungsgrad („U_BHKW 38/41“)

Tabelle 17: Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in Faulgas-BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.941	1.877.518
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		202.574
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	341	
Summe	5.282	

Daraus ergibt sich für die vollständige Nutzung des abgeleiteten Klärgaspotenzials in Faulgas-BHKW mit einem Nettostromwirkungsgrad von 38 % folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution =	1.665.360 t CO ₂ -Äq/a
Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution =	55.720 t CO ₂ -Äq/a
Treibhausgaseinsparung gesamt „U_BHKW 38/41“=	1.722.080 t CO₂-Äq/a
Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST =	716.940 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 31,5 % niedriger.

4. Treibhausgaseinsparung durch alternative Nutzung des gesamten Klärgaspotenzials in einem BZ-BHKW („U_BZ-BHKW“)

In diesem als Ausblick anzusehenden Szenario wird angenommen, dass das abgeleitete Klärgaspotenzial in einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle eingesetzt würde. Der thermische Wirkungsgrad entspricht dem der MCFC in Leonberg, der elektrische Nettostromwirkungsgrad wurde konservativ mit 43 % etwas niedriger angenommen.

Tabelle 18: Vollständige Verwendung Klärgaspotenzial (nach Heizwert) in BZ-BHKW mit 46 % Nettostromwirkungsgrad

	Klärgas [GWh/a]	Energie [MWh/a]
Stromerzeugung	4.941	2.124.560
Wärmeerzeugung aus KWK (Annahme 10 % externe Nutzung)		113.639
Heizwärmeerzeugung	0	0
Verluste	341	
Summe	5.282	

Daraus ergibt sich für die vollständige Nutzung des abgeleiteten Klärgaspotenzials in einem Hochtemperatur-BZ-BHKW mit einem Nettostromwirkungsgrad von 43 % folgende Treibhausgasbilanz:

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Stromsubstitution = 1.884.480 t CO₂-Äq/a

Eingesparte Treibhausgasemissionen durch Wärmesubstitution = 31.820 t CO₂-Äq/a

Treibhausgaseinsparung gesamt „U_BZ-BHKW“ = 1.916.300 t CO₂-Äq/a

Zusätzliche Treibhausgaseinsparung gegenüber IST = 911.160 t CO₂-Äq/a

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix D verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung in diesem Szenario um rund 32 % niedriger.

Übersicht Treibhausgaseinsparungen der Szenarien

Insgesamt wurde zur Ermittlung der Treibhausgaseinsparpotenziale eine Einschätzung der Ist Situation vorgenommen und in insgesamt sechs verschiedenen Szenarien die Steigerungsmöglichkeiten dazu untersucht. Die Ergebnisse daraus im Überblick zeigt Abbildung 14. Die verwendeten Kurzbezeichnungen stehen für:

„IST“	Ist Situation
„BHKW 31/49“	Klärgasnutzung in BHKW mit mittlerem Wirkungsgrad Ist
„BHKW 34/52“	Klärgasnutzung in BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad
„BHKW 38/41“	Klärgasnutzung in BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad
„U_BHKW 34/52“	Klärgaspotenzialnutzung in BHKW mit 34 % Nettostromwirkungsgrad
„U_BHKW 38/41“	Klärgaspotenzialnutzung in BHKW mit 38 % Nettostromwirkungsgrad
„U_BZ-BHKW“	Klärgasnutzung in BZ-BHKW mit 46 % Nettostromwirkungsgrad

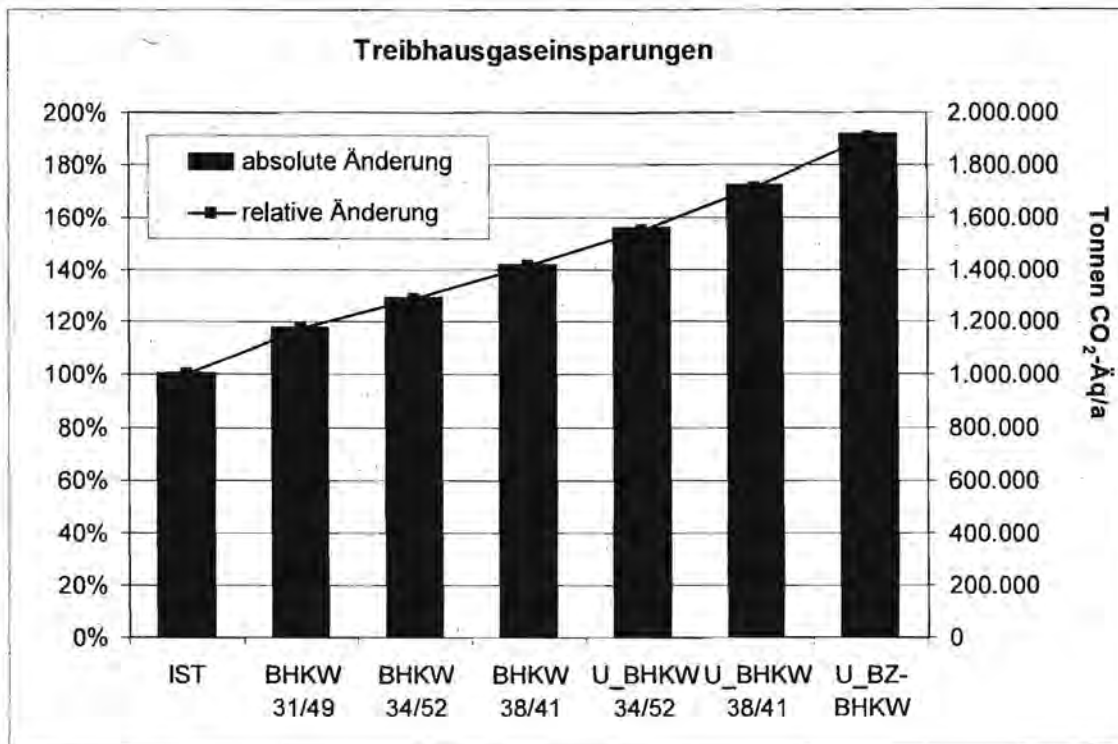


Abbildung 14: Ermittelte Treibhausgaseinsparpotenziale im Überblick

Die Szenarien „BHKW 34/52“ und „BHKW 38/41“ sowie „U_BHKW 34/52“ und „U_BHKW 38/41“ stellen dabei eine Bandbreite dar. Sie repräsentieren die in etwa möglichen BHKW-Größen, die in den unterschiedlich großen Kläranlagen in Deutschland eingesetzt werden könnten (vgl. Kap. 4.1.3).

Aus der Übersicht zeigt sich, dass durch die aufeinander aufbauenden Szenarien eine stetige Steigerung der Treibhausgaseinsparung erzielt werden könnte. **Im theoretischen Fall, dass das abgeleitete Klärgaspotenzial vollständig in einem BZ-BHKW genutzt würde, könnten die Treibhausgaseinsparungen gegenüber dem Ist Szenario nahezu verdoppelt werden.** Aber auch schon die einfache Optimierung der Wirkungsgrade ergeben eine gesteigerte Treibhausgaseinsparungen von 28 % bzw. 42 % gegenüber dem Ist Szenario.

Ein weiteres Steigerungspotenzial könnte erzielt werden, wenn die erzeugte Wärme verstärkt extern nutzbar wäre und dadurch fossile Energieträger zur Wärmeerzeugung ersetzt würden. Allerdings ist dies generell durch die Standortlage von Kläranlagen aber z.B. auch Biogasanlagen schwierig. Eine gezielte Regionalplanung mit Aufbau von Nahwärmenetzen könnte die Wärme zu Abnehmern bringen.

Tabelle 19: Überblick der ermittelten Treibhausgaseinsparpotenziale

Szenario	Zusätzliches Treibhausgaseinsparpotenzial [t CO ₂ -Äq/a]	in EDW*
BHKW 31/49	174.640	15.434
BHKW 34/52	285.720	25.252
BHKW 38/41	418.020	36.944
U_BHKW 34/52	556.860	49.214
U_BHKW 38/41	716.940	63.362
U_BZ-BHKW	911.160	80.528

*EDW: Einwohnerdurchschnittswerte

Tabelle 19 zeigt die jeweils zusätzlichen Treibhausgaseinsparpotenziale der Szenarien gegenüber der Ist Situation im Überblick. Danach sind zusätzliche Einsparungen zwischen rd. 175.000 t CO₂-Äq/a und 911.000 t CO₂-Äq/a erzielbar. Umgerechnet auf Einwohnerzahlen in Deutschland entspricht dies den Treibhausgasemissionen, die im Durchschnitt jährlich von rd. 15.400 bis 80.500 Einwohnern verursacht werden. Dieses Einsparpotenzial könnte durch eine gesteigerte Nutzung der Wärme, die nicht für den Eigenbedarf gebraucht wird, weiter erhöht werden.

4.3 Potenzial in der EU 27

4.3.1 Theoretisches Potenzial der Faulgaserzeugung

Eine umfassende Datengrundlage über die Anwendung von anaerober und aerober Klärschlammbehandlung liegt für die Gesamtheit der Mitgliedsstaaten nicht vor.

Als mögliche Ausgangspunkte für die Ermittlung des Potentials in der EU wurden die folgenden Informationen identifiziert:

- Klärschlammproduktion und Beseitigung in der EU 27
- Anschlussgrad an Kläranlagen in der EU 27
- Biogasproduktion in der EU

Die Angaben zur Klärschlammproduktion in Tabelle 20 zeigen einerseits die unvollständige Datenlage, da zwar eine Reihe von Angaben aus dem Jahr 2007 vorliegen für viele Länder muss aber auf länger zurückliegende Daten zurückgegriffen werden. Zum anderen zeigt das unterschiedliche Klärschlamm aufkommen, mit Werten zwischen 30,6 kg TS/(EW*a) bis 0,7 kg TS/(EW*a) auch unterschiedliche Rahmenbedingungen in den Ländern auf. Die unterschiedlichen spezifischen Mengen an Trockensubstanz pro Einwohner (TS/EW) können dabei unterschiedliche Gründe haben:

- a) Unterschiedlicher Anteil an gewerblichen Einleitungen in kommunale Kläranlagen die zur Klärschlammproduktion beitragen können
- b) Unterschiedliche Abwassersammelsysteme (Mischsystem / Trennsystem)
- c) Unterschiedliche Abwasser- und Schlammbehandlung (Qualität der Abwasserreinigung, Umfang des Fällfällmitteleinsatzes, Kalkzugabe etc.)
- d) Unterschiedlicher Anschlussgrad

Tabelle 20: Klärschlammaufkommen und -entsorgung in der EU 27

	Klärschlammaufkommen			Klärschlammmentsorgung		
	10 ⁶ kg	Ref Jahr	kg TS pro EW (2007)	10 ⁶ kg	Ref Jahr	kg TS pro EW (2007)
AT Österreich	254,6	2006	30,6	254,6	2006	30,6
BE Belgien	78,3 ¹⁾	–	7,4	78,3	1998	7,4
BG Bulgarien	39,9	2007	5,2	27,3	2007	3,6
CY Zypern	8,3	2005	10,6	6,4	2005	8,2
CZ Tschechische Republik	172,3	2007	16,7	172,3	2007	16,7
DE Deutschland	2.048,5	2006	24,9	2.170,0	2005	26,4
DK Dänemark	153,8	1998	28,2	153,8	1998	28,2
EE Estland	28,8	2007	21,5	28,1	2007	20,9
ES Spanien	1.065,0	2006	23,7	1.065,0	2006	23,7
FI Finnland	160,0	2000	30,3	160,0	2000	30,3
FR Frankreich	1.059,8	2004	16,7	1.059,2	2004	16,7
GR Griechenland	126,0	2006	11,3	126,0	2006	11,3
HU Ungarn	184,0	2004	18,3	184,0	2004	18,3
IE Irland	59,8	2005	13,7	59,8	2005	13,7
IT Italien	1.056,4	2005	17,8	1.052,6	2005	17,7
LT Litauen	76,5	2007	22,7	40,8	2007	12,1
LU Luxemburg	12,5	2003	26,0	12,5	2003	26,0
LV Lettland	23,3	2007	10,2	21,3	2007	9,4
MT Malta	0,3	2006	0,7	0,3	2006	0,7
NL Niederlande	372,7	2006	22,8	359,4	2006	21,9
PL Polen	533,4	2007	14,0	533,4	2007	14,0
PT Portugal			0,0			0,0
RO Rumänien	99,6	2007	4,6	43,9	2007	2,0
SE Schweden	210,0	2006	23,0	220,0	2003	24,0
SI Slowenien	21,1	2007	10,5	21,1	2007	10,5
SK Slowakei	56,4	2005	10,4	55,3	2007	10,2
UK Vereinigtes Königreich	1.770,7	2005	29,0	1.770,7	2005	29,0
Summe	9.672,0			9.676,1		

Quelle: Eurostat - Abwasserschlammproduktion und -Beseitigung (env_watq6):

WW1_1 - Kommunale Kläranlagen; Datensatz extrahiert am: 2009.05.20 12:07:24

¹⁾ keine Angaben in Eurostat, der Wert für das Klärschlammaufkommen wurde gleichgesetzt mit dem Wert für die Klärschlammmentsorgung

Von den genannten Ursachen für die Abweichungen können einerseits der Anschlussgrad normiert werden und zum anderen können Annahmen über den erwarteten Schlammanfall bei einer qualifizierten Abwasserreinigung und Schlammbehandlung erfolgen.

Hierfür wurden in Tabelle 21 die statistischen Angaben zum Anschlussgrad integriert. Auch hier sind sehr starke Schwankungen zwischen 13 % und 100 % festzustellen. Unter Zugrundelegung eines Anschlussgrades von 95 % nähern sich die unterschiedlichen Erträge pro EW bereits deutlich aneinander an. Zur Abschätzung des Klärschlammpotenzials wurde zusätzlich die Auswirkung einer Vorgabe über den mindestens erreichbaren Klärschlammerntrag zugrunde gelegt. Für den Fall dass ein Mindesterntrag von 20 kg TS/(EW*a) zugrunde gelegt wird, ergibt sich ein Potential von ca. 12 Mio. t TS/a. Bei Zugrundelegung von mindestens 25 kg TS/(EW*a) eine Summe für EU 27 von etwa 13 Mio. t TS/a.

Ausgehend von den berichteten Klärschlammernngen und den in Tabelle 21 berechneten potenziellen Klärschlammernngen kann die mögliche Primärenergieerzeugung berechnet werden.

Dabei wurden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt:

- Anteil organische Trockensubstanz: 65 %,
- Rohgasertrag: 275 – 475 l/kg oTS;
für die Ermittlung des Potenzials zugrunde gelegt: 350 l/kg oTS,
- Methangehalt des Faulgases: 64 Vol%
- Heizwert Methan: 35,9 MJ/m³
- Brennwert Methan: 39,8 MJ/m³
- Anteil anaerobe Faulung an der Klärschlammbehandlung: 60 %²⁷

Mit den getroffenen Annahmen lässt sich eine potentielle Primärenergieerzeugung (Faulgas) berechnen wie in Tabelle 22 dargestellt. Die Berechnung erfolgt mit einem Mittelwert aus Brenn- und Heizwert, da die später eingeführten Daten der EU nicht eindeutig einem Brenn- oder Heizwert zuzuordnen sind (s. u.).

Verglichen mit den für Deutschland ermittelten Daten für 2008 (vgl. Kap. 4.2) zeigt sich, dass die Schätzwerte die Situation für Deutschland deutlich unterschätzen. In Kapitel 4.2 wird für 2008 eine Primärenergieproduktion von rd. 4.726.500 MWh (als Mittelwert aus Heizwert und Brennwert angegeben, entsprechend 17.015 TJ gegenüber 11.289 TJ in Tabelle 22. Das dürfte zum einen an dem Anteil anaerober Faulung in Deutschland liegen, der mit 75 % deutlich höher ist als die für EU 27 im Durchschnitt angesetzten 60 %. Dieser Unterschied erklärt etwa 50 % der Abweichung von der dargestellten Schätzung Ist-Wert. Die verbleibenden Abweichungen könnten erklärt werden, wenn man einen höheren Rohgasertrag von etwa 420 l/kg oTS zugrunde legen würde.

Diese Abweichungen für Deutschland zeigen die Effekte der Schätzung für einzelne Länder. Insgesamt kann jedoch von einer plausiblen Schätzung für die EU 27ausgegangen werden.

²⁷ „Wege zur Stadtentwicklung in der Europäischen Union“ (KOM (1997) 197 und Mitteilung „Nachhaltige Stadtentwicklung in der Europäischen Union: Ein Aktionsrahmen“ (KOM (1998) 605. Demnach leben 40 % der EU-Bevölkerung in Städten mit ≥ 50.000 Einwohnern und 20 % in Gemeinden und Städten bis 10.000 Einwohnern. Ausgehend von diesen Angaben wurde ein Anteil an anaerobe Faulung von 60 % gesetzt.

Tabelle 21: Berechnung des potenziellen Klärschlammaufkommens

	Anschlussgrad		Klärschlammaufkommen				
			normiert auf 95%	Normiert: 95% AG; >20 kgTS/EW		Normiert: 95% AG; >25 kgTS/EW	
	%	Ref Jahr	kg TS pro EW (2007)	kg TS pro EW (2007)	10 ⁶ kg	kg TS pro EW (2007)	10 ⁶ kg
AT Österreich	92	2006	31,6	31,6	262,9	31,6	262,9
BE Belgien	60	2007	11,7	20,0	212,5	25,0	265,6
BG Bulgarien	42	2007	11,8	20,0	153,2	25,0	191,5
CY Zypern	30	2005	33,5	33,5	26,3	33,5	26,3
CZ Tschechische Republik	75	2007	21,1	21,1	218,2	25,0	258,4
DE Deutschland	94	2004	25,2	25,2	2.070,3	25,2	2.070,3
DK Dänemark	89	1998	30,1	30,1	164,2	30,1	164,2
EE Estland	74	2007	27,6	27,6	37,0	27,6	37,0
ES Spanien	100	2007	22,5	22,5	1.011,8	25,0	1.122,0
FI Finnland	81	2002	35,5	35,5	187,7	35,5	187,7
FR Frankreich	80	2004	19,8	20,0	1.271,5	25,0	1.589,3
GR Griechenland	85	2007	12,6	20,0	223,9	25,0	279,8
HU Ungarn	62	2004	28,0	28,0	281,9	28,0	281,9
IE Irland	84	2005	15,5	20,0	87,1	25,0	108,9
IT Italien	69	1999	24,5	24,5	1.454,5	25,0	1.484,4
LT Litauen	69	2007	31,2	31,2	105,3	31,2	105,3
LU Luxemburg	95	2003	26,0	26,0	12,5	26,0	12,5
LV Lettland	65	2007	15,0	20,0	45,5	25,0	56,9
MT Malta	13	2007	5,4	20,0	8,2	25,0	10,2
NL Niederlande	99	2006	21,8	21,8	357,6	25,0	409,5
PL Polen	62	2007	21,4	21,4	817,3	25,0	953,0
PT Portugal	68	2007	0,0	20,0	212,2	25,0	265,2
RO Rumänien	28	2007	15,7	20,0	430,9	25,0	538,7
SE Schweden	86	2006	25,4	25,4	232,0	25,4	232,0
SI Slowenien	51	2007	19,5	20,0	40,4	25,0	50,5
SK Slowakei	57	2007	17,4	20,0	107,9	25,0	134,9
UK Vereinigtes Königreich	95 ¹⁾	k.A.	29,0	29,0	1.770,7	29,0	1.770,7
Summe					11.803,4		12.869,6

Quelle: Eurostat: Anschlussgrade der Wohnbevölkerung an Abwassersammlung und -behandlung (%) (env_watq4): WW0_2 - Kommunale Kläranlagen, gesamt; Datensatz extrahiert am 2009.07.21 14:52:18

¹⁾ keine Angaben in Eurostat: der Wert wird aus Sekundärquellen / expert judgement festgesetzt.

Tabelle 22: Berechnung der potenziellen Primärenergieproduktion

	Potenzielle Primärenergieproduktion aus Klärschlamm			Schätzwert EEA für Ist 2000 ⁴⁾
	Schätzung Ist-Wert ¹⁾	Potential unterer Schätzwert	Potential mittlerer Schätzwert	
	TJ	TJ	TJ	
AT Österreich	1.403	1.449	1.449	784
BE Belgien	432	1.171	1.464	912
BG Bulgarien	220	844	1.055	279
CY Zypern	46	145	145	5.442
CZ Tschechische Republik	950	1.202	1.424	3.503
DE Deutschland	11.289	11.409	11.409	13.238
DK Dänemark	848	905	905	505
EE Estland	159	204	204	140
ES Spanien	5.869	5.576	6.183	438
FI Finnland	882	1.034	1.034	680
FR Frankreich	5.841	7.007	8.759	4.124
GR Griechenland	694	1.234	1.542	5.542
HU Ungarn	1.014	1.554	1.554	266
IE Irland	330	480	600	358
IT Italien	5.822	8.016	8.180	5.157
LT Litauen	422	580	580	295
LU Luxemburg	69	69	69	0
LV Lettland	128	251	314	73
MT Malta	2	45	56	260
NL Niederlande	2.054	1.971	2.257	2.910
PL Polen	2.940	4.504	5.252	816
PT Portugal	0	1.169	1.462	1.672
RO Rumänien	549	2.375	2.969	417
SE Schweden	1.157	1.279	1.279	1.531
SI Slowenien	116	223	278	13
SK Slowakei	311	595	743	337
UK Vereinigtes Königreich	9.758	9.758	9.758	10.029
Summe	53.302	65.048	70.924	59.722

1) Berechnet aus: Klärschlammaufkommen entsprechend Tabelle 20; oTS 65 %, Methangehalt 64 Vol%; Heizwert Methan: 35,9 MJ/m³, Brennwert Methan: 39,8 MJ/m³ (für die Berechnung wurde der Mittelwert verwendet); Anteil anaerobe Faulung: 60 %

2) Berechnet aus: Klärschlammaufkommen entsprechend Tabelle 21; Normiert: 95 % Anschlussgrad; Rohschlammertrag >20 kg TS/(EW*a); andere Annahmen wie 1)

3) Berechnet aus: Klärschlammaufkommen entsprechend Tabelle 21; Normiert: 95 % Anschlussgrad; Rohschlammertrag >25 kg TS/(EW*a); andere Annahmen wie 1)

4) EEA Report 7/2006: How much bioenergy can Europe produce without harming the environment ISSN 1725-9177

Ergänzend werden in Tabelle 22 die von EEA²⁸ publizierten Klärgasmengen für das Jahr 2000 dargestellt. Dabei ist allerdings anzumerken, dass die Klärgasproduktion nicht im zentralen Focus der Untersuchung standen und auch nicht alle einzelnen Länderdaten (vor allem Griechenland, Zypern und Spanien fallen völlig aus dem Rahmen) ohne weitere Verifizierung verwertbar sein werden.

Eine weitere mögliche Quelle zur Identifizierung des derzeitigen Faulgasaufkommens könnte die Statistik zum Biogasaufkommen in der EU darstellen.

Unter dem Begriff Biogas sind die Angaben für

- Deponiegase,
- Faulgas und
- andere Biogase wie z.B. anaerobe Faulung von Schlämmen aus der Viehhaltung und Lebensmittelindustrie

zusammengefasst.

Die Europäische Statistik gibt zwar Werte für Heizwert und Brennwert an, diese sind allerdings identisch, so dass nicht mit Bestimmtheit festgestellt werden kann ob die Primärproduktion als Heizwert oder Brennwert angegeben wurde.

Um die erfassten Biogasmengen einzuordnen wurden sie auf die Anzahl der Einwohner (2007) normiert (Abbildung 14). Als Vergleichswert wurde der rechnerische Durchschnittswert EU 27 für die Ist-Schätzung (ca. 107 MJ/(E*a)) sowie der mittlere Schätzwert für das Potenzial (ca. 142 MJ/(E*a)) dargestellt. Durch die summarische Darstellung der verschiedenen Biogase kann zwar keine quantitative Verifizierung erfolgen, qualitativ wird aber die Größenordnung der Berechnung für EU 27 durchaus bestätigt.

Insgesamt kann damit für die EU 27 in einem ersten Ansatz von einem zusätzlich erschließbaren Potenzial an verwertbarem Methan in der Größenordnung von 17,5 PJ/a ausgegangen werden (mittlerer Schätzwert). Eine Differenzierung dieses Wertes auf der Ebene der Mitgliedsländer erscheint bei der derzeit verfügbaren Datenlage nicht sinnvoll und müsste durch Recherchen in den einzelnen Mitgliedsländern gestützt werden. Die Unsicherheiten beruhen vor allem auch auf den Annahmen zum Anteil der anaerob behandelten Klärschlämme, da diese auch stark abhängig von der Siedlungsscharakteristik (Anteil der Bevölkerung in Agglomerationen) sind.

Zur Art der Nutzung des bereits erzeugten Faulgases kann keine Aussagen gemacht werden. In Anlehnung an die Gegebenheiten in NRW zum Stand 1999 wird vereinfacht angenommen, dass gegenwärtig erzeugtes Faulgas in der EU 27 im Mittel zu 43 % zur Stromerzeugung eingesetzt wird, zu 43 % zu Heizzwecken und dass 15 % als Verluste (Fackel) anfallen.

²⁸ EEA Report 7/2006: How much bioenergy can Europe produce without harming the environment
ISSN 1725-9177

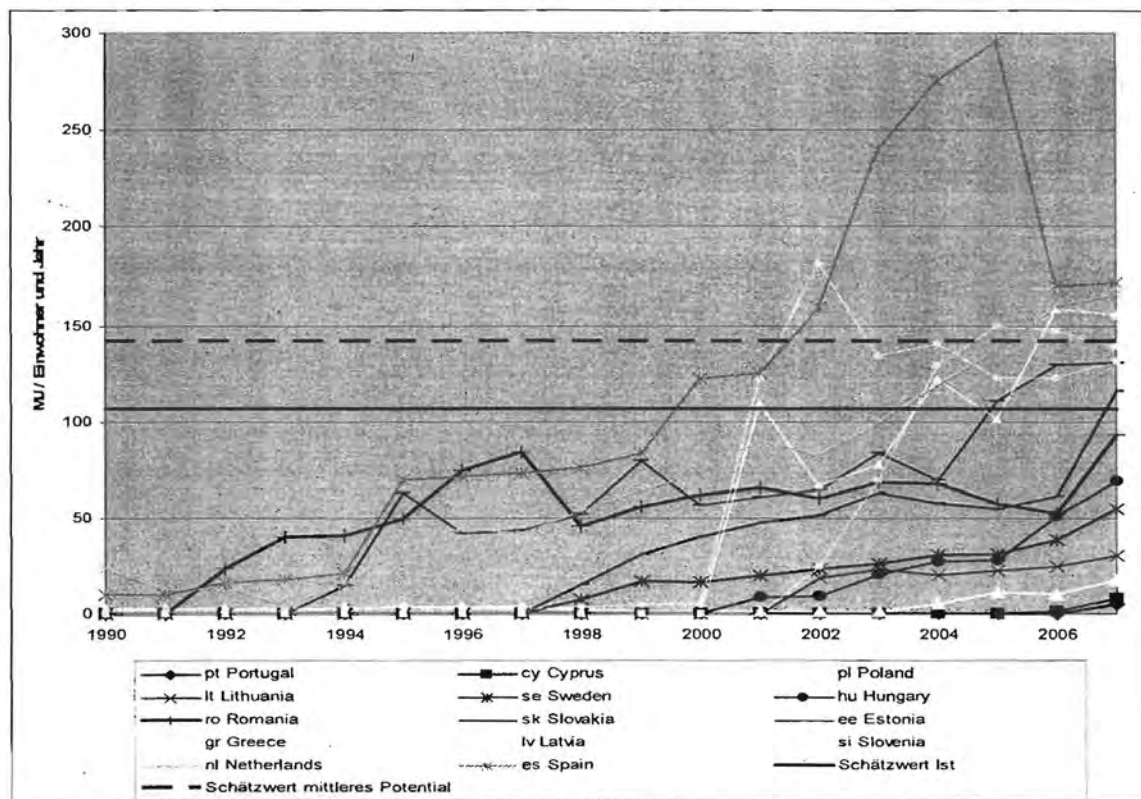
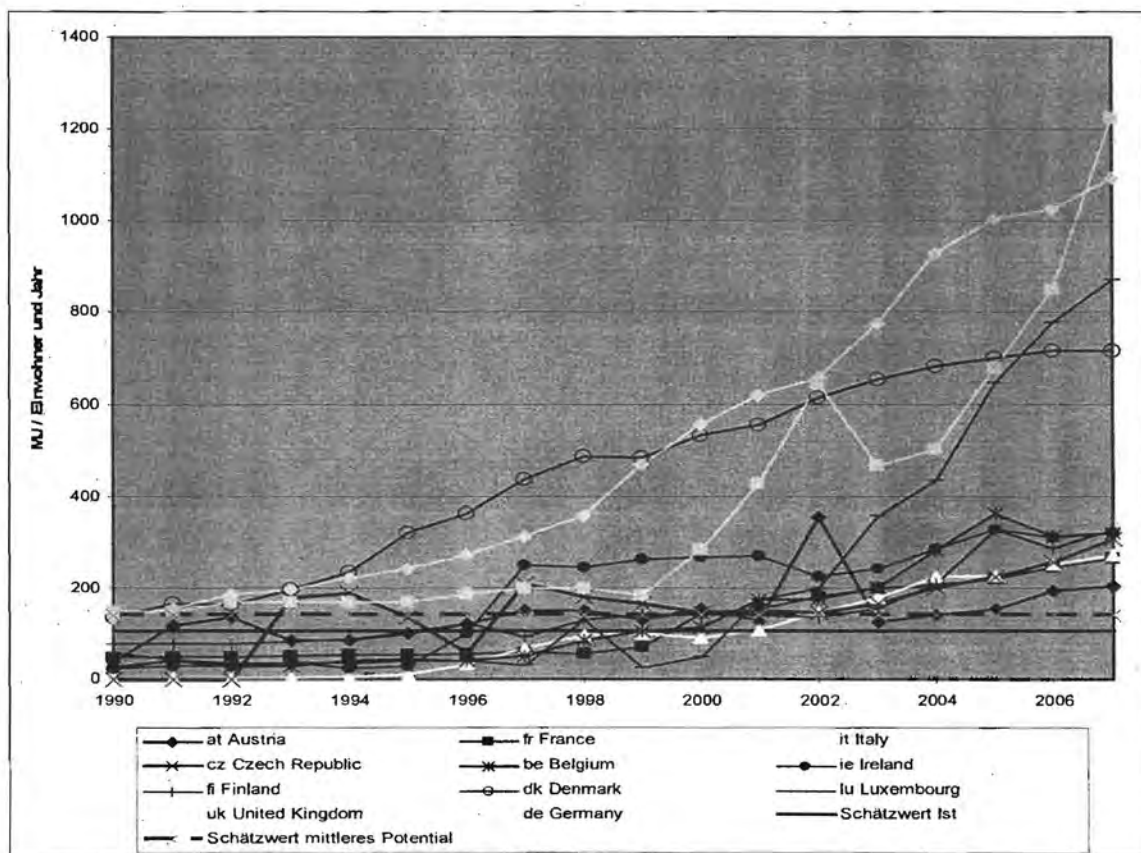


Abbildung 15: Entwicklung der Biogasmengen

4.3.2 Treibhausgaseinsparpotenzial in der EU 27

Zur Bestimmung des Treibhausgaseinsparpotenzials in der EU 27 wird in Anlehnung an die Vorgehensweise für Deutschland zunächst ein Ist Szenario definiert und darüber hinaus zwei weitere Szenarien, die zum einen eine vollständige Nutzung im Gas-BHKW mit gesteigerten Wirkungsgraden und zum anderen zusätzlich die Potenzialsteigerung der Klärgasmenge abbilden. Die drei Vergleichsszenarien werden wie folgt bestimmt: --

EU 27 Ist: Für den ermittelten Ist Schätzwert der Primärenergieproduktion von 53.302 TJ bzw. 14.806 GWh wird angenommen, dass 15 % abgefackelt werden und die weiteren 85 % je zur Hälfte zur Stromerzeugung in BHKW und zu Heizzwecken eingesetzt werden. Als BHKW Wirkungsgrad wird ein etwas geringerer Stromwirkungsgrad als für Deutschland im Ist-Zustand angesetzt (30 % statt 31 % elektrisch), der Wärmewirkungsgrad wird gleich gewählt (49 % thermisch)

BHKW 36/45: Annahme der vollständigen Nutzung des Ist Schätzwertes der Primärenergieproduktion in einem optimierten BHKW. Als Wirkungsgrade werden mittlere Werte aus den für Deutschland zugrunde gelegten beiden BHKW Größenklassen verwendet (36 % elektrisch, 45 % thermisch)

U_BHKW 36/45: Annahme, dass der mittlere Schätzwert des Potenzials von 70.924 TJ bzw. 19.701 GWh in dem zuvor beschriebenen BHKW eingesetzt wird.

Generell wird wie für Deutschland angenommen, dass 10 % der produzierten Wärme extern genutzt werden können und fossile Energieträger ersetzen (wie für Deutschland 50 % Erdgas, 50 % Heizöl).

Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Abbildung 16 und Tabelle 23 dargestellt.

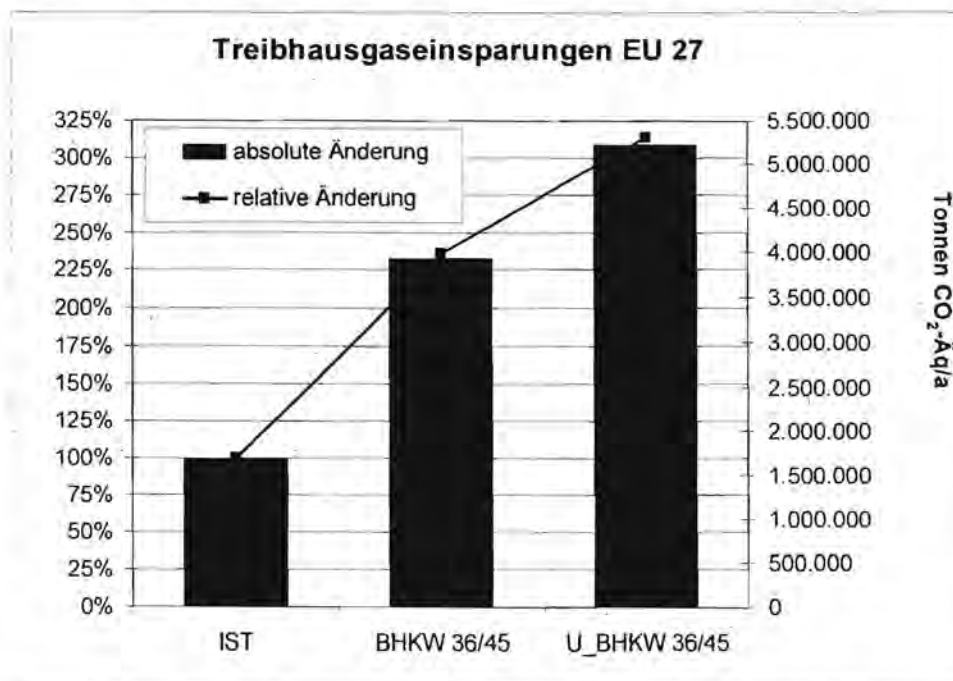


Abbildung 16: Ermittelte Treibhausgaseinsparpotenziale für die EU 27 im Überblick

Tabelle 23: Überblick der ermittelten Treibhausgaseinsparpotenziale für die EU 27

Szenario	Treibhausgasemissionen [t CO ₂ -Äq/a]	Zusätzliche Treibhausgasein- sparung [t CO ₂ -Äq/a]
IST	1.666.909	
BHKW 36/45	3.926.140	2.259.231
U_BHKW 36/45	5.224.148	3.557.239

Würde zur Anrechnung der erzeugten Strommenge statt dem Marginalstrom der Strommix EU 27 verwendet werden, so läge die gesamte Treibhausgaseinsparung im Ist Szenario um rund 24 % niedriger und in den beiden weiteren Szenarien um jeweils rund 26 %.

Die Übersicht der Ergebnisse zeigt, dass durch die beiden definierten Optimierungsszenarien die Treibhausgaseinsparung des Ist Szenarios verdoppelt und verdreifacht werden könnte. Auch für die EU 27 gilt, dass eine weitere Steigerung durch eine umfassender externe Wärmenutzung möglich wäre. Generell können die hier ermittelten Klimaschutzpotenziale für die EU 27 aber nur als Orientierungswerte dienen. Aufgrund der schlechten Datenlage musste weitgehend auf plausible Annahmen und Schätzungen zurückgegriffen werden.

Die nach diesen Schätzungen gegebenen zusätzlichen Treibhausgaseinsparpotenziale von 2,26 Mio. t CO₂-Äq bzw. 3,56 Mio. t CO₂-Äq entsprechen umgerechnet den Treibhausgasemissionen wie sie im Durchschnitt jährlich von rund 220.000 bzw. 350.000 Einwohnern der EU 27 verursacht werden.

4.4 Zusammenfassung zum Potenzial der Faulgasnutzung

Die Klärgaserzeugung und -nutzung leistet grundsätzlich einen Beitrag zum Klimaschutz, da aus Abfallstoffen regenerative Energie erzeugt wird. Nach dem derzeitigen Stand für Deutschland werden bereits knapp 80 % des Rohschlammes zur Klärgaserzeugung in Faulbehältern eingesetzt. Die verbleibenden 20 % bislang aerob behandelter Rohschlammengen könnten wirtschaftlich auf eine anaerobe Behandlung umgestellt werden, insofern es sich um größere Anlagen handelt. Zur Ermittlung des Klimaschutzpotenzials wurde angenommen, dass bis zu 95 % des Rohschlammes anaerob behandelt werden könnten. In welchem Umfang hier auch kleinere Anlagen betroffen sind, für die sich eine Umstellung aus wirtschaftlicher Sicht schwierig darstellt, kann nicht aus der öffentlichen Statistik entnommen werden. Auch die Nutzung der bereits erzeugten Mengen Klärgas zeigt ein Optimierungspotenzial durch vollständigen Einsatz in BHKW mit gesteigerten Wirkungsgraden. Insbesondere günstig stellt sich hierbei der Einsatz in einem BZ-BHKW dar bedingt durch dessen vergleichsweise hohen Stromwirkungsgrad. Insgesamt sind gegenüber dem Ist Szenario zusätzliche Einsparungen zwischen rd. 175.000 t CO₂-Äq/a und 911.000 t CO₂-Äq/a erzielbar. Umgerechnet auf Einwohnerzahlen in Deutschland entspricht dies den Treibhausgasemissionen, die im Durchschnitt jährlich von rd. 15.400 bis 80.500 Einwohnern verursacht werden.

Ein darüber hinaus gehendes Einsparpotenzial aus der Faulgaserzeugung und -nutzung ließe sich erreichen, wenn die erzeugte Wärme verstärkt extern genutzt werden könnte. Daneben ermöglichen weitere Maßnahmen, die im Rahmen dieser Studie nicht quantifiziert werden konnten, eine Steigerung der Faulgasausbeute. Hierzu zählen die Kofermentation organischer Reststoffe, ein optimierter Faulbehälterbetrieb, die Verkürzung des Schlammal-

ters aus der Belebung und die Desintegration des Schlamms. Durch letzteres können nach Untersuchungen an der PFI Hamburg 20-30 % höhere Gasausbeuten erzielt werden²⁹.

Für die EU 27 ist eine deutlich schlechtere Datenlage hinsichtlich der Klärgaserzeugung und -nutzung gegeben. Sowohl die Ist Situation als auch die Potenziale der Klärgaserzeugung mussten abgeschätzt werden. Insofern ist das Ergebnis rein als orientierend anzusehen. Nach den Schätzungen ergeben sich zusätzliche Treibhausgaseinsparpotenziale von 2,26 Mio. t CO₂-Äq bzw. 3,56 Mio. t CO₂-Äq, die etwa den Treibhausgasemissionen entsprechen wie sie im Durchschnitt jährlich von rund 220.000 bzw. 350.000 Einwohnern der EU 27 verursacht werden.

²⁹ Auskunft Herr Assmann, Juni 2009

5 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Treibhausgaseinsparpotenziale für ausgewählte Teilbereiche der Abwasserwirtschaft – das Wärmepotenzial aus Abwasser sowie das Potenzial der Faulgasnutzung – ermittelt. Für beide Bereiche konnten Einsparpotenziale festgestellt werden, die sich auch technisch-wirtschaftlich darstellen lassen.

Für die Wärmenutzung aus der Abwasserkanalisation in Deutschland wurde nach konservativen Abschätzungen und Berechnungen ermittelt, dass je nach eingesetzter Technologie jährlich zwischen 0,6 und 1,25 Mio. t CO₂-Äq eingespart werden könnten. Dies entspricht den Jahresemissionen, wie sie durchschnittlich von rd. 56.000 bis 111.000 Einwohnern in Deutschland verursacht werden. Zur Erschließung dieses Potenzials könnten bereits etwa 25 Projekte je Großstadt ausreichen. Unter den hier getroffenen konservativen Annahmen, ist davon auszugehen, dass eine solche Projektrealisierung wirtschaftlich darstellbar ist (vgl. Kapitel 3.3.3). Das Einsparpotenzial könnte durch Anlagen, die auch zur Kälteerzeugung eingesetzt werden, noch erhöht werden.

Für die Klärgaserzeugung und -nutzung konnten in Deutschland über verschiedene Szenarien der optimierten Nutzung in effizienten BHKW und der gesteigerten Erzeugung von Klärgas zusätzliche Treibhausgaseinsparungen zwischen rd. 175.000 t CO₂-Äq/a und 911.000 t CO₂-Äq/a ermittelt werden. Umgerechnet auf Einwohnerzahlen in Deutschland entspricht dies den Treibhausgasemissionen, die im Durchschnitt jährlich von rd. 15.400 bis 80.500 Einwohnern verursacht werden. Dieses Einsparpotenzial könnte durch eine gesteigerte Nutzung der Wärme, die nicht für den Eigenbedarf gebraucht wird, weiter erhöht werden. Auch kann durch Maßnahmen wie Desintegration des Schlammes, Verkürzung des Schlammalters aus der Belebung oder Co-Fermentation von organischen Reststoffen die Faulgasmenge und damit das Treibhausgaseinsparpotenzial weiter gesteigert werden.

Zusammen könnten demzufolge durch die beiden untersuchten Bereiche Wärmenutzung aus der Abwasserkanalisation und Klärgasnutzung zusätzliche Treibhausgaspotenziale von etwa 0,8 Mio. bis 2,2 Mio. t CO₂-Äq realisiert und damit die Treibhausgasemissionen von etwa 70.000 bis 200.000 Einwohnern ausgeglichen werden. Das entspricht etwa 1 % bis 2,5 % der Gesamteinsparung durch Strom- und Wärmebereitstellung aus Erneuerbaren Energien (BMU 2008).

Für die EU 27 konnten die weiteren Klimaschutzpotenziale aufgrund der schwierigen Datelage nur grob ermittelt werden. Das Treibhausgaseinsparpotenzial für die Wärmenutzung aus der Abwasserkanalisation liegt bei vorsichtiger Abschätzung der Potenziale insgesamt bei 2,9 Mio. bis 5,1 Mio. t CO₂-Äq/a. Dies entspricht den jährlichen Treibhausgasemissionen, die von durchschnittlich 280.000 bis 497.000 EU-Bürgern verursacht werden. Unterstellt man für die EU 27 ein spezifisches nutzbares Wärmepotenzial im Abwasser wie in Deutschland, läge das Einsparpotenzial zwischen 4,2 Mio. und 7,5 Mio. t CO₂-Äq/a. Das ermittelte Treibhausgaseinsparpotenzial für Optimierung der Klärgaserzeugung und -nutzung basiert weitgehend auf Annahmen und Schätzwerten. Nach diesen ergeben sich Klimaschutzpotenziale von 2,26 Mio. t CO₂-Äq bzw. 3,56 Mio. t CO₂-Äq, die etwa den Treibhausgasemissionen entsprechen wie sie im Durchschnitt jährlich von rund 220.000 bzw. 350.000 Einwohnern der EU 27 verursacht werden.

Insgesamt kann die Abwasserwirtschaft durch Einsparungen beim Verbrauch von Energie auf den Kläranlagen³⁰, der konsequenten Nutzung von Klärgas und der Umsetzung von Projekten zur Nutzung der Wärme aus der Abwasserkanalisation zusätzlich zu den eigentlichen Aufgaben zur Reinhaltung der Gewässer auch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Erwartungsgemäß ist dieser Beitrag im Vergleich zur Energiebranche relativ gering. Dennoch sind die Potenziale in der Abwasserwirtschaft wichtige Beiträge zur Erreichung der Reduktionsziele in Deutschland und Europa, die nur erreichbar sind, wenn alle umsetzbaren Potenziale genutzt werden. Zudem sind mit der Nutzung der Potenziale aus der Abwasserwirtschaft keine relevanten Nutzungskonflikte verbunden, im Gegensatz zur Nutzung angebauter Biomasse, die zu erheblichen Konkurrenzen in den Bereichen Nahrungsmittelproduktion und Naturschutz führen kann. Auch ist das Energiedargebot beispielsweise bei der Nutzung der Wärme aus der Kanalisation im Gegensatz zur Windenergie immer und fast überall verfügbar. Deshalb stellt die Nutzung der Potenziale im Bereich der Abwasserwirtschaft eine sinnvolle Ergänzung zu der bisherigen Nutzung von Erneuerbaren Energien dar.

³⁰ Diese zu Bilanzieren war nicht Bestandteil dieser Studie

6 Literatur

- Afjei et al. 2007 Afjei, T., R. Dott, et al. „Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen.“ Ittingen, Institut für Energie am Bau, Huber Energietechnik AG, 2007
- ASUE 2006 „Abbildung Gasmotorwärmepumpe (Wärmetransport und Funktion)“, 2006
- ASUE 2005 BHKW-Kenndaten 2005 – Module, Anbieter, Kosten. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE)
- ATV-DVWK 2002 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt ATV-DVWK-M 363: Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen, August 2002
- BINE 2006 BINE Informationsdienst „Energie sparen bei der Kälteerzeugung“. Bonn, 2006
- BMU 2008 Erneuerbare Energien in Zahlen, Stand Juni 2008, Berlin 2008
- BMWi 2008 Energieverbrauch nach Anwendungen, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft - Projektgruppe Nutzenergiebilanzen, 2008
- bte, IFEU, ISA 2004 Ökobilanzielle Bewertung neuartiger Energieversorgungssysteme für Kläranlagen unter besonderer Berücksichtigung der Wasserstofftechnologie; Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag des MUNLV NRW, AZ IV – 9 – 042 426, Dezember 2004
- Christ, Mitsdoerffer 2008 Christ, O. und Mitsdoerffer, R. "Regenerative Energie nutzen - Wärmequelle Abwasser." WWT - Wasserwirtschaft Wassertechnik(05/2008): M6 - M12
- DBU 2005 Deutsche Bundeshilfe Umwelt „Energie aus Abwasser - Leitfaden für Ingenieure und Planer“ Bern/Osnabrück, 2005
- DWA 2008 Brune, P., et al. : Energie aus Abwasser - Wärme- und Lageenergie. Merkblatt DWA-M 114 – DWA-Regelwerk, Hennef, 2008
- EC 2009 Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2007 and inventory report 2009. Technical report No 04/2009, Version 15 April 2009
- effiziento 2009 Wärmepumpenkühlung - Die Wärmepumpe als Klimaanlage. Effiziento Haustechnik GmbH, 2009
- IFEU 2009 Grundsatzstudie: Stand der Technik der Klärschlammbehandlung. IFEU Heidelberg in Kooperation mit Dr. Born - Dr. Ermel im Auftrag der Stadtentwässerung Frankfurt/Main, unterstützt von den Stadtentwässerungswerken der Städte Mannheim, Stuttgart, Karlsruhe, München, Augsburg, Zürich, in Bearbeitung

- IFEU/Wuppertal-Institut 2008 Schüwer, D., Fishedick, M. et al.: Mini-Technologiefolgenabschätzung Gas-Wärmepumpe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH und ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, 2008
- IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 6, Wastewater Treatment and Discharge. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006
- LfU Bayern 2006 Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projekt Nr. 1325). Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2006
- MUFV 2007 Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (MUFV) Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Oktober 2007
- MUNLV 2001 Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Berichte zur Umwelt Bereich Abfall Band 5. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Düsseldorf, Mai 2001
- MUNLV 1999 Müller, E. A.; Kobel, B.; Künti, Th.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Schaab, R.; Böcker, K.: Handbuch Energie in Kläranlagen. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1999
- Müller et al. 2005 Müller, E. A., F. Schmid, et al.: Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauherren und Kommunen. Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Arbeitsgemeinschaft für sparsame Energie- und Wasserverwendung (ASEW) GbR im Verband kommunaler Unternehmen, Institut Energie in Infrastrukturanlagen, 2005
- Öko-Institut/IFEU 2006 Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Öko-Institut e.V. und IFEU Heidelberg, Ufoplan-Vorhaben 205 33 313. Darmstadt, Heidelberg 2006
- Piller et al 2007 Piller, S., F. Unger, et al.: AbwasserWärmeNutzung - Leitfaden zur Projektentwicklung. Berlin Graz, Berliner Energieagentur, Grazer Energieagentur: 35, 2007
- Schinnerl o.J. Schinnerl, D. „Technisches und wirtschaftliches Marktpotential der Wärmeenergienutzung aus dem Abwasser in Österreich - Gesamtanalyse für Österreich und spezifische Analyse für zwei unterschiedliche Gemeinden“ Graz, Grazer Energieagentur GmbH, o.J.
- Schmelz 2006 Klärschlamm-mengen und Entsorgungskosten im Vergleich zum europäischen Ausland. Schmelz, K.-G., Emschergenossenschaft, Lippeverband. Fachtagung Klärschlamm in Bonn am 6. und 7.12.2006

- Schneider et al. 2005 Schneider, N., Wagner, A. et al.: Solarwärme optimal nutzen - Handbuch für Technik, Planung und Montage. Cölbe, Wagner & Solar-technik GmbH, 2005
- Seefeldt et al. 2007 Seefeldt, F., Wunsch, M. und Michelsen, C.: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklung. porgnos: Basel, Berlin, 2007
- STBA 2009 Produzierendes Gewerbe, ausgewählte Zahlen zur Energiewirtschaft Dezember 2008, Fachserie 4, Reihe 6.5, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2009
- STBA 2006 Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2004, Fachserie 19 Reihe 2.1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2006
- Studer 2008 Abwasser - die ungenutzte Wärmequelle. 2008, Rabtherm AG (CH)
- UBA 2008a Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Arbeitsgemeinschaft iat – Ingenieurberatung für Abwassertechnik in Zusammenarbeit mit Universitäten Stuttgart und TU Kaiserslautern sowie Ryser Ingenieure Bern. UBA Texte 11-08, FZK 205 26 307, Dessau-Roßlau März 2008
- UBA 2008b Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2007. Umweltbundesamt: Dessau, 2008
- UBA 2009 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2007. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009. UBA-Texte 02-09. Umweltbundesamt, April 2009
- Uni Kassel 2009 Vorlesung Siedlungswasserwirtschaft 4, SS 2009
- Uni-Oldenburg 2007 Hydrologie – Wasserverbrauch. Universität Oldenburg, 2007
- Uni Stuttgart o.J. Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen - Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft und Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Im Rahmen des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS), FKZ BWI 22006, gefördert durch das Land Baden-Württemberg
- Wanner 2004 Wanner, O.: Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Dübendorf, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 2004
- Wikipedia 2009 http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Gro%C3%9Fst%C3%A4dte_in_Deutschland

Anhang

Quelle: (ASUE 2005)

Klärgas-Maschinen

von 16 bis 800 kW

Firma	Typ	Motor	P _{el} [kW]	P _{in} [kW]	P _{mechan} [kW]	η _{el} [%]	η _{in} [%]	η _{mech} [%]	Mittlerer eff. Druck [bar]	Schallstf. minderung [%]	NO _x [mg/Nm³]	CO [mg/Nm³]	Schall ¹ in 1 m [dBA]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Gewicht [kg]
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 016 K	KS K EKO 8031 G	16	33	58	28%	57%	84%	7,8	Ohl-Kat	250	300	70	2100	900	1400	950
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 030 K	MAN 0824 E	30	60	105	29%	57%	86%	6,5	3-Wege-Kat	250	300	70	2200	1000	1900	1500
Köhler und Ziegler	SY 033 GSM	MAN GE 0824	33	58	100	33%	58%	97%	6,5	Magerbetrieb	500	1000	68	2965	960	1450	1390
FIAMAG GmbH	BSN 033	Catapiller 3304 NA	33	64	113	29%	57%	86%	4,1	Magerbetrieb	500	650	75	2000	900	2000	2700
Köhler und Ziegler	AS 033 GSM	MAN GE 0824	33	58	100	33%	58%	97%	6,5	Magerbetrieb	500	650	68	2965	960	1450	1390
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 050 K	MAN E 0826 E	50	93	165	30%	56%	87%	6,5	Ohl-Kat	250	300	70	2800	1000	1900	2100
Köhler und Ziegler	AS 053 GSM	MAN GE 0836	53	87	158	34%	59%	89%	6,5	Magerbetrieb	500	1000	68	3250	960	1480	2620
FIAMAG GmbH	BSN 065	Catapiller 3306 NA	65	126	221	29%	57%	86%	101	Magerbetrieb	500	650	75	2600	1000	2000	3000
FIAMAG GmbH	BSN 065	CAT 3306 NA	65	126	221	29%	57%	86%	101	Magerbetrieb	500	650	75	2600	1000	2000	3000
Köhler und Ziegler	AS 075 GDMU	MAN GE 0836 LE 202	75	111	214	33%	52%	87%	9,3	Magerbetrieb	500	1000	70	3700	1160	1900	3150
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 075 K	MAN E 2876 E	75	130	240	31%	54%	85%	8,1	Ohl-Kat	250	300	70	3200	1250	2150	3200
Köhler und Ziegler	AS 080 GSM	MAN GE 2876	80	140	248	32%	56%	89%	5,7	Magerbetrieb	500	1000	70	3700	1160	1900	4280
Köhler und Ziegler	AS 090 GDMU	MAN GE 2876	90	140	265	34%	53%	87%	11,1	Magerbetrieb	500	1000	70	3250	960	1480	2850
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 100 K	MAN E 2876 TE	100	174	370	32%	56%	88%	6,9	Ohl-Kat	250	300	70	3200	1250	2150	3400
FIAMAG GmbH	BSN 115	Catapiller 3306 TA	115	190	350	33%	54%	87%	101	Magerbetrieb	500	650	75	2600	1200	2000	3200
Köhler und Ziegler	AS 130 GDMU	MAN GE 2876	130	205	375	35%	55%	89%	11,1	Ohne	500	1000	70	3850	1400	2000	4500
Köhler und Ziegler	SY 145 GDMU	MAN GE 2866	145	246	439	33%	56%	89%	102	Ohne	500	1000	70	3700	1160	1900	4310
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 150 K	MAN E 2876 LE	150	176	400	38%	44%	82%	12,8	3-Wege-Kat	250	300	70	3200	1250	2150	4800
FIAMAG GmbH	BSN 170	Catapiller 3406 TA	174	256	501	33%	57%	86%	9,2	Magerbetrieb	500	650	75	4000	1900	2000	4500
MDE Darentale Energietechnik GmbH	MB 3066 L1	MDE B 3066 L1	174	252	501	33%	57%	86%	11,8	Magerbetrieb	500	1000	70	3520	1800	2060	4200
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 180 K	MAN E 2876 LE	180	244	493	37%	49%	86%	12,5	Ohl-Kat	250	300	70	3200	1250	2150	4200
Köhler und Ziegler	SY 185 GDMU	MAN 2876 LE 302	185	223	480	29%	46%	85%	11,1	Ohne	500	1000	74	3700	1200	2025	4750
FIAMAG GmbH	BSN 215	Catapiller 3408 TA	216	325	649	33%	50%	83%	12,4	Magerbetrieb	500	650	75	4000	1900	2000	4600
Köhler und Ziegler	SY 265 GDMU	MAN 2842 LE 302	265	408	765	35%	53%	88%	11,1	Ohne	500	1000	74	4650	1500	2000	5200
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 300 K	MAN 2842 LE	300	466	856	35%	54%	89%	11,6	Ohl-Kat	250	300	70	3500	1500	2150	5900
Köhler und Ziegler	SY 315 GDMU	MAN GE 2842	315	488	895	35%	55%	90%	12,0	Ohne	500	1000	74	4650	1500	2010	5800
Energietechnik Kuntzsch + Schlier GmbH	GT K 340 K	MAN 2842 LE	340	448	968	36%	47%	83%	13,1	Ohl-Kat	250	300	70	3900	1500	2150	5700
Köhler und Ziegler	SY 342 GDMU	MAN GE 2842 LE 312	342	476	922	37%	52%	89%	11,1	Ohne	500	1000	74	4650	1300	2100	6700
FIAMAG GmbH	BSN 360	Catapiller 3412 TA	360	467	1007	36%	46%	82%	12,4	Magerbetrieb	500	650	75	4200	1900	2000	5300
MDE Darentale Energietechnik GmbH	MB 3042 L1	MDE B 3042 L1	370	439	941	33%	57%	86%	12,4	Magerbetrieb	500	1000	68	3700	1810	2270	4700
FIAMAG GmbH	BSN 403	CAT 3412 TA	403	508	1089	37%	47%	84%	12,4	3-Wege-Kat	250	300	75	4200	1900	2000	5300
Köhler und Ziegler	SY 415 GDMU	Perkins 4008 TBS1140 HC	415	596	1157	36%	57%	87%	11,3	Ohne	500	1000	76	4800	2100	2150	9500
Köhler und Ziegler	SY 500 GDMU	Perkins 4012	500	744	1430	35%	52%	87%	11,1	Ohne	500	1000	76	5500	2500	2500	13.500
Köhler und Ziegler	SY 611 GDMU	Perkins 4012 TBS1140 HC	611	881	1700	34%	52%	88%	11,0	Ohne	500	1000	81	5500	2500	2500	13.500
Köhler und Ziegler	SY 800 GDMU	Perkins 4016 TBS1140 HC	800	1235	2277	35%	54%	89%	11,1	Ohne	500	1000	83	5500	2100	2310	15.500

¹ Leistungswerte in gemäß H₂ und H₂O angegeben
* Schallangaben mit Schallkammer

Quelle: Köhler-Ziegler

Klärgasbetriebene Blockheizkraftwerke 50 - 1703 kW elektrisch

CHP-units, powered by sewagegas 50 - 1703 kW electrical



Modell Typ	Elektrische Leistung	Thermische Leistung	Brennstoffleistung	Emissionen nach TA LIA	Schallschutzgehäuse	Gewicht trocken	Geräusch	Wirkungsgrad elektrisch	Wirkungsgrad thermisch	Wirkungsgrad gesamt
module type	weirinc output	thermal output	fuel consumption	emissions acc. TA Luft	noise protection cabine dimension	weight dry	noise			
	kW	kW	CO mg/kWh	NO _x mg/kWh	L x B x H (m)	kg	dBA/1m %	%	%	%
Asynchron (AS) - Netzparallelbetrieb										
<i>synchronous (AS) - in combination with the grid</i>										
Magnetisagenerator (lambda geregelt)										
<i>isem burn aspirating engine (lambda controlled)</i>										
AS 050 GSM	50	85	157	1000	500	3,25x0,96x1,66	2.340	68	33,64	55,05 88,61
AS 090 GSM	90	140	248	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.900	70	32,26	56,45 88,71
Magnetisagenerator mit Ladeluftfilter (lambda geregelt)										
<i>isem burn engine with turbo-charger and intercooler (lambda controlled)</i>										
AS 075 GSMTL	75	111	214	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.020	70	35,05	51,87 86,92
AS 090 GSMTL	90	131	251	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.160	70	35,86	52,19 88,05
AS 100 GSMTL	100	128	286	500	500	3,70x1,16x1,90	3.370	70	37,59	48,12 85,71
Synchron (SY) - Netzparallelbetrieb,										
<i>auch geeignet für Inselantriebsbetrieb / synchronous (SY) - in combination with the grid, also qualified for island condition</i>										
Magnetisagenerator (lambda geregelt)										
<i>isem burn aspirating engine (lambda controlled)</i>										
SY 050 GSM	50	85	157	1000	500	3,25x0,96x1,66	2.360	68	31,85	54,14 85,98
SY 086 GSM	86	149	265	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.820	70	32,45	66,23 88,68
Magnetisagenerator mit Ladeluftfilter (lambda geregelt)										
<i>isem burn engine with turbocharger and intercooler (lambda controlled)</i>										
SY 090 GSMTL	90	131	251	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.220	70	36,96	52,19 88,05
SY 100 GSMTL	100	128	264	1000	500	3,70x1,16x1,90	3.370	70	37,88	48,48 86,36
SY 124 GSMT	124	178	343	1000	500	3,70x1,16x1,90	4.150	70	38,15	51,90 88,05
SY 185 GSMTL	185	223	480	1000	500	3,70x1,20x2,03	4.500	72	38,54	46,46 85,00
SY 347 GSMTL	347	432	922	1000	500	4,65x1,70x2,10	6.450	74	37,64	46,85 84,49
SY 520 GSMTL	520	547	1.321	1000	500	3,70x1,45x2,20	6.700	89	39,36	41,41 89,77
SY 640 GSMTL	640	825	1.587	1000	500	4,00x1,45x2,20	6.570	101	40,33	39,38 79,71
SY 716 GSMTL	716	740	1.777	1000	500	4,00x1,45x2,20	6.570	101	40,29	41,64 81,94
SY 1022 GSMTL	1022	1070	2.489	1000	500	5,50x1,30x2,60	9.700	103	41,05	42,99 84,05
SY 1364 GSMTL	1364	1440	3.329	1000	500	6,30x1,80x2,60	13.400	108	40,97	43,35 84,23
SY 1703 GSMTL	1703	1781	4.158	1000	500	7,30x1,80x2,60	17.300	109	40,96	42,83 83,79

Maschinen ohne Schallschutzkabine: Abmessungen sind reine Maschineabmessungen und der Schallpegel bezieht sich auf das ungedämpfte Motorengeräusch.
 (Line without noise reduction cabin)

[illegible][illegible]