

Texte

**11**  
**08**

ISSN  
1862-4804

## Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen

Umwelt  
Bundes  
Amt 

Für Mensch und Umwelt



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 205 26 307  
UBA-FB 001075



## Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen

von

**Bernd Haberkern**

**Dr. Werner Maier**

**Ursula Schneider**

Arbeitsgemeinschaft iat - Ingenieurberatung für Abwassertechnik  
in Zusammenarbeit mit  
Universitäten Stuttgart und TU Kaiserslautern sowie  
Ryser Ingenieure Bern

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist auch als Download unter  
<http://www.umweltbundesamt.de>  
verfügbar.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr  
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und  
Vollständigkeit der Angaben sowie für  
die Beachtung Rechte Dritter.  
Die in der Studie geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 1406  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel.: +49-340-2103-0  
Telefax: +49-340-2103 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 3.4  
Klaus Fricke

Dessau-Roßlau, März 2008

**Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Natur-  
schutz und Reaktorsicherheit**

**Abwasserwirtschaft  
Förderkennzeichen (UFOPLAN) 205 26 307**

**Steigerung der Energieeffizienz  
auf kommunalen Kläranlagen**

von

**Bernd Haberkern  
Dr. Werner Maier  
Ursula Schneider  
Arbeitsgemeinschaft iat - Ingenieurberatung für Abwasser-  
technik**

in Zusammenarbeit mit

**Universitäten Stuttgart und TU Kaiserslautern sowie  
Ryser Ingenieure Bern**

**Im Auftrag des Bundesumweltamtes**

**November 2006**

**Berichtskennblatt**

<b>1. Berichtsnummer</b> UBA-FB	<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>4. Titel des Berichtes</b> Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen		
<b>5. Autoren</b> Dipl.-Ing. Haberkern, Bernd Dr.-Ing. Maier, Werner Dipl.-Ing. Schneider, Ursula		<b>8. Abschlussdatum:</b> November 2006
		<b>9. Veröffentlichungsdatum:</b>
<b>6. Durchführende Institution</b> iat-Ingenieurberatung für Abwassertechnik, Darmstadt und Stuttgart Havelstr. 7a 64295 Darmstadt		<b>10. UFOPLAN-Nr.</b> 205 26 307
		<b>11. Seitenzahl 222</b>
		<b>12. Literaturangaben: 258</b>
<b>7. Fördernde Institution</b> Umweltbundesamt Wörlitzerplatz 1 06844 Dessau		<b>13. Tabellen: 13</b>
		<b>14. Abbildungen: 35</b>
<b>15. Zusätzliche Angaben</b> Die Autoren möchten sich bei den Mitgliedern der begleitenden Fachgruppe für die Mitwirkung bedanken: H. Prof. Dr. J. Hahn und H. Dipl.-Ing. K. Fricke, UBA Berlin; H. Dipl.-Ing. B. Kobel, Ryser Ingenieure AG, Bern; H. Dr.-Ing. J. Hansen und Fr. Dr.-Ing. H. Steinmetz, Tectraa TU Kaiserslautern; H. Dipl.-Ing. Keicher, Klaus und H. Dr.-Ing. M. Roth ISWA, Universität Stuttgart		
<b>16. Kurzfassung</b> Im Hinblick auf die Novellierung der Abwasserverordnung zur Umsetzung der IVU-Richtlinie ist der Stand der Technik bezüglich Energieeffizienz in Kläranlagen in Deutschland zu definieren. Dazu wurden in der Studie die gängigen Verfahren der Abwasserbehandlung sowie neuere Techniken (z.B. Membranbehandlung, Kofermentation, P-Rückgewinnung) auf ihre Energieeffizienz untersucht. Zusätzlich wurde der Verbreitungsgrad der verschiedenen Abwasser- und Klärschlammbehandlungsarten nach Größenklassen auf Bundesebene abgeschätzt. Die Ermittlung von Ist- und Zielwerten für den spezifischen Energieverbrauch [kwh/(EW.a)] erlaubte für verschiedene Szenarien die Berechnung des möglichen bundesweiten Einsparpotenzials an Energie in Kläranlagen bzw. des Mehrverbrauchs durch neue Verfahren.  Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Energieoptimierung und Kläranlagenbetrieb konnten geeignete Ansatzpunkte für eine Steigerung der Energieeffizienz identifiziert und nach ihrer Relevanz gewichtet werden. Anhand von Fallbeispielen wurde die praktische Umsetzbarkeit der Maßnahmen belegt. Daraus wurden konkrete Vorschläge für eine gesetzliche Neuregelung der Mindestanforderungen für die Energieeffizienz in Kläranlagen abgeleitet.		
<b>17. Schlagwörter</b> Energieoptimierung, Energieeffizienz, Abwasserbehandlung, Klimaschutz, Faulgasverwertung, Stromeinsparung, Energiebilanz, BVT, Stand der Technik		
<b>18.</b>	<b>19.</b>	<b>20.</b>

## Report Cover Sheet

<b>1. Report No.</b> UBA-FB	<b>2.</b>	<b>3.</b>
<b>4. Report Title</b> Enhanced energy efficiency in waste water treatment plants		
<b>5. Authors</b> Dipl.-Ing. Haberkern, Bernd Dr.-Ing. Maier, Werner Dipl.-Ing. Schneider, Ursula	<b>8. Report Date:</b> November 2006	
	<b>9. Publication Date:</b>	
<b>6. Performing Organisation</b> iat-Ingenieurberatung für Abwassertechnik, Darmstadt und Stuttgart Havelstr. 7a 64295 Darmstadt	<b>10. UFOPLAN-Ref. No.</b> 205 26 307	
	<b>11. No. of pages: 222</b>	
	<b>12. No. of References: 258</b>	
<b>7. Funding Agency</b> Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Wörlitzerplatz 1 06844 Dessau	<b>13. No. of Tables: 13</b>	
	<b>14. No. of Figures: 35</b>	
<b>15. Supplementary Notes</b> The authors would like to thank the participants of an advising committee for accompanying the study: Prof. Dr. J. Hahn and Dipl.-Ing. K. Fricke, UBA Berlin/Dessau; Dipl.-Ing. B. Kobel, Ryser Ingenieure AG, Bern; Dr.-Ing. J. Hansen and Dr.-Ing. H. Steinmetz, Tectraa TU Kaiserslautern; Dipl.-Ing. Keicher, Klaus and Dr.-Ing. M. Roth, ISWA University Stuttgart		
<b>16. Abstract</b> In order to implement the requests of EU-IPCC-directive in a new decree for waste water treatment in Germany, best available techniques have to be defined to optimize energy efficiency in waste water treatment plants (WWTP). Therefore energy efficiency was investigated for common treatment processes and new technologies like membrane filtration, co-digestion or phosphorus recycling. In addition, the occurrence of different technologies for waste water and sludge treatment was evaluated for different size ranges of treatment plants (in population equivalents, PE) nationwide in Germany. The definition of actual and aimed values for specific energy consumption (in kWh/(PE.a)) allowed to calculate the potential energy savings in WWTP and the additional consumption due to new processes on a national level.  Under consideration of the reciprocations between optimized energy consumption in WWTP and operation practice, toe-holds to increase energy efficiency according to their relevancy for the national balance could be listed. Case studies prove the feasibility of the investigated techniques and allow proposals for minimum requirements in legal regulation concerning energy efficiency in WWTP.		
<b>17. Keywords</b> Energy efficiency, waste water treatment, green house effect, biogas, BAT, energy saving		
<b>18.</b>	<b>19.</b>	<b>20.</b>

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	9
1.1.	Rahmenbedingungen und Aufgabenstellung .....	9
1.2.	Beteiligte am Vorhaben .....	11
2.	Methodik.....	12
2.1.	Angewandte Methodik.....	12
2.2.	Grundlegende Literatur und Informationsquellen .....	16
2.3.	Definition von Parametern und Rechengrößen .....	18
2.4.	Beschreibung der Systemgrenzen für die Betrachtung .....	21
3.	Energieeffizienz im Bestand .....	24
3.1.	Allgemeiner Überblick .....	24
3.2.	Energieeinsatz nach Verfahren und Anlagengröße.....	25
3.2.1	Abwasserbehandlung nach Größenklassen.....	25
3.2.2	Abwasserbehandlung nach angewandten Verfahren.....	28
3.2.3	Klärschlammbehandlung.....	33
3.2.4	Faulgaserzeugung und –verwertung.....	37
3.2.5	Sonstige Regenerative Energien und Anlagenteile .....	42
3.3.	Energiebilanz von Kläranlagen in Deutschland .....	44
3.4.	Festlegung relevanter Bereiche und Verfahren im Bestand .....	48
4.	Neue Techniken und Trends .....	58
4.1.	Überblick über neue Techniken und Trends.....	58
4.2.	Neue Techniken zur Abwasserreinigung.....	63
4.2.1	Membranverfahren.....	63
4.2.2	Hygienisierung von Abwasser .....	67
4.2.3	Abluftbehandlung .....	71
4.2.4	Neuere Ansätze bei der Mess-, Steuer- und Regeltechnik .....	72
4.2.5	Separate Prozesswasserbehandlung.....	75
4.3.	Neue Techniken der Klärschlammbehandlung.....	80
4.3.1	Klärschlammintegration, Energiebedarf und –gewinn .....	80
4.3.2	Kofermentation.....	83
4.3.3	Verfahren der Klärschlamm-trocknung.....	88
4.3.4	Klärschlammvererdung .....	92
4.3.5	Alternativen bei der thermischen Verwertung.....	94
4.3.6	Neuere Verfahren zur Phosphorrückgewinnung .....	97
4.4.	Neue Techniken der Energieumwandlung .....	101
4.4.1	Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzellen.....	101
4.4.2	Neue Trends bei sonstigen Verstromungsanlagen .....	103
4.4.3	Einsatz von energieeffizienten Antrieben .....	108
4.5.	Szenarien für ausgewählte Trends der Abwasserbehandlung .....	111
4.5.1	Bewertung der Relevanz neuer Techniken und Trends .....	111
4.5.2	Szenarien für neue, energieintensive Techniken .....	114
4.5.3	Vergleichende Energiebilanz der Klärschlamm-trennung.....	118
4.5.4	Szenarien für Energieoptimierungen.....	124
4.5.5	Bewertung der Szenarien.....	136
5.	Wechselwirkungen zwischen Energieoptimierung und Kläranlagenbetrieb.....	141
5.1.	Art und Bedeutung der Wechselwirkungen .....	141
5.2.	Beschreibung wichtiger Zusammenhänge .....	146
6.	Definition des Standes der Technik.....	153

6.1.	Methodik zur Festlegung des Standes der Technik.....	153
6.1.1	Geeignete Kriterien und Bezugsgrößen für Energieeffizienz .....	153
6.1.2	Vergleichbarkeit verschiedener Verfahren und Größenklassen .....	157
6.1.3	Begrenzung der Regelungsdichte .....	159
6.1.4	Äußere Randbedingungen .....	160
6.1.5	Festlegung der bestmöglichen Energieeffizienz.....	161
6.1.6	Berücksichtigung der technischen Neuentwicklungen .....	166
6.1.7	Wichtige Schlussfolgerungen .....	167
6.2.	Vorschlag zur gesetzlichen Regelung der Energieeffizienz.....	168
7.	Einsparpotenzial und betriebliche Realität.....	174
7.1.	Energieautarkie auf Kläranlagen: Visionär oder utopisch?.....	174
7.1.1	Grundsätzliche Überlegungen.....	174
7.1.2	Fallbeispiele für Energieoptimierung .....	175
7.1.3	Schlussfolgerungen.....	187
7.2.	Empfehlungen für eine Optimierungsstrategie .....	194
8.	Zusammenfassung .....	196
9.	Literaturverzeichnis .....	203

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 3.2.1: Einfluss von Sonderaggregaten auf Stromverbrauch in GK 1 - 5
- Tab. 4.2.1: Theoretischer Energiebedarf einer kommunalen Membranbelebungsanlage (Krause, 2005)
- Tab. 4.2.2: Spez. Energieverbrauch in Abhängigkeit des Reinigungsziels (Schumacher, 2006; eigene Berechnungen)
- Tab. 4.2.3: Verfahrensvergleich chemisch-physikal. Prozesswasserbehandlung
- Tab. 4.3.1: Übersicht der Verfahren zur Klärschlammintegration
- Tab. 4.3.2: Beispielrechnung zur Energiebilanz der Klärschlammintegration
- Tab. 4.3.3: Zusammensetzung von Biogas und spezifische Gasmengen [Roediger et al., 1990]
- Tab. 4.3.4: Einwohnerspezifischer Energiebedarf für Klärschlamm Trocknung
- Tab. 4.3.5: Verfahrensvergleich der P-Rückgewinnung
- Tab. 4.3.6: Einsparpotenzial bei der P-Rückgewinnung
- Tab. 4.5.1: Vorteile und Nachteile der thermischen Entsorgungsalternativen
- Tab. 4.5.2: Herleitung CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Klärschlammverbrennung
- Tab. 5.2.1: Matrix der Wechselwirkungen
- Tab. 6.1.1: Leistungstabelle unterschiedliche Belüftungssysteme 1989 - 2001
- Tab. 6.2.1: Zielwerte und Toleranzbereich für Energieverbrauch

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 3.2.1: Streubreite des Stromverbrauchs nach Größenklassen (DWA Leistungsvergleich Baden Württemberg 2005)
- Abb. 3.2.2: Anzahl der Kläranlagen und angeschlossene Einwohnerwerte
- Abb. 3.2.3: Spezifische und absolute Stromverbräuche
- Abb. 3.2.4: Spezifischer Stromverbrauch nach Anlagengröße und Verfahren
- Abb. 3.2.5: Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK 2 und 3
- Abb. 3.2.6: Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK 4 und 5
- Abb. 3.2.7: Faulturmvolume und Eigenversorgungsgrad auf KA in Hessen (1996)
- Abb. 3.2.8 Anstieg der Klärgaserzeugung und –nutzung seit 1980
- Abb. 3.2.9 Verwendung des Faulgases von Kläranlagen in Deutschland 2004
- Abb. 3.4.1: Ansatzpunkte zur Energieoptimierung
- Abb. 3.4.2: Modellkläranlage gemäß Handbuch „Energie in Kläranlagen“, 1999
- Abb. 3.4.3a: Stromverbrauch und Einsparpotenzial in effizienten Kläranlagen
- Abb. 3.4.3b: Stromverbrauch und Einsparpotenzial in Kläranlagen mit schlechten Energiekennwerten (beide Abb. aus AGIS, 2001)
- Abb. 4.2.1: Abhängigkeit zwischen Stromverbrauch und Zulaufmenge bei Biomembrananlage (Krampe und Laufer, 2006)
- Abb. 4.3.1: Phosphorpotenzial der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland (Fricke und Bidlingmaier, 2003)
- Abb. 4.4.1 Wirkungsgradkennzeichnung von Drehstrommotoren
- Abb. 4.5.1: Bundesweiter Energiemehrverbrauch für energieintensive Techniken
- Abb. 4.5.2: CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Klärschlammmentsorgungspfade
- Abb. 4.5.3 Wirkungsgrad und Wartung von Pumpen
- Abb. 4.5.4: Energieverbrauch von Pumpwerken in Funktion von  $h_{\text{kum}}$  + Wirkungsgrad
- Abb. 4.5.5: Energieeinsparung bei unterschiedlichen Szenarien
- Abb. 4.5.6: Verstromung von Faulgas bei unterschiedlichen Szenarien
- Abb. 5.2.1: Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Verstopfungsanfälligkeit
- Abb. 5.2.2: Zusammenhang zwischen Fremdwasserzufluss und Faulgaserzeugung (Abwassermengen und Faulgasmengen in m<sup>3</sup>/d)
- Abb. 7.1.1: Lageplan der Kläranlage Strass
- Abb. 7.1.2: ARA Strass: Energieverbrauch der einzelnen Anlagenteile 1996-2005
- Abb. 7.1.2: ARA Strass: Energieverbrauch und Energieerzeugung 1992-2005
- Abb. 7.1.3: Erzielte Einsparungen – Strombezug/Stromerzeugung von 1996 – 2004
- Abb. 7.1.4: Ansicht der Kläranlage Greifswald
- Abb. 7.1.5: Lageplan Kläranlage Balingen
- Abb. 7.1.6: Ansicht Kläranlage Baarbachtal
- Abb. 7.1.7: Stromverbrauch vor/nach Belüfterumbau Januar 03 bis Januar 04
- Abb. 7.1.8: Stromverbrauch der Anlagenteile und Aggregate (kWh/a)
- Abb. 7.1.9: Strombezug Kläranlage Felsberg 2001, 2004 bis 2006
- Abb. 8.1: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente von Ist-Situation und diverser Szenarien

## Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (Summenparameter für biologisch abbaubare Stoffe im Abwasser)
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf (Summenparameter für organische Schmutzfracht im Abwasser)
d	Tag
DWA (früher ATV bzw. ATV-DVWK)	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EMSR-Technik	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EW	Einwohnerwert
GK	Größenklasse
h	Stunde
l	Liter
KA	Kläranlage
kWh (MWh, GWh)	Kilowattstunde (Megawattstunde, Gigawattstunde)
kWh/(EW.a)	Kilowattstunde pro Einwohnerwert und Jahr
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
MBA	Membranbelebungsanlage
N / Nges	Stickstoff /Gesamt-Stickstoff
NH <sub>4</sub> -N	Ammonium-Stickstoff
NRW	Nordrhein-Westfalen
O <sub>2</sub>	Sauerstoffgehalt
oTR	Organischer Anteil an der Trockensubstanz (entspricht dem Glühverlust GV)
Pges	Gesamtphosphorgehalt
pH	der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration (pondus Hydrogenii)
Q	Durchfluss
SBR	Sequencing batch reactor
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TK	Tropfkörper
T [°C]	Temperatur
TR	Trockenrückstand (Abdampfrückstand)
TS	Trockensubstanz (abfiltrierbare Stoffe)
TTK	Tauchtropfkörper
VKB	Vorklärbecken
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie

# 1. Einleitung

## 1.1. Rahmenbedingungen und Aufgabenstellung

Aufgrund des erhöhten Bewusstseins für Energieeinsparung gab es auch bei der Energieoptimierung in Kläranlagen vor der Jahrtausendwende eine Phase intensiver Förderung, die u. a. zur Erstellung des NRW-Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ bzw. Finanzierungsprogrammen zur Durchführung von Energiekonzepten und zur Installation von BHKWs in mehreren Bundesländern geführt hat. Danach kam es dann, u. a. aufgrund auslaufender Programme und sinkender Strompreise, zu einem Rückgang der Aktivitäten, obwohl schon seit Jahren in zahlreichen Studien hohe Einsparpotenziale bis zu 70 % auf Kläranlagen konstatiert oder zumindest proklamiert wurden.

Kläranlagen sind deshalb nach wie vor ein sehr interessanter Ansatzpunkt für Energieoptimierungen. Sie verbrauchen zwar „nur“ knapp ein Prozent des bundesweiten Stromverbrauchs; In den Städten und Gemeinden sind sie aber mit ca. 20 % Anteil am kommunalen Stromverbrauch eindeutig der größte Stromverbraucher vor Schulen, Krankenhäusern, Wasserversorgung, Straßenbeleuchtung etc.

In letzter Zeit hat die Forderung nach energieeffizienten Verfahren auch wieder an Dringlichkeit gewonnen. Zum einen haben die erneut stark steigenden Energiepreise zu einer Renaissance der Anstrengungen von Anlagenbetreibern bei der Stromeinsparung geführt. Zum anderen ist der politische Wille für eine Förderung energieeffizienter Verfahren und regenerativer Energien durch die Konflikte auf den internationalen Energiemärkten und auch durch Vorgaben auf EU-Ebene gestärkt worden.

Für den Abwasserbereich hat vor allem die IVU-Richtlinie mit ihrer nationalen Umsetzung im Wasserhaushaltsgesetz für neue Vorgaben bzgl. der Energieeffizienz gesorgt: Das WHG legt im § 7a fest, dass die Abwasserbehandlung nach dem Stand der Technik zu erfolgen hat. Im Anhang 2 zum § 7a Absatz 5 wird neben verschiedenen anderen Kriterien auch die Energieeffizienz explizit genannt. Die entsprechenden Anforderungen sollen jetzt weiter konkretisiert werden.

Andererseits ergeben sich aufgrund der sehr unterschiedlichen Verfahrenstechniken und lokalen Rahmenbedingungen methodische Schwierigkeiten bei der Definition eines Standes der Technik hinsichtlich Energieeffizienz. Im Gegensatz zum Hochbau, wo eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Objekten gegeben ist, sind Energiekennzahlen im Bereich der Abwasserbehandlung nur bedingt vergleichbar. Ein pauschaler Abgleich mit Ideal- oder Zielwerten ist daher nicht ausreichend.

Auffallend ist auch, dass die tatsächlich realisierten Stromeinsparungen häufig wesentlich niedriger ausfallen, als in Energiekonzepten oder übergreifenden Studien vorhergesagt und/oder die Maßnahmen nur sehr begrenzt umgesetzt werden. Ähnlich wie im Hochbau, wo Passivhaus-Standard nicht ohne weiteres und oft nicht mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand bei Altbauten umgesetzt werden kann, müssen daher beim weit überwiegenden Altbestand der Kläranlagen Abstriche bei der Umsetzbarkeit fortschrittlicher Technologien bzw. bei der Einhaltung von Energiekennzahlen gemacht werden.

Die Definition eines fortschrittlichen Standes der Technik im Sinne der IVU-Richtlinie muss diese Diskrepanzen zwischen theoretischem Anspruch und wirtschaftlicher Mach- und Zumutbarkeit sowie die Unsicherheiten bei der Umsetzung im Kläranlagenbetrieb berücksichtigen. Nur so kann den Anforderungen des WHG § 7a Abs. 5 („praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden“) gemäß den Kriterien des Anhangs 2 Rechnung getragen werden.

Sie muss auch berücksichtigen, dass erhöhte Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen oder an die Rückgewinnung von Nährstoffen (z. B. Phosphor) unter Umständen kollidieren mit dem Streben nach besserer Energieeffizienz. Höhere Anforderungen können sich zum Beispiel durch die Wasserrahmenrichtlinie ab etwa 2009 oder die neue EU-Richtlinie für Badegewässer ergeben. Wir haben dieser Problematik bei der Ausarbeitung unserer Vorschläge zum Stand der Technik in verschiedener Weise Rechnung getragen (s. dazu Kap. 2). Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsprojekt liefert also nicht nur eine Zusammenstellung theoretisch denkbarer Ideallösungen und Zielwerte, sondern auch praxisnahe Vorgaben für die technisch und wirtschaftlich machbare Energieoptimierung. Dazu können vor allem auch die aufgeführten Fallbeispiele Anregungen geben.

## 1.2. Beteiligte am Vorhaben

Zur Konkretisierung der oben genannten neuen Anforderungen und politischen Willenserklärungen hat das Umweltbundesamt die ARGE iat, bestehend aus den beiden Ingenieurbüros iat GmbH, Stuttgart und iat Darmstadt im August 2005 beauftragt, im Rahmen eines einjährigen Forschungsprojektes Grundlagen für die Definition eines Standes der Technik für die Energieeffizienz in Kläranlagen zusammen zu tragen.

Aufgrund des Querschnittcharakters des Projektes und der Vielzahl der berührten Themen sowie der manchmal erforderlichen subjektiven Einschätzung und Gewichtung von Potenzialen für die Energieoptimierung wurde von Anfang an sehr viel Wert gelegt auf einen breiten Erfahrungsaustausch zwischen Experten unterschiedlicher Fachbereiche. Dazu wurde neben der Zusammenarbeit im multidisziplinären iat-Projektteam eine begleitende Fachgruppe eingerichtet, der zusätzlich folgende Mitglieder angehörten:

- H. Prof. Dr. J. Hahn und H. Dipl.-Ing. K. Fricke, UBA Berlin
- H. Dipl.-Ing. B. Kobel, Ryser Ingenieure AG, Bern
- H. Dr.-Ing. J. Hansen und Fr. Dr.-Ing. H. Steinmetz, Tectraa TU Kaiserslautern
- H. Dr.-Ing. M. Roth und H. Dipl.-Ing. K. Keicher, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), Universität Stuttgart

Die Fachgruppe hat in insgesamt drei Etappen (s. Kap. 2.1) die jeweils vorgelegten Zwischenergebnisse überprüft, gemeinsam diskutiert und daraus Anregungen für Ergänzungen und Korrekturen im Schlussbericht erarbeitet.

Darüber hinaus wurden einzelne Spezialthemen direkt vom Fachbereich Abwasser des Instituts ISWA unter Leitung von Herrn Dr.-Ing. J. Krampe bearbeitet:

- Energieverbrauch von Membranverfahren
- Einsatz von Brennstoffzellen in Kläranlagen
- Desinfektion von Kläranlagenabläufen

Die Ausarbeitungen zu einzelnen Themen wie. z.B. Tropfkörper, Klärschlammdeintegration, Abluftbehandlung oder Belüftung wurden auch mit Vertretern von einschlägigen DWA-Arbeitsgruppen und von Hochschulen diskutiert.

## 2. Methodik

### 2.1. Angewandte Methodik

Die in der Einleitung angesprochene Ausgangssituation für diese Studie ist charakterisiert durch folgende Punkte, die die gewählte Methodik bestimmt haben:

- Es gibt relativ umfangreiches Datenmaterial in der Fachliteratur zur Ist-Situation der Energieeffizienz auf Kläranlagen in Deutschland und dem deutschsprachigen Ausland, die jedoch ganz überwiegend aus den Neunziger Jahren stammt. Neuere Untersuchungen liegen nur punktuell vor (s. Kap. 2.2). Das bedeutet, dass neuere technologische Entwicklungen (wie z. B. Membrananlagen, Phosphor-Rückgewinnung, Klärschlamm-Desintegration oder Brennstoffzellen) und Trends bei der Abwasserbehandlung (wie z. B. zunehmende Klärschlammverbrennung) in den Standardwerken zur Energieeffizienz nicht systematisch berücksichtigt sind.
- Beim (Einwohner- oder Fracht-)spezifischen Energieverbrauch weisen die vorliegenden Untersuchungen zwar relativ homogene Durchschnittswerte, aber vor allem in der Einzelbetrachtung von Anlagenteilen auch große Streubreiten auf. Außerdem ergeben sich signifikante Unterschiede bei den spezifischen Werten sowie den dominanten Kläranlagenkonzeptionen einzelner Bundesländer (z.B. Einsatz von Sandfiltern, Verteilung von Größenklassen oder Grad der Faulgasverstromung in NRW i. V. zu Baden-Württemberg).
- Eine genauere bundesweite Energiebilanz von Kläranlagen, die diesen Differenzierungen Rechnung trägt, existiert bisher nicht.
- Trotz vielfältiger Bemühungen der Kläranlagenbetreiber in den letzten Jahren gibt es eine unverändert starke Diskrepanz zwischen theoretisch möglichen „optimalen“ Energieverbrauchswerten und den tatsächlich vorhandenen. Dabei ist unklar, ob dies nur auf ein sehr hohes (theoretisches) Einsparpotenzial hinweist oder auf die mangelnde Übertragbarkeit eines Optimums auf den jeweiligen Einzelfall.

- Die Anwendung pauschaler Zielwerte für den spezifischen Energieverbrauch scheitert möglicherweise auch an den unterschiedlichen Standortvoraussetzungen wie Einleitbedingungen, topographische Randbedingungen, unterschiedliche Abwassermenge und –zusammensetzung, Bestandsschutz für Altanlagen etc. Es muss daher ein Kompromiss zwischen einheitlicher Definition des Standes der Technik und Berücksichtigung örtlicher Besonderheiten gefunden werden.
- Die Energieoptimierung ist nicht primäres Ziel der Abwasserreinigung. Die Gewährleistung einer sicheren Einhaltung von Grenzwerten im Kläranlagenablauf und die Aufrechterhaltung eines geordneten Betriebes hat eindeutig Vorrang.

Aufgrund der genannten Punkte wurde für die vom Auftraggeber vorgegebene Aufgabenstellung folgende Vorgehensweise abgeleitet:

### **Auswertung der Ist-Situation auf Kläranlagen**

1. Auswertung der verfügbaren statistischen Daten zur derzeitigen Häufigkeitsverteilung von Verfahren und Anlagenteilen der Abwasser- und Klärschlammbehandlung sowie ihrer Verteilung auf verschiedene Größenklassen von Kläranlagen. Ausgewertet wurden vor allem Daten der statistischen Bundes- und Landesämter sowie der DWA (die wichtigsten Fundstellen werden im Kapitel 2.2 näher vorgestellt).
2. Auswertung der verfügbaren Daten zum spezifischen Energieverbrauch dieser Verfahren und Anlagengruppen: Grundlage waren vor allem vier größere Auswertungen von Umfragen und Energieanalysen, die ihren Niederschlag in einschlägigen Handbüchern gefunden haben (s. Kap.2.2). Auf eine erneute Beschreibung von Standardverfahren im Hinblick auf den Energieverbrauch wurde verzichtet, da die Darstellung in den Handbüchern überwiegend noch aktuell ist. Deren Daten wurden lediglich einer Plausibilitätsanalyse unterworfen und teilweise ergänzt und fortentwickelt unter Berücksichtigung neuerer Trends und Technologien. Dazu wurde eine umfangreiche Literaturrecherche

durchgeführt und die Ergebnisse abgeglichen mit den Erfahrungswerten der Experten aus der begleitenden Fachgruppe bzw. von DWA-Fachgremien.

3. Festlegung relevanter Verfahren und Anlagen(-gruppen) und Definition von spezifischen Energie-Kennwerten für diese Verfahren; Festlegung von Systemgrenzen der Betrachtung (s. Kap. 2.4). Bei der Einteilung der betrachteten Größenklassen von Kläranlagen wurden aus pragmatischen Gründen die Grenzen der Abwasserverordnung übernommen. Die Sinnhaftigkeit der Grenzen für die Größenklasse 4 sollte aber im Hinblick auf den Übergang zwischen simultaner aerober Schlammstabilisierung und Anlagen mit Schlammfäulung überprüft werden (Grenze bei etwa 20- bis 40.000 EW). Bei der Betrachtung der energierelevanten Verfahren wurde in Größenklasse 4 und 5 im Hinblick auf die Eigenstromerzeugung vor allem differenziert zwischen Stabilisierungsanlagen und Anlagen mit Schlammfäulung.
4. Hochrechnung der Energiebilanz auf Kläranlagen auf der Basis der spezifischen Kennwerte und der statistischen Daten (Ist-Situation für Stromverbrauch, Eigenerzeugung und Bezug in Kap. 3.3).
5. Beschreibung neuer Techniken: Seit der Herausgabe der einschlägigen Energie-Handbücher („Energie in Kläranlagen“ etc.) haben sich „neue Techniken“ entwickelt und teilweise auch bereits etabliert, für die noch keine fundierten Herleitungen von Kennwerten vorlagen. Diese neuen Techniken wurden kurz beschrieben und im Hinblick auf die Energieeffizienz untersucht. Dabei wurde unterschieden zwischen Verfahren, für die bereits großtechnische Erfahrungen mit entsprechenden Daten zum Energieverbrauch vorliegen und Verfahren, die sich erst in der Pilotphase befinden. Außerdem wurden nur solche Verfahren näher betrachtet, für die eine gewisse Verbreitung in der Zukunft zumindest absehbar ist und die außerdem energierelevant sind. Die Auswahl der Verfahren und ihre Beschreibung wird im Kap. 4 näher dargestellt.
6. Szenarien für künftige Trends: Um den subjektiven Charakter der Auswahl neuer Techniken und deren Einfluss auf die Energiebilanz zumindest transparent zu machen, wurden verschiedene Szenarien für die Ausbreitung dieser

Techniken entwickelt. Ebenso wurden Szenarien beschrieben für mögliche Ansätze von Energieoptimierungen. Diese Szenarien erlauben zumindest eine Einschätzung des größenordnungsmäßigen Potenzials verschiedener Maßnahmen für jeweils eine minimale und maximale Extremposition sowie eine „realistische“ Variante. Für diese Szenarien wurden aufgrund der o. g. Daten zum Bestand Energiebilanzen für alle Kläranlagen in Deutschland erstellt und entsprechende Minderungspotenziale für CO<sub>2</sub>-Äquivalente ermittelt. Diese Szenarien erlauben auch die Eingrenzung von relevanten Verfahren und Anlagenteilen, für die eine besondere Definition zum Stand der Technik sinnvoll ist.

7. Wechselwirkungen zwischen Energieoptimierung und Kläranlagenbetrieb: Aufgrund der o. g. Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Energiesparmaßnahmen im praktischen Betrieb und zur Beschreibung möglicher Interessenskonflikte zwischen den verschiedenen Kriterien des Anhangs 2 zum § 7a Abs.5 des WHG (Vorgaben IVU-Richtlinie) werden wichtige Wechselwirkungen dargestellt zwischen Energieoptimierung einerseits und ausgewählten sonstigen Anforderungen (z. B. Klärschlammanfall, Nährstoffrückgewinnung, Betriebsstabilität etc., s. Kap. 5)
8. Definition eines Standes der Technik: Unter Berücksichtigung des technisch Machbaren hinsichtlich Energieeffizienz einerseits und der Einschränkungen durch o. g. Wechselwirkungen und Sachzwänge im Bestand andererseits wird ein Stand der Technik bzgl. Energieeffizienz definiert. Bei der Auswahl spezifischer Kennwerte wurde so stark vereinfacht wie möglich und so stark differenziert wie nötig. Maßstab dafür waren vor allem die Häufigkeit verschiedener Verfahrens(-schritte) und deren Relevanz für die bundesweite Energiebilanz (entsprechend der Szenarien).
9. Fallbeispiele: Im letzten Schritt werden anhand von Fallbeispielen typische Ansatzpunkte, Vorgehensweisen und Ergebnisse von Energieoptimierungen dargestellt. Durch Vergleich von Ist-Situation mit den Zielvorgaben und in Verbindung mit den Ergebnissen der Szenarien werden die Möglichkeiten aber auch Grenzen der technisch und wirtschaftlich machbaren Energieeinsparung

aufgezeigt und im Hinblick auf ihren möglichen Beitrag zum Klimaschutz bewertet. Daraus können Prioritäten für das politische Handeln abgeleitet werden.

Im zeitlichen Ablauf wurde das Projekt in folgende Teilschritte untergliedert, die jeweils in ca. drei Monaten bearbeitet und abschließend von der begleitenden Fachgruppe diskutiert wurden:

1. **Phase: Definition von Größenklassen und Anlagenkonzeptionen für Kläranlagen** (Auswertung von Häufigkeitsverteilungen für Kläranlagentypen und -größen, angewandte Verfahren, Systemgrenzen etc.)
2. **Phase: Definition des fortschrittlichen Standes der Technik** (Zusammenstellung energierelevanter Verfahrensschritte, Auswertung vorhandener Daten über Ist- und Soll-Verbrauch, Auswahl geeigneter Kennwerte, Ableitung von technisch-wirtschaftlich machbaren Standards)
3. **Phase: Soll-Ist-Vergleich für KA und Verfahrensstufen sowie Erstellung einer Matrix der Querverbindungen** (Gegenüberstellung der Ist- und Soll-kennwerte, Abschätzung des theoretischen und technisch-wirtschaftlich machbaren Einsparpotenzials, qualitative Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Energieoptimierung und Kläranlagenbetrieb)
4. **Phase: Erstellung des Schlussberichtes** mit Dokumentation von Referenzen für die Energieoptimierung (Fallbeispiele und methodische Hinweise zur Vorgehensweise bei der Energieoptimierung)

## 2.2. Grundlegende Literatur und Informationsquellen

Wichtigste Datengrundlage für diese Studie sind die bereits in den neunziger Jahren durchgeführten Umfragen, Energie-Analysen, Aktionsprogramme und Auswertungen in der Schweiz und Nordrhein-Westfalen, die zur Erstellung einschlägiger Handbücher geführt haben (Müller et. al., Handbuch „Energie in ARA“, 1994, sowie Umweltministerium NRW (Hrsg.), „Energie in Kläranlagen“, 1999) und für die auch erste Er-

gebnisse von Erfolgskontrollen vorliegen: (Müller, Schmid, Kobel, „Aktion Energie in Kläranlagen – 10 Jahre Erfahrung in der Schweiz“, KA 08/2006)

Hinzu kamen weitere größere Auswertungen flächendeckender Umfragen zu Energiekennwerten mit Ableitung von Empfehlungen:

- in Baden-Württemberg und angrenzenden (Bundes-)Ländern durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch Wasser 4 „Stromverbrauch in kommunalen Kläranlagen“, 1998 (Basis 1.400 Kläranlagen) und ATV-Leitfaden „Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen“, 1999 (Autoren Dr. M. Roth und Dr. P. Baumann)
- in Bayern (295 KA), Niedersachsen (50 KA) und Rheinland-Pfalz (45 KA) durch den ATV-Fachausschuss 3.1, Sprecher Prof. Kapp: „ATV-Arbeitsbericht Energiebilanzierung auf Kläranlagen“, 1999
- in Hessen durch das IMPULS-Programm Hessen, Autor B. Haberkern: „Energieeinsparung in Kläranlagen“, 1998, sowie teilweise eigene, unveröffentlichte Umfrageergebnisse von 1997 (Basis 110 Kläranlagen über 20.000 EW).
- in Österreich im Auftrag des dortigen Bundesumweltministeriums: „Energieoptimierung von Kläranlagen“, 2002, (Basis: Grobanalysen an 172 Kläranlagen über 3.000 EW in Österreich sowie Feinanalysen an 21 ausgewählten Anlagen, erstellt von H. Agis, AEC mit Betreuung durch TU Wien, Prof. Kroiss)

Für die statische Auswertung der Häufigkeitsverteilung bestimmter Verfahrensschritte wurden vor allem die Angaben des Statistischen Bundesamtes verwandt:

- Statistik der öffentlichen Abwasserbeseitigung, Fachserie 19 Reihe 21 und Aufbereitungstabelle K.1 nach Art der Abwasserbehandlung und Ausbaugrößenklassen / pers. Mitteilung) aus der Erhebung für 2001 (veröffentlicht in 2003) und für 2004 (veröffentlicht in 2006).
- Auswertung der Erhebungen zum Mineralölsteuergesetz (Angaben zu Faulgasmengen geordnet nach Größenklassen und Art der Verwertung für 2004)

Für einzelne Parameter wurden auch Sonderauswertungen der statistischen Landesämter hinzugezogen, z.B. „Statistische Daten 3/2004 zur Wasserwirtschaft in Baden-Württemberg“.

Zweite wichtige Quelle zur Häufigkeitsverteilung waren die Auswertungen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, (DWA bzw. früher ATV), insbesondere zum Bereich Klärschlammverwertung. Hier wurden auch zur Beurteilung der historischen Entwicklung folgende Veröffentlichungen ausgewertet:

- ATV-Information „Zahlen zur Abwasser- und Abfallwirtschaft“, 1996
- ATV-DVWK-Broschüre: „Zahlen und Fakten zum Thema Wasser“, 2004
- „Ergebnisse der DWA-Klärschlammhebung 2003“, publiziert 2005

Entgegen ersten Erwartungen konnten aus den laufenden Benchmarking-Projekten in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz kaum Angaben zum Energieverbrauch gewonnen werden. Zum einen war für eine statistische Auswertung die Anzahl der Datensätze relativ gering (z.B. Datenbank des Marktführers Aquabench: 208 Anlagen insgesamt). Vor allem wurden aber nur pauschale Kostenblöcke für KA erfasst oder Energieverbräuche nur unter Betriebskosten subsummiert. Lediglich in Österreich wurden teilweise detaillierte Erhebungen durchgeführt, aus denen das Fallbeispiel ARA Strass als benchmark-Anlage herangezogen wurde.

Auf der Grundlage dieser Daten sowie durch eine umfassende Auswertung der zahllosen Einzelfallbetrachtungen zu Spezialaspekten der Energieoptimierung in der Fachliteratur wurden zunächst die statistisch relevanten Verfahren ausgefiltert und dafür spezifische Kennwerte abgeleitet.

### **2.3. Definition von Parametern und Rechengrößen**

Bei der Herleitung von Kennwerten und dem Vergleich unterschiedlichster Angaben zum Energieverbrauch mussten immer wieder Umrechnungen vorgenommen werden. Außerdem mussten vor allem bei der Klärschlammbehandlung verschiedene Energieträger und –formen in Bezug zueinander gesetzt und verglichen werden. Dazu wurden verschiedene Umrechnungs- und Äquivalenzfaktoren benutzt, die nachfolgend definiert werden. Sofern im weiteren Text nicht explizit anderes erwähnt wird, wurden diese Kennwerte und Faktoren durchgängig gemäß der unten angegebenen Definition benutzt.

Bei der Einteilung der Kläranlagen werden häufig Größenklassen (GK) verwendet. Sofern nicht anders erwähnt, beziehen sich diese Größenklassen im Bericht auf die Einteilung laut Abwasserverordnung, die folgende Größenklassen unterscheidet:

GK 1:	≤ 1.000 EW
GK 2:	> 1.000 – 5.000 EW
GK 3:	> 5.000 – 10.000 EW
GK 4:	> 10.000 – 100.000 EW
GK 5:	> 100.000 EW

In diesem Fall beziehen sich die EW-Zahlen auf die **Ausbaugröße**. Da die Vorschläge dieser Studie auf eine Regelung innerhalb der Abwasserverordnung abzielen, wurden diese Größenklassen trotz methodischer Bedenken übernommen.

### **Energiekennwerte**

Bei den Energiekennwerten ist die Schmutzfracht (ausgedrückt als angeschlossene Einwohnerwerte, EW) eine entscheidende Größe. Ihre genaue Bestimmung ist problematisch, da die Rohdaten oft nicht repräsentativ oder unzuverlässig sind (CSB/BSB-Konzentrationen) und die Berechnungen je nach gewähltem Parameter (Q, CSB, BSB, Nges, Schlammanfall, Konzentration im Zulauf KA oder Ablauf Vorklärung) widersprüchliche Ergebnisse bringen. Dennoch wird auf diese Größe zurückgegriffen, weil sie ein zentraler Parameter im Kläranlagenbetrieb ist. Für die weitere Berechnung werden dabei nicht Auslegungswerte (oder Spitzenlasten) sondern Jahresmittelwerte zugrunde gelegt. Es ist auch wichtig klar zu stellen, dass interne Rückbelastungen durch Trübwasser (wie in DWA-Arbeitsblatt A 131 definiert) **nicht** bei der Ermittlung der EW-Zahlen zu berücksichtigen sind.

Es empfiehlt sich bei der Ermittlung der mittleren Schmutzfracht Plausibilitätskontrollen durchzuführen, beispielsweise durch Vergleich der berechneten EW-Zahlen auf Basis verschiedener Parameter mit dem Schlammanfall oder der tatsächlich angeschlossenen Einwohnerzahl und Einwohnergleichwerte aus Industriebetrieben.

Als Definition für Einwohnerwert (EW) wird bei den weiteren Betrachtungen dieser Studie die Festlegung lt. Handbuch „Energie in Kläranlagen“ leicht modifiziert übernommen:

- „Bezugsbasis sind die aktuellen Einwohnerwerte EW, welche aus der effektiven BSB<sub>5</sub>-Frachtbelastung im Jahresmittel im Zulauf der Kläranlage auf der

Grundlage von 60 g BSB<sub>5</sub>/EW.d ermittelt werden. Alternativ kann auf die CSB-Fracht im Zulauf (Basis 120 g CSB/EW.d) zurückgegriffen werden.“

Auf Basis dieser Definition wurde – soweit möglich – der spezifische Energieverbrauch immer auf die so ermittelten Einwohnerwerte bezogen. Als wichtigster Parameter hat sich in der Literatur dabei der **Jahresenergieverbrauch pro EW in kWh/(EW.a)** durchgesetzt und wird auch hier bevorzugt verwendet. Soweit nicht anders erwähnt, wird die Einheit kWh in der Regel auf Strom bezogen. Dieser Jahresenergieverbrauch setzt sich aus dem externen Strombezug **und** der Eigenerzeugung zusammen.

### Umrechnungsfaktoren

Für die Umrechnung der häufig in der Literatur für den spezifischen Stromverbrauch verwandten Angabe kWh/m<sup>3</sup> Abwasser in kWh/(EW.a) wird ein mittlerer Abwasseranfall von 250 l/EW.d bzw. 91 m<sup>3</sup>/EW.a angesetzt. Damit gilt: 1 kWh/m<sup>3</sup> entspricht 91 kWh/(EW.a).

Werden die Einwohnerwerte nicht auf Basis der organischen Schmutzfracht (BSB/CSB) ermittelt, gelten folgende Umrechnungsfaktoren:

- 1 EW entspricht 11 g N<sub>ges</sub>/d oder 8 g NH<sub>4</sub>-N/d oder 1,8 g P/d

Bei der Klärschlammbehandlung werden gelegentlich auch Energiekennwerte bezogen auf Trockenrückstand (kWh/kg TR) oder Filterkuchen (kWh/kg) angegeben. Außerdem wird die Faulgasausbeute oft auch auf den Trockenrückstand im Klärschlamm oder dessen organischen Anteil bezogen. Zur Umrechnung in EW bzw. zum Vergleich verschiedener Zahlenangaben wurden zur Vereinfachung folgende Umrechnungsfaktoren bzw. spezifische Schlammengen angesetzt:

- 55 g TR/EW.d als spezifischer täglicher Überschussschlammanfall in Anlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung
- 75 g TR/EW.d als spezifischer täglicher Rohschlammanfall in Anlagen mit Vorklärung und Schlammfäulung, davon
  - 35 g TR/EW.d Primärschlamm mit 67 % oTR und

- 40 g TR/EW.d Überschussschlamm mit 70 % oTR
- 55 g TR/EW.d als spezifischer täglicher Faulschlammanfall mit 50 % oTR

### CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Zum Vergleich verschiedener Energieträger und –formen sowie vermiedener Emissionen von Schadstoffen im Hinblick auf die Klimaschädlichkeit wird üblicherweise die Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalent genutzt. Zur Umrechnung des Stromverbrauches in CO<sub>2</sub>-Äquivalente wurde der mittlere Strommix in Deutschland zugrunde gelegt.

Im Rahmen der Studie wurden bei den vergleichenden Betrachtungen zur Klärschlammbehandlung auch die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energieinputs durch Substitution von mineralisch-synthetischen Düngemitteln (bei Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser oder Klärschlamm) angesetzt. Dabei liegen folgende Umrechnungsfaktoren zugrunde:

<u>Äquivalenzfaktoren</u>	N	P	Vergleichswert: Stromerzeugung
	pro kg; Bezug: Element		pro kWh
Fossile Brennstoffe [MJ]	41,60	16,15	
Elektrizität [kWh]	0,22	1,07	1
CO <sub>2</sub> -Äquivalente [kg]	2,78	1,69	0,682

aus:

*EPEA Internationale Umweltforschung GmbH „Boden-, Ressourcen- und Klimaschutz durch Kompostierung in Deutschland“, Hamburg 2004*

## 2.4. Beschreibung der Systemgrenzen für die Betrachtung

Bei der Festlegung von spezifischen Verbräuchen und der Bewertung der Energieeffizienz ist die Festlegung von Systemgrenzen wichtig. Folgende Grenzen sollen der Betrachtung zugrunde gelegt werden:

**Betrachtet bzw. berücksichtigt werden in der Energiebilanz von Kläranlagen:**

- Alle Reinigungsstufen und die Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage
- Zulaufpumpwerke und in die Kläranlage integrierte RÜBs und Regenwasser-/Hochwasserpumpwerke
- Energiegutschriften aus interner oder externer Faulgasverwertung

Nur im Rahmen von vergleichenden Betrachtungen zur Klärschlammverwertung werden außerdem folgende Bereiche betrachtet:

- Transport von Klärschlamm bis zur endgültigen Entsorgung/Verwertung
- Energiegutschriften (Strom, Wärme) aus externer thermischer Klärschlammverwertung/-entsorgung
- Gutschriften aufgrund der Rückgewinnung von Phosphor und Stickstoff. Die Nährstoffrückgewinnung wird allerdings nur bei zusätzlichen Verfahrensschritten (wie z. B. bei der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm(-Asche) oder MAP-Fällung aus Trübwasser) berücksichtigt. Aufgrund übergeordneter Überlegungen zum Bodenschutz wurde die Betrachtung des Nährstoffrecyclings durch direkte landwirtschaftliche Klärschlammverwertung vom Auftraggeber im Rahmen dieser Studie nicht mehr gewünscht (zu Details s. Kap. 4)

**Nicht berücksichtigt bzw. betrachtet werden:**

- Pumpwerke und RÜBs im Kanalnetz
- Wahl des Abwassersammelsystems (Misch-/Trennsystem, Eco-Sanitation, Vakuumentw.)
- Alternativen bei der externen Vorbehandlung der Abwässer, z.B. Einsatz der Anaerobtechnik bei der industriellen Abwasservorbehandlung
- Energieverbrauch bei der Herstellung der Kläranlagen (Bauwerke, Maschinen- und EMSR-Technik)
- Emission von CO<sub>2</sub>, Methan, Stickoxiden und sonstigen Klimaschutzgasen aus der Abwasserbehandlung
- Energieverbrauch für Herstellung und Transport von Chemikalien zum Einsatz in der Abwasserbehandlung

**Sonderfälle:**

Die **Abwärmenutzung aus dem Abwasser** (Wärmepumpen auf der Kläranlage, Abwärmenutzung direkt aus dem Kanalnetz) wird als interessanter Ansatzpunkt zur Einsparung fossiler Energieträger gesehen. Potenzialstudien für die Schweiz und Deutschland weisen ein großes kurz- bis mittelfristiges Potenzial nach, allerdings an der Grenze der Wirtschaftlichkeit. Die Einsatzmöglichkeiten der Abwärmenutzung aus dem Abwasser ergeben sich eher aus der Wärme-Nachfrage von Grundstückseignern für die Beheizung von Wohneinheiten oder öffentlichen Einrichtungen und liegen daher nicht primär im Aufgabenbereich der Abwasseranlagenbetreiber. Sie können aber für innovative Kommunen und Stadtwerke auch unter Image-Aspekten ein interessantes Aufgabenfeld sein. Im vorliegenden Projekt wird nur auf diese Möglichkeiten hingewiesen.

Ähnliches gilt für die **Nutzung sonstiger regenerativer Energien** (z.B. Solarzellen, Windkraftanlagen, Wasserkraftnutzung). Sie werden im Rahmen der Festlegung des Standes der Technik nach WHG § 7 a nicht berücksichtigt, da sie nicht integraler Bestandteil der Verfahren zur Abwasserbehandlung und nicht originäre Aufgabe der Kläranlagenbetreiber sind (s. dazu auch Abschnitt 3.2.4).

Dies gilt zwar im Grundsatz auch für die **Kofermentation** von externen Substraten in Faultürmen. Allerdings werden in diesem Fall Kapazitätsreserven der vorhandenen Anlagen zur Abwasserbehandlung genutzt und es ist eine intensive Wechselwirkung mit den übrigen Verfahrensschritten auf der Kläranlage gegeben. Die Kofermentation in vorhandenen Faultürmen wird daher als mögliche Option betrachtet, zumal teilweise sogar (industrielle) Abwasserkonzentrate aus dem Einzugsbereich der Kläranlage als Substrate in Frage kommen (z. B. Fettabscheider-Rückstände), die zu einer zusätzlichen Entlastung der Kläranlage führen können.

Bei der Zufuhr externer Substrate zur Kofermentation wird zumindest bei kleineren Mengen akzeptiert, dass die Systemgrenzen überschritten werden. In der Praxis kann diese Systemgrenze oft nicht klar definiert werden.

## 3. Energieeffizienz im Bestand

### 3.1. Allgemeiner Überblick

Angesichts einer Vielfalt an Größenklassen, Reinigungsverfahren und eingesetzten Technologien auf Kläranlagen stellt sich zunächst die Frage, wie ein einheitlicher Stand der Technik bzgl. Energieeffizienz zu definieren wäre, ohne den sprichwörtlichen Vergleich von Äpfeln und Birnen zu riskieren.

Wesentlich ist für uns dabei zum einen, ob die betrachteten unterschiedlichen Verfahren im Hinblick auf den Energieverbrauch signifikante Unterschiede aufweisen oder zu einer Gruppe zusammengefasst werden können. Zum anderen muss eine Auswahl der Verfahren aufgrund der Häufigkeit ihres Einsatzes getroffen werden, um eine zu starke Differenzierung bei den Kennwerten zu vermeiden. „Exoten“ unter den Anlagen oder Verfahren müssen über Einzelfallbetrachtungen beurteilt werden und sind nicht Gegenstand einer allgemeingültigen Betrachtung.

In einem ersten Schritt wurden dazu aufgrund von statistischen Daten zur Häufigkeitsverteilung die Relevanz der Größenklassen von Kläranlagen und der angewandten Grundverfahren (z.B. Belebungsverfahren, Tropfkörper, Schlammfäulung etc.) betrachtet.

In einem zweiten Schritt wurden dann jeweils die wichtigsten Behandlungsschritte auf ihren spezifischen Energieverbrauch überprüft. Für alle Verfahren wurden die vorliegenden Studien, Umfragen und Feinanalysen ausgewertet und die Mediane der Stromverbräuche für die wichtigsten Anlagenteile und Größenklassen zusammengestellt. Die Art der Klärschlammbehandlung und -verwertung wurde dabei separat betrachtet, da diese unabhängig von der Art der biologischen Stufe eine starke Differenzierung erfahren hat und stark energierelevant ist. Schließlich wird für Anlagen mit Schlammfäulung Art und Umfang der Faulgasverwertung betrachtet.

Im Kapitel 3.3 wird der gesamte Stromverbrauch und die Energieerzeugung der Kläranlagen in Deutschland bilanziert. Diese Bilanz dient dann als Grundlage für die Beurteilung der Relevanz hinsichtlich der Energieeffizienz im Bestand (Kapitel 3.4) sowie für die Szenarien zur weiteren Entwicklung in Kap. 4.

## 3.2. Energieeinsatz nach Verfahren und Anlagengröße

### 3.2.1 Abwasserbehandlung nach Größenklassen

- Bei Kläranlagen von GK 1 bis 2 (50 bis 5.000 EW) ist die Streubreite des Energieverbrauchs unabhängig vom Verfahren sehr hoch. Auch die Mediane des Stromverbrauchs liegen bei allen Umfragen deutlich über denen der GK 3 bis 5 (s. Beispiel in Abb. 3.2.1 und Zusammenstellung verschiedener Umfrageergebnisse im Anhang). Dies liegt aber nur zu einem geringen Anteil an den eingesetzten Aggregaten oder Verfahren (z.B. schlechterer Wirkungsgrad kleiner Motoren und Pumpen, ungünstige Regelung, aerobe Stabilisierung), sondern vor allem am stärkeren Einfluss von Sonderaggregaten (s. Tab. 3.2.1).

Tab. 3.2.1: Einfluss von Sonderaggregaten auf Stromverbrauch in GK 1 - 5

	<b>GK1/2</b>	<b>GK 3/4</b>	<b>GK5</b>
	<b>10<sup>3</sup> EW</b>	<b>10<sup>4</sup> EW</b>	<b>10<sup>5</sup> EW</b>
<b>Ein Mehr- oder Minderverbrauch von 1 kWh/EW*a entspricht einer</b>			
konstanten Leistung von (in kW):	0,11	1,14	11,42
periodischen Leistung bei 6 Stunden pro Tag von (in kW):	0,46	4,57	45,66
<b>Aggregate mit konstanter Leistungsaufnahme</b>			
Erhöhung des spezifischen Stromverbrauchs durch 2 kW elektrische Heizung im Winterhalbjahr (in kWh/EW*a):	8,76	0,88	0,09
Erhöhung des Stromverbrauchs bei 5 x 300 W elektrische Strahler (in kWh/EW*a):	6,57	0,66	0,07

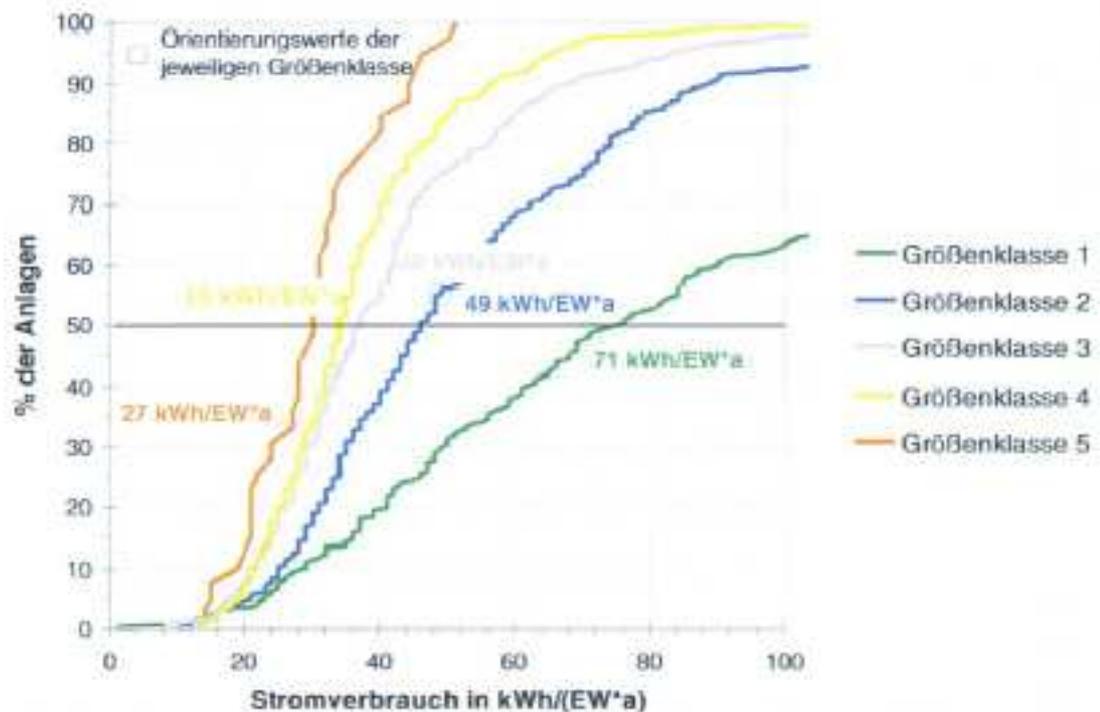


Abb. 3.2.1: Streubreite des Stromverbrauchs nach Größenklassen (DWA Leistungsvergleich Baden Württemberg 2005)

- Andererseits gibt es auch in GK 1 und 2 Anlagen, deren Energieverbrauch deutlich unterhalb des Medianwertes großer Anlagen liegt. Bei der Betrachtung des Optimums der Energieeffizienz von Kläranlagen und Anlagenteilen (Zielwert) kann daher in erster Näherung die GK vernachlässigt werden, da deren Einfluss unter 10 % beträgt. Allerdings müssen bei kleinen Kläranlagen größere Toleranzen im Bestand zugelassen werden.
- Kläranlagen der GK 4 und 5 umfassen zwar nur 22 % der bundesweit 10.200 Kläranlagen, verursachen aber 87 % des gesamten Energieverbrauchs von rund 4.400 GWh/a und sind daher besonders wichtig für die weitere Betrachtung (s. Abb. 3.2.2 + 3.2.3).

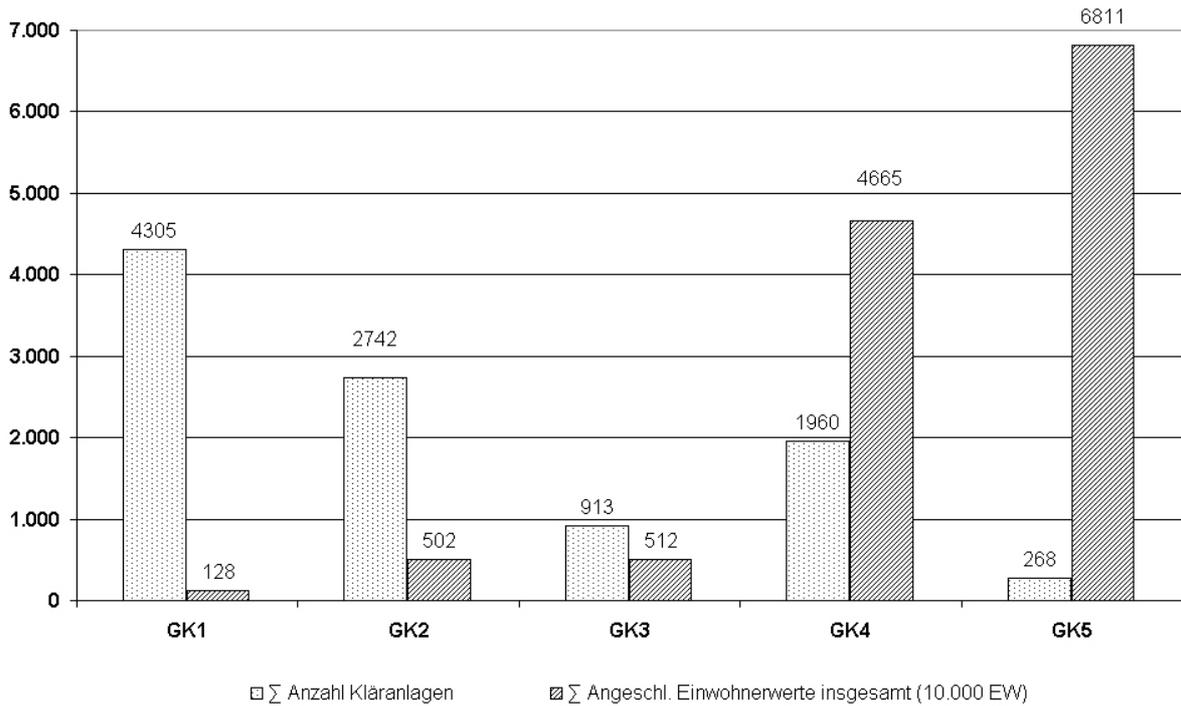


Abb. 3.2.2: Anzahl der Kläranlagen und angeschlossene Einwohnerwerte

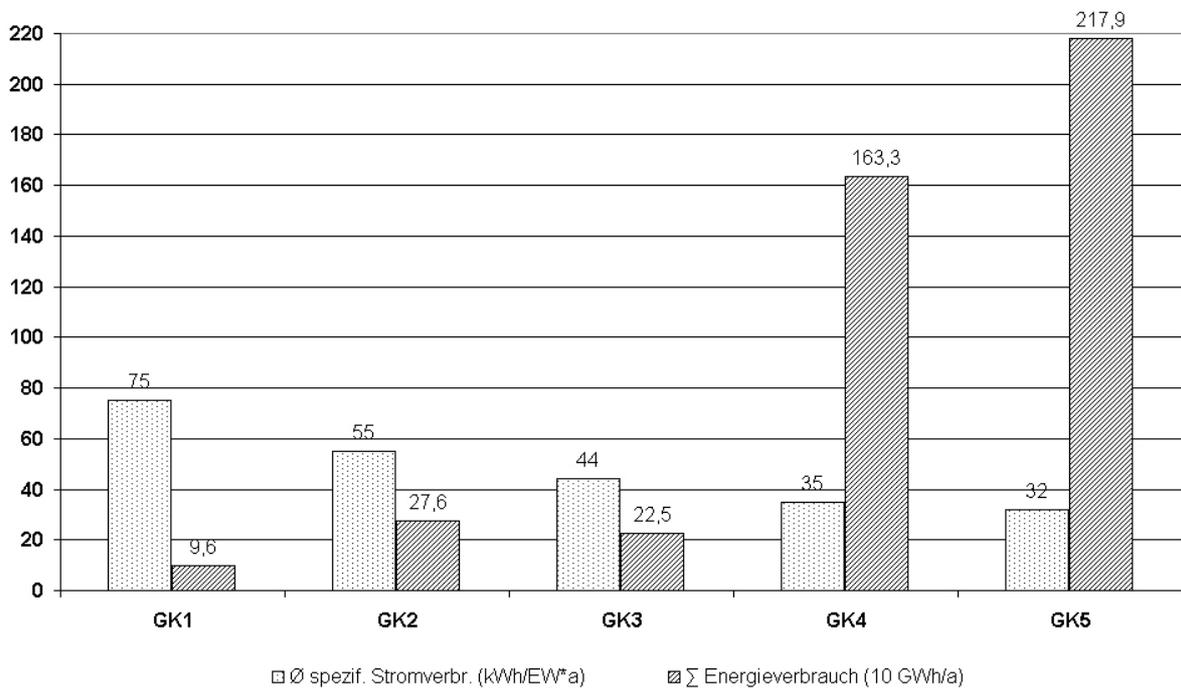


Abb. 3.2.3: Spezifische und absolute Stromverbräuche

- Die Kläranlagen mit einer Ausbaugröße über 5.000 EW (Größenklasse 3 bis 5) haben eine wesentlich geringere Streubreite beim Energieverbrauch und können im Prinzip bzgl. der Abwasserbehandlung gleich behandelt werden.

Lediglich im Hinblick auf die Schlammstabilisierung und Eigenstromerzeugung ist in GK 3 und 4 zwischen Faulungsanlagen und aerober Stabilisierung zu unterscheiden. Außerdem ergibt sich bei diesen beiden Anlagentypen eine etwas andere Verteilung des Stromverbrauches auf die Hauptverbraucher.

- Ein wesentlicher Einflussfaktor für den Stromverbrauch ist auch die einwohnerspezifische Abwassermenge, die sich aus dem spezifischen Trinkwasserverbrauch und vor allem dem Anteil an Regen- und Fremdwasser ergibt. Dabei gibt es zwar eine deutliche Abnahme der spezifischen Mengen mit steigender Anlagengröße, aber auch sehr große Streubreiten innerhalb der Größenklassen. Letzteres ist vor allem durch den Fremdwasseranteil bedingt, der je nach lokalen Verhältnissen ein Mehrfaches der Trinkwassermenge betragen kann.
- Die Aufteilung der Kläranlagen nach Größenklassen ist demnach zwar sinnvoll, auch im Hinblick auf die Vorgaben zur Novellierung der Abwasserverordnung; sie ist aber als alleiniges Kriterium nicht ausreichend.

### **3.2.2 Abwasserbehandlung nach angewandten Verfahren**

- Die theoretischen Unterschiede der Kennwerte im Energieverbrauch für einzelne Reinigungsverfahren (z.B. Berechnung nach Modellkläranlagen lt. Handbuch NRW) lassen sich in der Praxis nicht eindeutig wieder finden, da sie überlagert werden von gegenläufigen Tendenzen: So ist z.B. die theoretisch bestehende Stromeinsparung bei der Belüftung von Belebungsanlagen mit Faulung i. V. zur simultanen aeroben Stabilisierung in der Praxis nicht unbedingt erkennbar, weil der Unterschied durch zusätzliche Stromverbräuche an anderer Stelle überkompensiert wird (höhere Kreislaufführung, Umwälzung Faulturm, Rückbelastung, etc., s. Abb. 3.2.4). Lediglich die mögliche Eigenstromerzeugung bei der Faulung führt zu signifikanten Unterschieden in der Energieeffizienz.

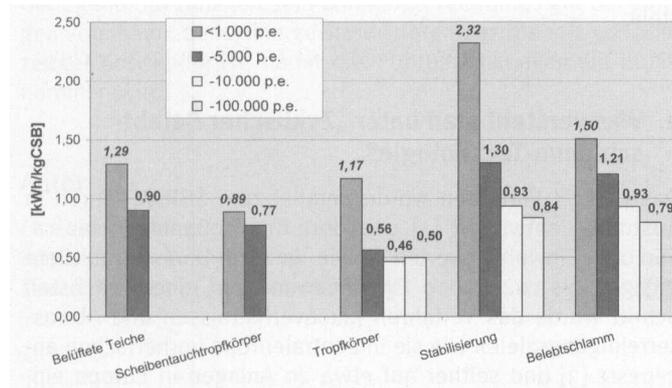


Abb. 3.2.4: Spezifischer Stromverbrauch nach Anlagengröße und Verfahren (Demoulin, 2003, nach Daten von Roth, 1998)

- Vor allem bei sehr großen Anlagen tragen zusätzliche Reinigungsstufen (z. B. Sandfiltration) und die weitergehende Klärschlammbehandlung (Trocknung, Verbrennung) zu einem erhöhten Stromverbrauch bei und müssen im Einzelfall berücksichtigt werden.
- Auffallend sind die wesentlich günstigeren Kennwerte für den Energieverbrauch von Tropfkörpern in allen Größenklassen. Dies gilt theoretisch noch mehr für Tauchkörper, was sich aber in den Umfragen nur bedingt widerspiegelt. Sie sollten daher als getrennte Kategorien und bei Neu- und Umbauten als mögliche Alternative zum Belebungsverfahren berücksichtigt werden.
- Abwasserteiche und Kombinationen von Teichen mit (Tauch-)Tropfkörpern sind zwar zahlenmäßig häufig vertreten (> 10 % der Anlagen), insbesondere in den eher ländlich strukturierten Bundesländern. Sie beschränken sich aber fast ausschließlich auf GK 1 und 2 und betreffen damit nur ca. 0,5 % aller angeschlossenen Einwohnerwerte. Sie werden deshalb nicht gesondert betrachtet.
- Eine Differenzierung nach den üblichen Reinigungszielen (Kohlenstoffabbau, Nitrifikation, Denitrifikation, P-Elimination) ist nicht hilfreich, da ohnehin eine Nivellierung der Ablaufwerte unabhängig von Verfahren und Größenklassen festzustellen ist (kleinere Anlagen denitrifizieren häufig auch ohne explizite Denitrifikationsstufe durch betriebliche Maßnahmen). Der Einfluss des Reinigungsziels auf den Energieverbrauch ist i. d. R. nicht signifikant. Dies gilt nicht

für weitergehende Anforderungen an den Ablauf wie z.B. Hygienisierung, Filtration etc.

- Bei fast allen Kläranlagen mit Belebungsverfahren sowie bei Teichen ist die **Belüftung** mit großem Abstand der wichtigste Stromverbraucher (s. Abb. 3.2.5 und 3.2.6). Bei Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung liegt der Anteil bei ca. 60 bis 80 % des Gesamtverbrauchs, bei Anlagen mit Schlammfäulung bei ca. 50 %. Die Streubreite ist sehr hoch und die Einflussmöglichkeiten durch kurzfristige Maßnahmen sind in der Regel ebenfalls groß. Daher bildet die Belüftung den größten Schwerpunkt der Energieoptimierung.

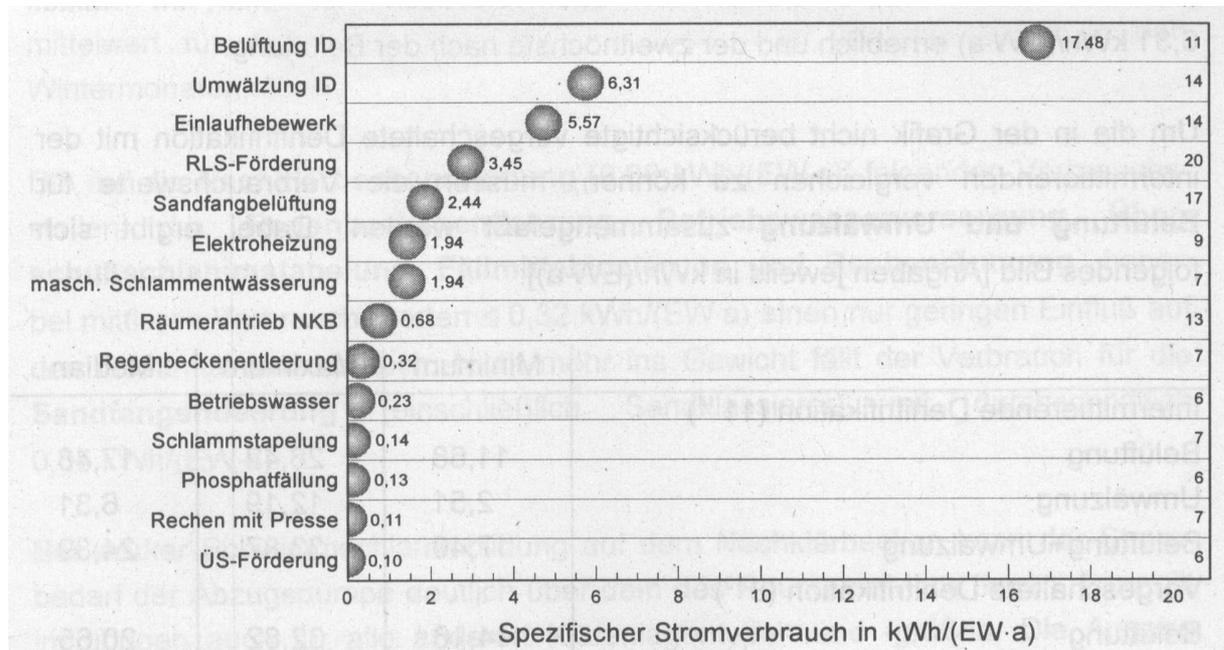


Abb. 3.2.5: Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK 2 und 3 (LFU, Roth 1998)

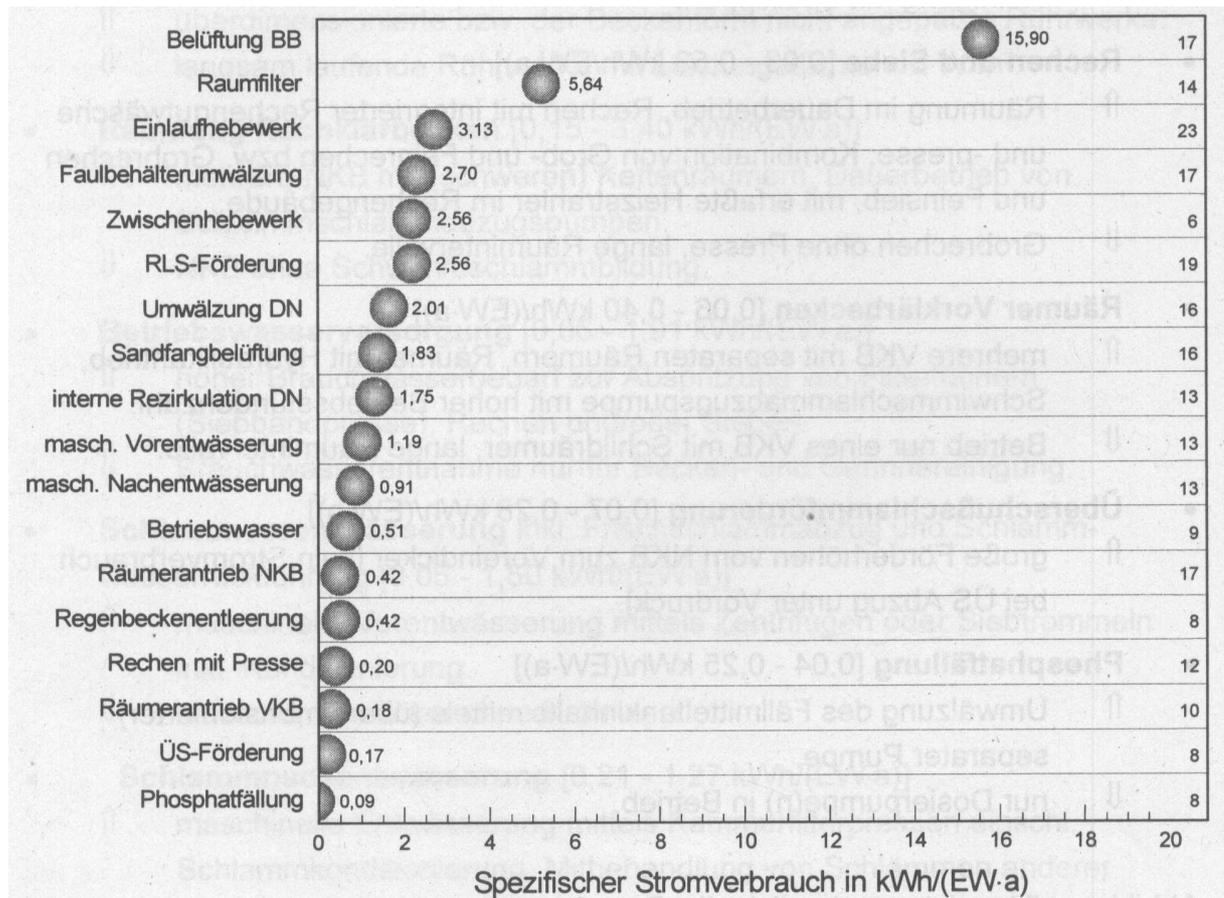


Abb. 3.2.6: Mittlerer Stromverbrauch von Anlagenteilen in GK 4 und 5(LFU, Roth 1998)

- Als **Belüftungssystem** hat sich zwar die feinblasige Belüftung ganz überwiegend als energieeffizienteres Verfahren gegenüber Oberflächenbelüftern durchgesetzt; es gibt aber vor allem bei kleineren Anlagen auch Walzenbelüfter bzw. Kreisel neuerer Generation, die in Verbindung mit simultaner Denitrifikation sehr gute Energiekennwerte erreichen. Daher wird bei der Bewertung der Belüftung mit Kennwerten nicht nach angewandtem System differenziert.
- Die kontinuierlich laufenden **Pumpwerke** (Zulauf, Zwischenhebewerke, Rücklaufschlamm, interne Kreislaufführung, Faulturmumwälzung) verursachen als Einzelverbraucher zwar meist weniger als 10 % des Gesamtstromverbrauchs. In der Summe können die Pumpwerke jedoch bis zu 50 % des Stromverbrauchs einer Anlage ausmachen und sind daher neben der Belüftung der wichtigste Ansatzpunkt für die Energieeffizienz.
- Dies gilt natürlich besonders für Tropfkörper, wo die Beschickungspumpen anstelle der Belüftung maßgeblich sind für den Stromverbrauch. Bei der gele-

gentlich eingesetzten Kombination von Tropfkörper und Belebungsverfahren können für die Beschickung des Tropfkörpers die Vorgaben zu Pumpwerken angewandt werden. Bei der Belebung muss dann der Stromverbrauch auf die anteilig im Belebungsverfahren behandelte Fracht bezogen werden (nach Abzug des Frachtabbaus im Tropfkörper). Angesichts der geringen Zahl der Kombinationsanlagen wird auf eine separate Regelung verzichtet.

- Regenwasser- und Hochwasserentlastungspumpen verursachen oft sehr hohe Stromspitzen und können dann für die Stromkosten (beim Leistungspreis) relevant sein. Aufgrund der sehr geringen Laufzeiten (meist unter 100 h/a) sind sie dagegen beim Stromverbrauch in aller Regel fast bedeutungslos (<< 5 %).
- Bei Pumpen ist vor allem die Auswahl energetisch optimaler Pumpen- und Laufradtypen und die Regelung der Kreislaufführung entscheidend für den Energieverbrauch. Hier gibt es aber immer wieder Interessenskonflikte zwischen Verstopfungssicherheit und Energieeffizienz (s. dazu Kap. 5).
- Drittgrößte Verbrauchergruppe sind in der Regel die kontinuierlich laufenden Rührwerke (z.B. für Denitrifikation, Faulturm etc.), allerdings meist mit großem Abstand zur Belüftung.
- Bei energetisch optimierten Anlagen verursachen die drei Hauptkomponenten Belüftung, Rührwerke und Pumpen über 80 % des Stromverbrauches. Hinzu kommen als weitere wichtige Verbraucher
  - Sandfangbelüftung,
  - Klärschlammwässerung,
  - Sandfilter,
  - Betriebswasserpumpen (auch Sprüheinrichtungen auf Absetzbecken),
  - bei kleineren Anlagen auch Elektroheizungen.
- In 2001 waren bundesweit nur 335 Kläranlagen (3 % aller Anlagen) mit einer Ablauffiltration und hierbei ganz überwiegend mit **Sandfiltern** ausgestattet. Daran waren aber 21,5 Mio. EW angeschlossen (17 % aller EW), davon 78 % in GK 5 und 20 % in GK 4. Bei Anlagen mit Sandfiltern kann von einem Mehr-

verbrauch von 25 % (2 bis 12, im Mittel ca. 5 kWh/(EW.a)) ausgegangen werden. In diesen Größenklassen hat der Einsatz der Sandfiltration als tertiäre Reinigungsstufe also großen Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Sandfiltration wird vor allem in sehr großen Kläranlagen (über 500.000 EW) und deutlich überproportional in NRW (ca. 150 von bundesweit ca. 220 Anlagen der GK 4 und 5) eingesetzt.

- Sonstige Aggregate und Sonderverbraucher wie z.B. Abluftbehandlung, verursachen in der Regel jeweils weniger als 2 % des gesamten Stromverbrauches, können aber nichtsdestotrotz gelegentlich maßgeblich sein für hohe Stromverbräuche.
- Die chemische **P-Elimination** aus dem Abwasser über Simultanfällung wirkt sich nicht signifikant auf den Energieverbrauch aus ( $\ll 1$  kWh/(EW.a)). Bei der biologischen P-Elimination fallen vor allem die Rührwerke der unbelüfteten Anlagenteile ins Gewicht, wobei eine eindeutige Aufteilung zwischen reiner Denitrifikation und biologischer P-Elimination nicht möglich ist. Alle Anlagen haben eine mehr oder weniger starke Phosphataufnahme in den Überschussschlamm, so dass bei Kennwerten diese Differenzierung entfallen kann und nur der Energieverbrauch der Rührwerke insgesamt betrachtet wird. Dagegen wird künftig die Art der P-Rückgewinnung (aus dem Klärschlamm) möglicherweise den Energiebedarf stärker beeinflussen.

### 3.2.3 Klärschlammbehandlung

Bei der Klärschlammbehandlung erscheint auf den ersten Blick eine standardisierte Betrachtung schwierig angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und Aggregatetypen zur Klärschlammmentwässerung, Trocknung, Hygienisierung und Entsorgung. Die nachfolgend genannten Zahlen zur Häufigkeitsverteilung beruhen - soweit nicht anders erwähnt - auf der bundesweiten DWA-Klärschlammhebung von 2005 und werden differenziert nach Häufigkeit der Anlagen und/oder nach Anteilen an der gesamten Schmutzfracht in EW (Daten aus 2003). Dagegen erfolgt hier in der Regel keine Differenzierung nach Größenklassen.

Die aktuellen Daten zur „Klärschlamm-trocknung und –verbrennung“ sind im gleichnamigen UBA-Bericht von 2004 detailliert dargestellt und hier kurz zusammengefasst.

Mit dieser Betrachtung der Häufigkeitsverteilung ist eine gute Gewichtung nach weit verbreiteten und eher seltenen Verfahren möglich, die dann im Abschnitt 3.4 eine Auswahl relevanter Bereiche ermöglicht.

- Bei der **Klärschlamm-twasserung** muss zunächst unterschieden werden zwischen Vor- und Nachentwässerung. Die Vorentwässerung beinhaltet in der Regel
  - eine statische Voreindickung des Primär- und Überschussschlammes (gemeinsam im VKB oder getrennt für ÜS; irrelevant für den Stromverbrauch)
  - eine maschinelle Voreindickung des Überschussschlammes über Zentrifugen (17 % der EW), Siebtrommeln (15 %), Bandeindicker (9 %) oder Flotation (5%).
  - Für 8 % der EW sind statische und maschinelle Voreindickung kombiniert, für 12 % wird keine Voreindickung betrieben.

Zur Nachentwässerung werden in der Regel Kammerfilterpressen (33 % der EW) und vor allem bei größeren Anlagen Zentrifugen (18 % der Anlagen, aber 47 % der EW) eingesetzt. Bandfilterpressen bilden eher die Ausnahme. Bei über der Hälfte der Anlagen wird der Klärschlamm entweder nur eingedickt und als Nassschlamm landwirtschaftlich verwertet oder die Klärschlamm-twasserung wird von externen Entsorgern mit mobilen Aggregaten durchgeführt. Da es sich hier vor allem um kleinere Anlagen (GK 1 bis 3) handelt, betrifft dies jedoch nur 14 % der EW. Der Stromverbrauch der maschinellen Klärschlamm-twasserung hat nur eine relativ geringe Streubreite und liegt im Bereich von 1 bis 5 % des Gesamtverbrauchs.

- Die **Klärschlamm-stabilisierung** wird zu 3 Vierteln über Faultürme erreicht, die ganz überwiegend als einstufige, mesophile, alkalische Faulung betrieben werden. Für 16 % der EW wird die Faulung zweistufig betrieben. 12 % des

Klärschlamm wird simultan aerob stabilisiert. In den übrigen Fällen (13 %) wird der Schlamm entweder als Rohschlamm verbrannt (z. B. KA Frankfurt, Stuttgart), an andere Anlagen abgegeben oder anderweitig stabilisiert. Im Hinblick auf zusätzliche Kapazitäten für die Kofermentation ist die Tatsache interessant, dass Faultürme in der Regel nicht ausgelastet sind. Gemessen an der Dimensionierung mit 20 Tagen Aufenthaltszeit für den Schlamm, gibt es nach einer Umfrage auf allen hessischen Kläranlagen mit Faulung eine Reservekapazität von durchschnittlich 100 %.

- Die **Klärschlammhygienisierung** mit Kalk wird noch auf rund 10 % der Anlagen (13,6 % der EW) durchgeführt, wobei der Kalk oft auch zur Konditionierung vor der Entwässerung zugegeben wird. Die Pasteurisierung wird nur noch auf 6 Anlagen praktiziert (0,4 % EW) und hat damit keine Bedeutung mehr. Im Hinblick auf den Energieverbrauch ist damit die Hygienisierung irrelevant, zumal die landwirtschaftliche Verwertung künftig zumindest in einzelnen Bundesländern (z.B. Bayern, Baden-Württemberg, NRW) stark abnehmen wird.
- Auf etwa 80 kommunalen Kläranlagen sind **Klärschlamm-trocknungsanlagen** installiert, entsprechend ca. 0,8 % aller Kläranlagen. Die Trocknungsanlagen weisen eine Gesamtkapazität von ca. 340.000 t TR/a auf, entsprechend ca. 17 % der Einwohnerwerte (Stand 08/2004). Damit könnten theoretisch ca. 17 % des in Deutschland anfallenden Klärschlammes (Schätzung DWA. 2 Mio. t TR/a) getrocknet werden. Die Klärschlamm-trocknung wird daher bei den betroffenen Kläranlagen als additiver Verfahrensschritt wie die Sandfiltration berücksichtigt.

Die solaren Trocknungsanlagen stellen mit ca. 20 Anlagen in den GK 2-4 etwa 1,5 % der vorhandenen Trocknungskapazität. Die Niedertemperatur-trocknung (Kaltluft-trocknung / Umluft-trocknung) erfolgt in ca. 10 Anlagen der GK 3-5, mit einem Anteil an der gesamten Trocknungskapazität von ca. 2 %. Der Einsatz dieser Verfahren weist steigende Tendenz auf.

- Die **Klärschlammverbrennung** mit Stromerzeugung und (teilweise) energetischer Nutzung der Abwärme betrifft 37 % der gesamten Klärschlammmenge (in 2006 bereits auf über 40 % angestiegen) und wird betrieben in
  - Monoklärschlammverbrennungsanlagen auf kommunalen Kläranlagen (17 Anlagen, mit Ausnahme einer Anlage alle GK 5, Gesamtkapazität ca. 484.000 t TR/a, geschätzte Auslastung 70 %),
  - industriellen Klärschlammverbrennungsanlagen (k. A. zu Mengen an mit verbranntem kommunalem Klärschlamm, wegen der hohen Kosten allerdings eher geringer Anteil),
  - Stein- und Braunkohlekraftwerken (genehmigte Kapazität Stand 08/04: 667.000 t TR/a, eingesetzte Menge ca. 280.000 t TR/a),
  - Zementwerken (derzeit nur Probetrieb, Genehmigungsverfahren laufen),
  - Müllverbrennungsanlagen; spielt aus Kapazitätsgründen (ca. 49.000 t TR/a) und aus ökonomischen Gründen nur eine untergeordnete Rolle.
  
- Bei einem energetischen Vergleich verschiedener Entsorgungspfade spielt der Klärschlammtransport eine wichtige Rolle. Grundsätzlich gibt es keine verlässlichen Angaben über die durchschnittliche Transportentfernung für Klärschlamm, zumal diese bei Einschaltung externer Dienstleister häufig wechselt. Damit sind Angaben über den derzeitigen Energieverbrauch für die Klärschlammentsorgung nur schwer möglich.
  
- Die direkte **Klärschlammdeponierung** ist seit dem Auslaufen der Übergangsfrist für die Ablagerung von Abfällen mit erhöhtem organischem Anteil im Juni 2005 nicht mehr relevant. Dies gilt aufgrund der sehr geringen Mengen auch für die Mitbehandlung von Klärschlamm in mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen mit anschließender Deponierung.
  
- Eine untergeordnete Rolle spielen **Sonderverfahren** (z.B. die Niederdruck-Nassoxidation - Loprox-Verfahren -, das Choren-Verfahren zur Erzeugung von Green Diesel und die Niedertemperaturkonvertierung - Thermokatalyse -). Sie sind bisher noch nicht über das Stadium von Pilotanlagen hinausgekommen. (s. auch Kap. 4, Neue Techniken).

### 3.2.4 Faulgaserzeugung und –verwertung

Die **Faulgaserzeugung** wird vor allem von der Betriebsweise der Kläranlage beeinflusst, insbesondere von der Aufenthaltszeit in der Vorklä rung und dem gewählten Schlammalter (Mineralisierungsgrad des belebten Schlammes). Auf der anderen Seite spielen die Betriebsbedingungen im Faulturm ebenfalls eine große Rolle. Hier sind vor allem die konstante (hohe) Temperatur, die gute Durchmischung und eine ausreichend hohe Aufenthaltszeit (> 20 d) maßgeblich. Das Optimierungspotenzial ist vor allem bei kleineren Anlagen hoch.

Durch Zufuhr von externem Substrat zur **Kofermentation** kann die Faulgaserzeugung erheblich gesteigert werden. Die Kapazität der Faultürme ist in aller Regel ausreichend, um trotz erhöhter Raumbelastung eine Schlammstabilisierung sicherzustellen. Bei einer Umfrage in Hessen (1996) lag die Aufenthaltszeit im Faulturm im Mittel bei 40 Tagen also bei einer Überkapazität von 100 %. Gleichzeitig ergab sich dabei kein Zusammenhang zwischen EW-spezifischem Faulturmvolume n und Eigenversorgungsgrad, was darauf hinweist, dass das Faulturmvolume n kein begrenzender Faktor für die Faulgaserzeugung ist (s. Abb. 3.2.7).

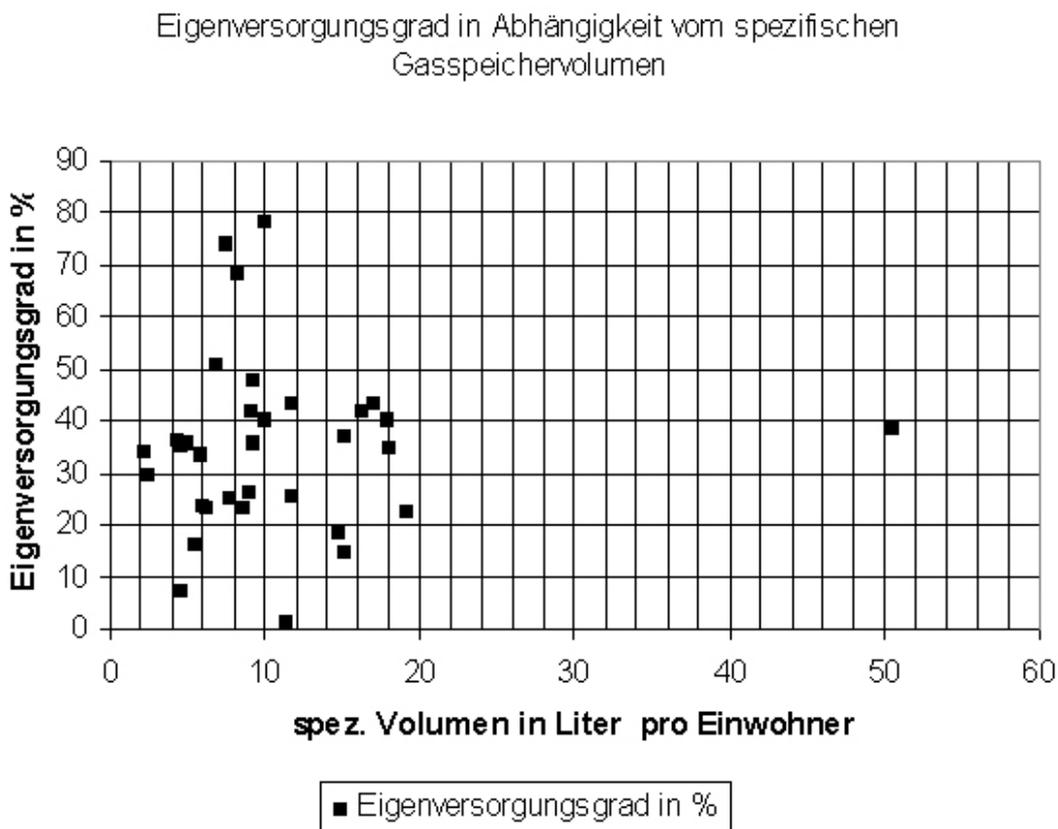


Abb. 3.2.7: Faulturmvolume n und Eigenversorgungsgrad Strom auf KA in Hessen (1996)

Bei entsprechender Verfügbarkeit von geeignetem Substrat kann die Faulgaserzeugung mehr als verdoppelt werden. Begrenzend wirkt in der Regel eher die zusätzliche Rückbelastung der Kläranlage mit dem Prozesswasser der Schlammmentwässerung (insbesondere bei CSB und  $N_{ges}$ ) sowie betriebliche Probleme bei der Annahme und Aufbereitung des Substrates.

Für die Höhe des Eigenversorgungsgrades bei gegebenem Stromverbrauch und Gasanfall sind dann der Anteil des verstromten Faulgases und der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs entscheidend. Bei einer rein thermischen Nutzung des Faulgases (z.B. zur Faulturmbeheizung über Heizkessel) entsteht zumindest im Sommer ein Wärmeüberschuss, so dass Faulgas abgefackelt werden muss. Aufgrund des ganzjährig hohen Wärmebedarfes auf Kläranlagen ist eine Kraft-Wärme-Kopplung in jedem Fall ökologisch sehr sinnvoll und in aller Regel auch wirtschaftlich.

Die verschiedenen Umfrageergebnisse zur Art der Faulgasverwertung (s. unten) zeigen zunächst ein etwas widersprüchliches Bild mit unterschiedlichen Tendenzen in den einzelnen Bundesländern.

Durchgängig sind aber die größeren Anlagen eher mit BHKWs ausgestattet, so dass der prozentuale Anteil der Faulgasverstromung relativ hoch ist im Vergleich zum niedrigen Anteil der Kläranlagen mit BHKW. Im folgenden beziehen sich die Prozentangaben – sofern nicht ausdrücklich anders vermerkt - immer nur auf die Anzahl der Kläranlagen mit Schlammfaulung bzw. die daran angeschlossenen Einwohnerwerte (EW).

Sofern Kläranlagen mit BHKWs ausgestattet sind, kann man zwar davon ausgehen, dass in der Regel ausreichende Kapazitäten installiert sind und das Faulgas ganz überwiegend in diesen Aggregaten verstromt wird. Allerdings wird aufgrund von Ausfällen und Wartungsarbeiten am BHKW oder sonstigen Gründen (z. B. Einsparung von Heizöl/Erdgas durch direkten Einsatz von Faulgas zur Beheizung in Kälteperioden; Überlastung der Notkühlung im Sommer) auch dann häufig ein gewisser Anteil des Faulgases nicht verstromt.

Vor allem bei kleineren Anlagen mit erhöhtem Wärmebedarf im Faulturn (z. B. wg. fehlender Voreindickung des Überschussschlammes und ungünstigem Verhältnis von Faulturn-Oberfläche zu Volumen) ergeben sich durch die Faulgasverwertung mittels BHKW nicht nur zusätzliche Investitionskosten i. V. zu einer rein thermischen Verwertung des Faulgases. Aufgrund des geringeren thermischen Wirkungsgrades von BHKWs steigt der Bedarf an Erdgas oder Heizöl im Winter stark an (teilweise bis zu Verdreifachung der Fremdenergie), die bei heutigen Preisen für fossile Energieträger die Rentabilität von BHKWs in Frage stellen können. Der Eigenversorgungsgrad muss daher insgesamt für Strom und Wärme betrachtet werden. Allerdings kann in der Regel durch entsprechende Konzeption der Schlammbehandlung, vor allem durch eine bessere Rohschlammvoreindickung der Wärmebedarf drastisch reduziert werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse von Umfragen der letzten Jahre zur Faulgaserzeugung und –verwertung zusammengefasst:

- Bei der Umfrage im Auftrag der LfU Baden-Württemberg (Dr. Roth. 1995) an ca. 1.000 Kläranlagen in Ba-Wü, NRW, Bayern, Niedersachsen und der Schweiz hatten nur **33 % der 428 erfassten Kläranlagen (GK 2 - 5)** mit Schlammfaulung eine Eigenstromerzeugung. Dieser Anteil lag jedoch bei größeren Kläranlagen höher, nämlich in GK 4 (10.000 - 100.000 EW) bei 36,8 % und in GK 5 (> 100.000 EW) bei 57,4 % der Anlagen, so dass bezogen auf die angeschlossenen EW von einer **Faulgasverstromung von 50 bis 60 %** ausgegangen werden kann. Hinzu kommt bei 10 der 428 Anlagen (2 %) eine Verwertung über Direktantrieb von Gebläsen mittels Faulgasmotoren.
- Bei der Umfrage in NRW (1998, s. Handbuch „Energie in Kläranlagen“) waren ebenfalls nur ein Drittel der Anlagen (aber **63 % der EW**) mit **BHKW ausgestattet** und nur die  **Hälfte des Faulgases wurde verstromt**, 36 % für Heizzwecke genutzt und 15 % abgefackelt.
- Acht Jahre später (Stand 2003) waren laut einer Umfrage der Universität Stuttgart auf Kläranlagen in Ba-Wü. bereits über 90 % der Anlagen über 50.000 EW mit BHKWs ausgerüstet. Aus dem insgesamt erzeugten Klärgas

mit einem Heizwert von 585 GWh/a wurden aber nur 93,6 GWh/a Strom erzeugt. Bei einem unterstellten mittleren Wirkungsgrad der BHKWs von 30 % würde dies bedeuten, dass nur 53 % des anfallenden Klärgases verstromt wird, also trotz Ausrüstung mit BHKWs das Klärgas nur zur Hälfte verstromt wird. Da der Klärgasanfall mit knapp 17 l/EW.d plausibel erscheint, ist auch denkbar, dass die Stromerzeugung nicht vollständig erfasst wurde. Bei einer Eigenversorgung wird der erzeugte Strom nicht immer über Zähler registriert.

- Laut DWA-Klärschlamm-Erhebung 2003 gaben bundesweit nur **41 % der Kläranlagen** mit Schlammfäulung (entsprechend 58 % der EW) an, eine Faulgasverstromung zu betreiben. Dagegen hatten 33 % der Anlagen (entsprechend 13 % der EW) keine Faulgasverstromung. Allerdings machten ein Viertel der Betreiber keine Angaben zur Faulgasverwertung. Hochgerechnet auf die Gesamtanzahl aller Anlagen mit Schlammfäulung würde dies bedeuten, dass bei **82 % der angeschlossenen EW eine Faulgasverstromung** durchgeführt wird. Das deckt sich etwa mit den unten angegebenen Zahlen des statistischen Bundesamtes und bestätigt den steigenden Anteil von verstromtem Faulgas.
- Aufgrund des Mineralölsteuergesetzes werden die erzeugten und verwerteten Faulgasmengen jährlich vom statistischen Bundesamt erhoben. Der Klärgasanfall stieg nach diesen Angaben in den letzten Jahrzehnten sehr gleichmäßig um ca. 2,4 % pro Jahr auf rund 684 Mio. m<sup>3</sup> Klärgas mit einem Energieinhalt (oberer Heizwert) von 4.860 GWh in 2004 (s. Abb. 3.2.8). Seit Mitte der neunziger Jahre ist damit der Gasanfall etwa um ein Viertel gestiegen. Parallel dazu stieg auch der Anteil zur Verstromung. Die Verluste durch Abfackeln/Abblasen lagen Mitte der 90iger noch bei ca. 15 % und sind bis 2004 auf unter 10 % gesunken.

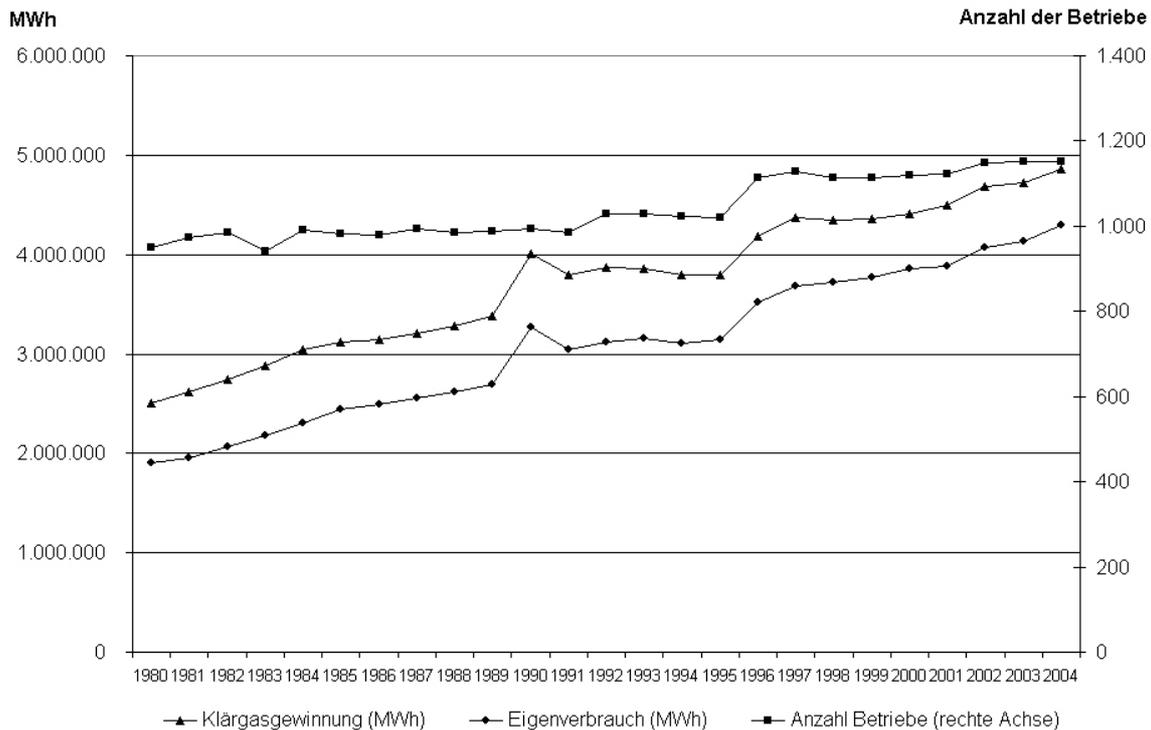


Abb. 3.2.8 Anstieg der Klärgaserzeugung und –nutzung seit 1980 (nach Daten des Stat. Bundesamtes)

Bei rund 95 Mio. angeschlossener EW auf Kläranlagen mit Schlammfäulung ergibt sich aus o. g. Mengen (684 Mio. m<sup>3</sup>/a) ein spezifischer Faulgasanfall von 19,7 l/EW.d, der gut übereinstimmt mit den Ergebnissen aus verschiedenen Umfragen.

- Von den in 2004 erfassten 1.152 Anlagen mit Faulgaserzeugung verfügten 722 (63 %) über ein BHKW. Auf Kläranlagen mit Klärgasverstromung wurden 564 Mio. m<sup>3</sup> Gas erzeugt, entsprechend 82 % der EW von Anlagen mit Fäulung (78 Mio. EW). Auf diesen Kläranlagen wurden aber nur 466 Mio. m<sup>3</sup> tatsächlich verstromt (82 % bezogen auf die Gasmenge der Kläranlagen mit BHKW, bzw. 68 % der gesamten Klärgasmenge). Aus dieser Gasmenge wurden 864 GWh Strom erzeugt. Das entspricht einer spezifischen Stromproduktion von 11,1 kWh/(EW.a) (bezogen auf 78 Mio. EW der Kläranlagen mit BHKW) bzw. einem mittleren Eigenversorgungsgrad von 30 bis 35 %, was sich mit gut mit den Umfrageergebnissen der LfU BaWü /Dr. Roth deckt (Median-Wert 35,6 %). Bei einem unteren Heizwert von 6,1 kWh/m<sup>3</sup> Klärgas ergibt sich ein mittlerer Wirkungsgrad der Stromerzeugung von rund 30 %. Auch dieser Wert erscheint plausibel.

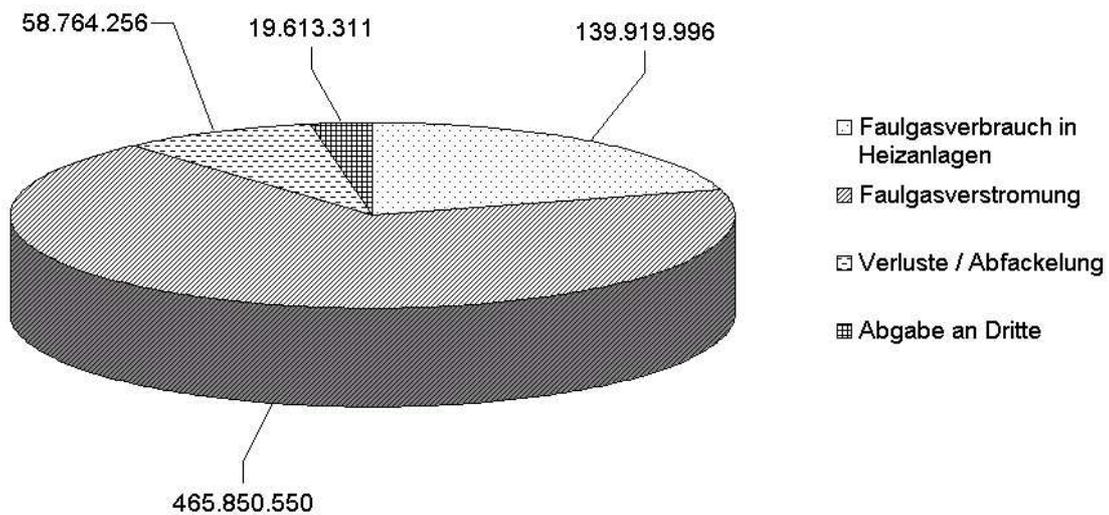


Abb. 3.2.9 Verwendung des Faulgases von Kläranlagen in Deutschland 2004

- Die Faulgaseinspeisung zur externen Nutzung (meist an EVUs) sind einzelne Ausnahmen mit einem Anteil von knapp 3 % der insgesamt erzeugten Gasmenge, die hier nicht weiter betrachtet werden.
- Die alternativ möglichen Formen der Faulgasverstromung über Mikroturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen sind noch Einzelfälle und werden im Kapitel 4 näher beschrieben. Aufgrund der deutlich geringeren Wartungskosten könnten sich erstere bei kleineren Anlagen mittelfristig als wirtschaftlicher Ersatz der BHKWs erweisen. Der Direktantrieb von Aggregaten über faulgasbetriebene Motoren ist kaum noch im Einsatz und wird ebenfalls nicht näher betrachtet.

### 3.2.5 Sonstige Regenerative Energien und Anlagenteile

- Der Einsatz von Solarzellen (Photovoltaik) oder Windkraftanlagen auf Kläranlagen unterliegt denselben Randbedingungen wie bei anderen Standorten und ist auf Einzelfälle begrenzt. Insofern werden diese im Rahmen dieses Projektes nicht behandelt. Sie können aber im Einzelfall, z.B. bei Verfügbarkeit größerer Flächen für Solarzellen, durchaus interessant sein.

- Der Einsatz von Solarkollektoren zur Wärmeerzeugung ist nur bei Anlagen ohne Schlammfäulung sinnvoll, da ansonsten im Sommer ohnehin ein Wärmeüberschuss bei der Faulgasverwertung vorhanden ist. Für die Energiebilanz sind sie wegen des geringen Anteils des Wärmebedarfs für Brauchwasser am gesamten Energiebedarf selbst für Anlagen ohne Fäulung nur von untergeordneter Bedeutung. Im übrigen gelten für ihren Einsatz ähnliche Betrachtungen wie im Hochbau.
- Das Potenzial von Wasserkraft im Zu- oder Ablauf von Kläranlagen ist begrenzt. Im Zulauf ist ohnehin in aller Regel eher eine Hebung des Abwassers erforderlich. Im Ablauf ist die verfügbare Absturzhöhe meist gering. Selbst bei einer Absturzhöhe von 10 m, einer nutzbaren Abwassermenge von 250 l/EW.d (mittlerer Mischwasserabfluss) und einem hohen Wirkungsgrad von 80 % liegt das theoretisch mögliche Energiepotenzial nur bei 2 kWh/(EW.a). Da in der Regel die verfügbare Absturzhöhe eher bei 1 bis 3 m liegt und wegen fehlendem Stauvolumen nur ein Teil des Abflusses wirtschaftlich verstromt werden kann, dürfte das praktisch erzielbare Potenzial deutlich unter 1 kWh/(EW.a) liegen und auf Einzelfälle begrenzt sein (z.B. KA Dresden, KA Balingen). Interessant könnte die Wasserkraftnutzung allerdings bei Sandfiltern in größeren Kläranlagen sein, bei denen die erhöht angeordnete Filterstufe über eine vorgeschaltete Abwasserhebung beschickt wird. Der Absturz im Auslauf des Filters könnte dann genutzt werden (z.B. KA Stuttgart, KA Frankfurt-Sindlingen).
- Eine weitere Möglichkeit der Kreislaufwirtschaft bzw. energetischen Optimierung bietet die Verwertung von Rechengut. Diese Möglichkeit wird bei kleineren Anlagen in der Regel über die Entsorgung als Hausmüll und dessen Verbrennung in Müllheizkraftwerken gewährleistet. Bei Kläranlagen mit eigener Klärschlammverbrennung wird Rechengut auch als weiterer Brennstoff eingesetzt (z.B. KA Hamburg, s. Kap. 7.1). Das Potenzial für eine intensivere energetische Verwertung dürfte daher relativ gering sein. Außerdem wird der Rechengutanfall durch Rechengutwäscher reduziert, die im Gegenzug zu einer Erhöhung des Primärschlammanfalls und damit der Faulgasbildung beitragen.

### 3.3. Energiebilanz von Kläranlagen in Deutschland

Es gibt unseres Wissens keine systematische Erfassung des Energieverbrauchs von Kläranlagen auf Bundesebene. Für die Energiebilanz von Kläranlagen in Deutschland müssen daher Hochrechnungen auf der Basis von größeren Umfragen in einzelnen Bundesländern, Auswertung von Feinanalysen zum Stromverbrauch und den statistischen Daten über Anzahl und angeschlossene Einwohnerwerte von Kläranlagen durchgeführt werden.

Dabei müssen gewisse Unsicherheiten bei der Auswertung von Umfrageergebnissen in Kauf genommen werden:

- Es gibt keine bundesweite Auswertung der Daten zur Häufigkeit der verschiedenen Grundverfahren bei der biologischen Abwasserbehandlung (Belebungsanlagen mit Faulung, Stabilisierungsanlagen, Tropfkörper etc.) und der jeweils angeschlossenen Einwohnerwerte. Die Auswertung der Unterlagen aus den DWA-Landesverbänden war im Rahmen dieser Studie zu aufwändig.
- Bei den Angaben zum Stromverbrauch ist nicht immer klar, inwieweit Sonderverfahren wie Klärschlamm-trocknung und –verbrennung in der Auswertung mit berücksichtigt sind, da diese häufig räumlich und/oder organisatorisch getrennt angesiedelt sind. Außerdem ist der Anteil der Eigenversorgung mit Strom über BHKWs oder direkt mit Faulgas angetriebenen Aggregaten nicht immer beim Stromverbrauch korrekt berücksichtigt.
- Bei der Faulgaserzeugung und –verwertung gibt es zwar bundesweite Erhebungen; diese weisen aber Ungenauigkeiten aufgrund von systematischen Messfehlern bei der Gasmessung (z.B. häufig fehlende Berücksichtigung von Temperatur und Gasdruck) oder fehlender Messeinrichtungen (z.B. für Gasverbrauch, abgepackelte Gasmenge und Stromeigenerzeugung).

Andererseits ergeben sich in den verschiedenen Umfragen und Untersuchungen erstaunlich ähnliche Werte für die mittleren spezifischen Stromverbräuche sowie für die Faulgaserzeugung. Eine Zusammenfassung der spezifischen Stromverbrauchswerte für Kläranlagen insgesamt und einzelner Anlagenteile aus den durchgeführten Fein-

analysen in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Österreich befindet sich im Anhang. Aus den Stromverbräuchen wurden durchschnittliche spezifische Energiekennwerte in kWh/(EW.a) für die einzelnen Größenklassen von Kläranlagen und Anlagenteilen abgeleitet. Diese ergeben sich nicht aus direkter statistischer Berechnung, sondern als Abschätzung aus einer Bewertung der unterschiedlichen Datenquellen im Hinblick auf Datenumfang, Repräsentativität und Aktualität.

Für die Umrechnung von Medianwerten aus Häufigkeitsverteilungen in (EW-) gewichtete Mittelwerte wurden innerhalb gleicher Größenklassen beim Stromverbrauch ein Zuschlag von etwa 5 bis 10 % angewandt, der sich aufgrund der typischen schiefen Verteilung der Kennwerte ergibt (die Streuung nach oben ist ausgeprägter als nach unten). Dagegen liegen die Medianwerte für Größenklassen-übergreifende Verteilungen immer deutlich über dem (EW-)gewichteten Mittelwert, da die zahlreichen kleinen Anlagen mit höheren Verbräuchen die Häufigkeitsverteilung dominieren.

Für die Berechnung der Energiebilanz wurden dann die Angaben des statistischen Bundesamtes über die Verteilung der Kläranlagenanzahl und der angeschlossenen Einwohnerwerte auf die Größenklassen herangezogen (Stand 2004). Diese Angaben wurden auf Plausibilität bzw. Übereinstimmung mit Angaben aus DWA-Erhebungen (bundesweit oder einzelne Bundesländer) geprüft. In Verbindung mit diesen Angaben können somit recht genaue Abschätzungen des bundesweiten Stromverbrauchs und der Eigenerzeugung sowie deren Verteilung auf die verschiedenen Verfahren und Größenklassen gemacht werden. Für den Wärmeverbrauch sind dagegen nur Größenordnungen zu ermitteln.

Innerhalb der Größenklassen 4 und 5 wurde lediglich unterschieden zwischen Anlagen mit oder ohne Faulung, ohne weitere Differenzierung bei der sonstigen Anlagentechnik. Dabei wurde vereinfachend angenommen, dass in GK 5 nur Belebungsanlagen mit Faulung existieren. Die geringe Zahl von Tropfkörpern in dieser GK mit etwas geringerem Stromverbrauch wurde vernachlässigt.

In GK 4 wurde die Verteilung zwischen Anlagen mit und ohne Faulung ermittelt auf der Basis der Angaben des statistischen Bundesamtes über die Anlagen mit Faulgaserzeugung (1.150 KA) und die Angaben der DWA-Klärschlammhebung über

die Anzahl der angeschlossenen Einwohner an Anlagen mit Faulung (76 % der EW). Nach Abzug der Kläranlagenkapazitäten aus GK 5 (268 KA mit 68 Mio. EW) ergab sich daraus für GK 4 die Zahl von rund 880 Anlagen mit etwa 28 Mio. EW.

Bei GK 1 bis 3 (< 10.000 EW) wurde dagegen vereinfachend unterstellt, dass keine Schlammfaulung betrieben wird, was angesichts der sehr geringen Zahl und Größe von Anlagen mit Faulung in GK 3 und 2 keine große Ungenauigkeit mit sich bringt (< 1 %). Dagegen wurde in diesen Größenklassen differenziert nach Art des Reinigungsverfahrens zwischen Belebung mit aerober Schlammstabilisierung (BS), (Tauch-) Tropfkörper und belüfteten Teichen, da sich hier in den Umfrageergebnissen (s. LfU 1998) signifikante Unterschiede ergaben. Als Abschätzung wurde aufgrund der Auswertungen von Umfragen und DWA-Erhebungen ein Anteil von je 10 % Tropfkörper (TK) und 10 % belüftete Abwasserteiche in GK 1 und 2, sowie 5 % Tropfkörper in GK 3 an der Anzahl der Kläranlagen und der angeschlossenen Einwohnerwerte angenommen.

Aus diesen Daten und Abschätzungen wurde die Bilanz für den derzeitigen Stromverbrauch (s. Abb. 3.2.3) erstellt.

Für die Faulgaserzeugung und –verwertung wurden ausschließlich die Angaben des statistischen Bundesamtes herangezogen (Stand 2004), da sich diese gut mit den Ergebnissen aus einzelnen Bundesländern decken und den aktuellsten Stand darstellen (s. Abb. 3.2.8 und 3.2.9).

Aus dieser Berechnung ergeben sich folgende wesentliche Ergebnisse der bundesweiten Energiebilanz:

1. Der Stromverbrauch aller 10.200 Kläranlagen (GK 1 bis 5) beträgt ca. 4.400 GWh/a entsprechend einem spezifischen Verbrauch von 35 kWh/(EW.a) (bei 126 Mio. EW). Er entspricht damit ungefähr 0,7 % des Stromverbrauchs in Deutschland oder 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente.
2. Eine Faulgaserzeugung findet auf rund 1.150 Kläranlagen mit 76 % aller angeschlossenen Einwohnerwerte statt. Insgesamt werden dabei 684 Millionen

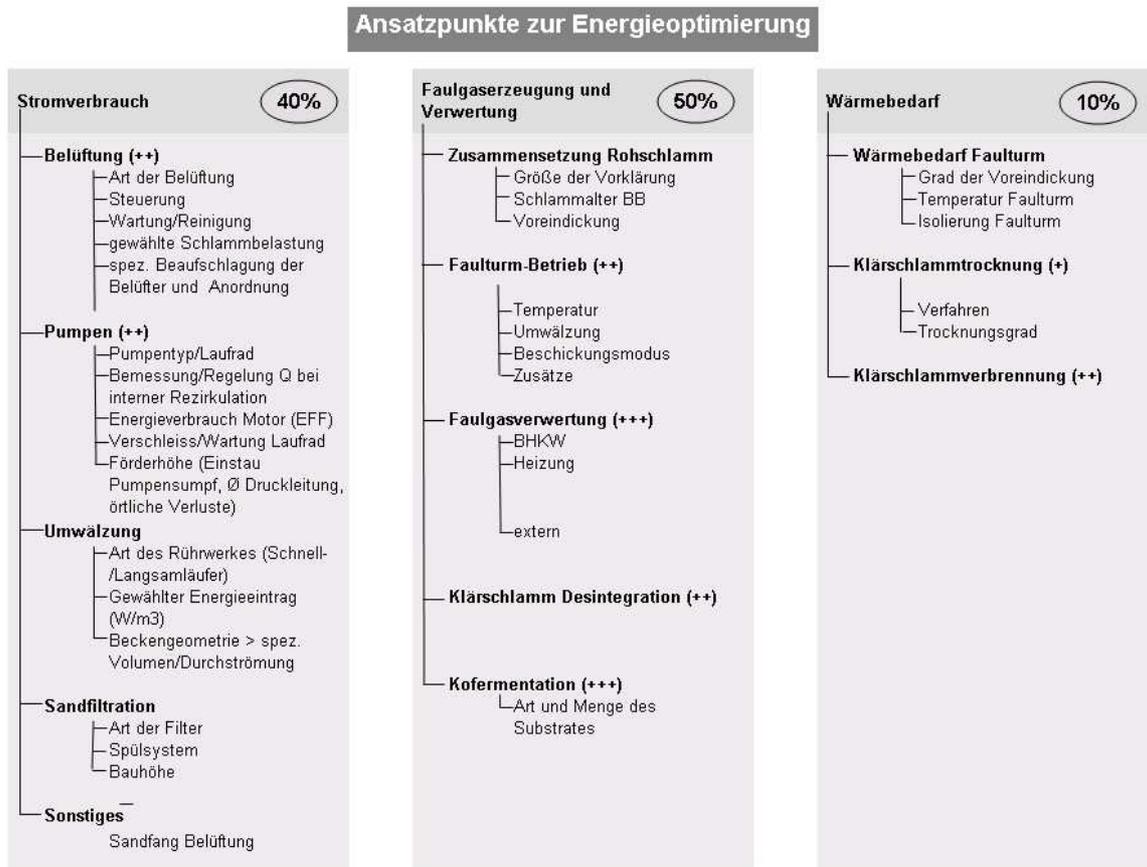
m<sup>3</sup>/a Faulgas (19,6 l/EW.d) mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 65 % erzeugt. Das entspricht einem Energiegehalt (unterer Heizwert) von 4,17 Millionen kWh (4,17 TWh bzw. 15 PJ) oder 43 kWh/(EW.a).

3. 68 % der Klärgasproduktion wird über BHKWs verstromt mit weitgehender Abwärmenutzung auf der Kläranlage (insgesamt 722 Kläranlagen). Dabei werden 864 GWh/a Strom erzeugt, die ganz überwiegend der Eigenversorgung dienen und nur zu knapp 14 % ins öffentliche Netz eingespeist werden. Der durchschnittliche Wirkungsgrad bei der Verstromung in BHKWs liegt demnach mit rund 30 % deutlich unter den Wirkungsgraden neuer BHKWs für Leistungsklassen ab 100 kW (ab ca. 50.000 EW).
4. Rund 20 % des Faulgases werden in Heizkesseln verbrannt und knapp 10 % ungenutzt abgeblasen oder abgefackelt. Lediglich knapp 3 % werden zur externen Verwendung - überwiegend an EVUs - abgegeben.
5. Damit decken Kläranlagen in ihrer Gesamtheit nur knapp 20 % ihres Strombedarfes selbst. Dies entspricht einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von knapp 600.000 t/a und einem Anteil von 1,4 % an der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen (in 2005).
6. Der mittlere Eigenversorgungsgrad bezogen auf die Kläranlagen mit Faulung beträgt 27 %. Betrachtet man dagegen nur die Anlagen mit Eigenstromerzeugung, steigt der mittlere Eigenversorgungsgrad auf 33 %.
7. Fast die Hälfte der Schmutzfracht in GK 5 und rund ein Drittel in GK 4 stammt aus industriell-gewerblichen Quellen und ist damit verantwortlich für etwa ein Drittel des Energieverbrauchs deutscher Kläranlagen. Möglicherweise könnte eine verstärkte (anaerobe) Vorbehandlung oder Mitbehandlung von Konzentraten im Faulturm gleichzeitig zu einer Entfrachtung der Kläranlagenzuläufe und damit zu einer Energieeinsparung führen.

### 3.4. Festlegung relevanter Bereiche und Verfahren im Bestand

Das Schema in Abb. 3.4.1 „Ansatzpunkte“ gibt zunächst einen Überblick über die wichtigsten Einflussfaktoren für die Energieeffizienz in Kläranlagen. Grundsätzlich muss zunächst unterschieden werden zwischen

1. Stromverbrauch durch Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung und
2. Faulgaserzeugung/-verwertung bei Anlagen mit Faulung, sowie
3. Wärmebedarf bei Anlagen mit Faulung und vor allem Klärschlamm-trocknung.



(+ / ++ / +++ zeigen qualitative Gewichtung)

Abb. 3.4.1: Ansatzpunkte zur Energieoptimierung

Im Hinblick auf den Strombezug sind die beiden Säulen Stromverbrauch und Faulgaserzeugung/-verwertung bei Anlagen mit Faulung nahezu gleichrangig zu betrachten. Auch das Einsparpotenzial liegt erfahrungsgemäß etwa gleich verteilt in beiden Bereichen, lässt sich aber meist bei der Faulgaserzeugung und –verwertung einfacher mobilisieren. In der Bilanz der Einsparbemühungen in Schweizer Kläranlagen (E.A. Müller 2006) wurde lediglich eine realisierte mittlere Stromeinsparung von ca.

10 % für alle Kläranlagen in den letzten 10 Jahren errechnet, während die Eigenstromerzeugung (von allerdings niedriger Ausgangsposition) etwa verdoppelt werden konnte. Die Stromeinsparung wurde deutlich überkompensiert durch eine parallel verlaufende Steigerung des gesamten Stromverbrauchs im gleichen Zeitraum von rund 30 % durch sonstige Einflüsse.

Der Wärmebedarf wird dagegen zu einem Großteil aus der Eigenerzeugung gedeckt, so dass er für den Primärenergieverbrauch nur bei kleineren Anlagen und bei der Klärschlamm-trocknung relevant wird. Dennoch führen die steigenden Ölpreise zu einer größeren wirtschaftlichen Bedeutung des Wärmebedarfs.

Nachfolgend wird auf Basis der Betrachtungen in Kapitel 3.2 und den Ergebnissen der Energiebilanz eine Kategorisierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung nach Verfahren und Größenklassen vorgenommen. Diese dient zum einen der Erstellung von Szenarien für die Auswirkungen von Energie-Optimierungsmaßnahmen oder der Einführung neuer Techniken (Kap. 4). Gleichzeitig werden damit auch die wichtigsten Bereiche für die Definition eines Standes der Technik hinsichtlich Energieeffizienz eingegrenzt.

### **Stromverbrauch**

Beim Stromverbrauch in der Abwasserbehandlung muss in erster Linie unterschieden werden nach Art des angewandten Verfahrens in der biologischen Stufe. Als Standards werden ausgewählt:

- **Belebungsverfahren mit simultaner aerober Schlammstabilisierung** (dominierend in GK 1 bis 3)
- **Belebungsverfahren mit anaerober Schlammstabilisierung** (fast ausschließlich in GK 5 und größeren Anlagen in GK 4). Für Anlagen mit Faulung wird die Modellkläranlage gemäß Handbuch „Energie in Kläranlagen“ zugrunde gelegt (s. Abb. 3.4.2).
- **Tauchtropfkörper und Tropfkörper** sind wesentlich energieeffizienter i. V. zum Belebungsverfahren und haben in den unteren Größenklassen einen nicht vernachlässigbaren Anteil am Anlagenbestand. Sie werden deshalb als zusätzliche Verfahren betrachtet.

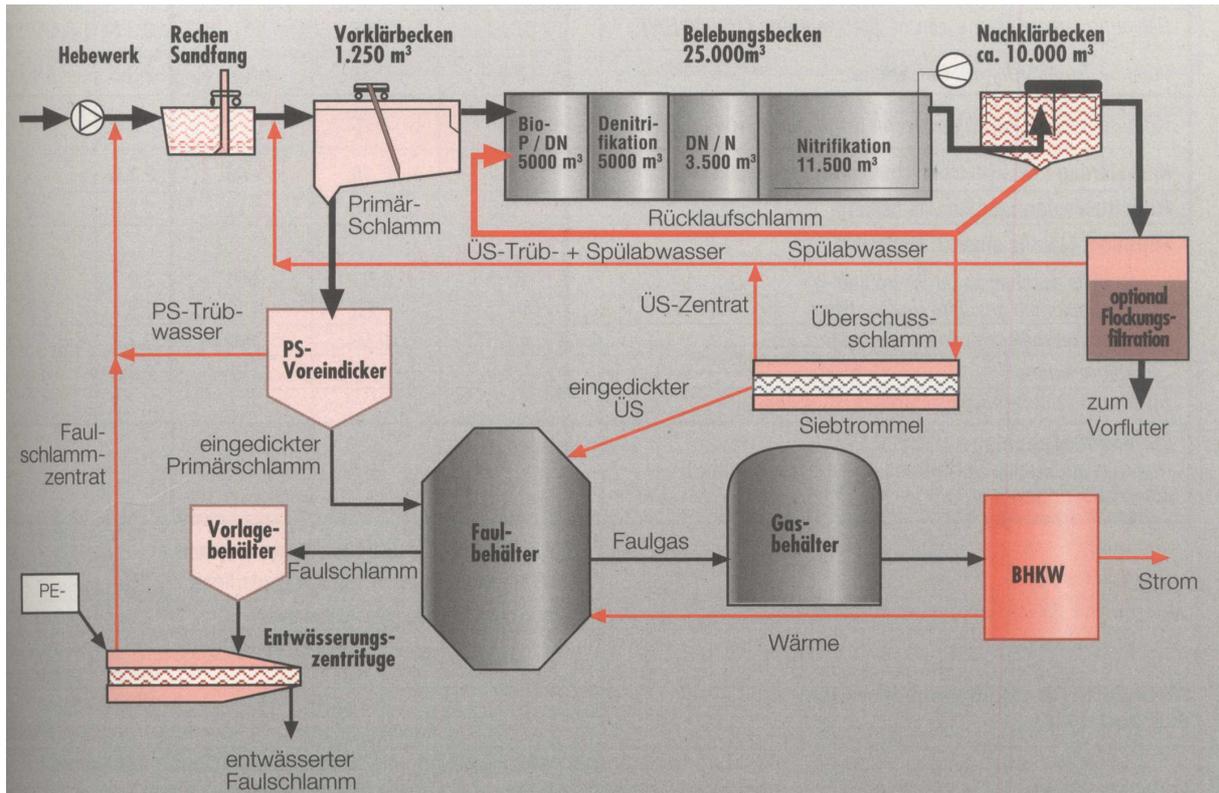


Abb. 3.4.2: Modellkläranlage gemäß Handbuch „Energie in Kläranlagen“, 1999

Eine weitere Differenzierung innerhalb der 2 Kategorien mit Belebungsverfahren wird nicht vorgenommen. Insbesondere werden zweistufige Belebungsanlagen aus Vereinfachungsgründen gleichgestellt mit einstufigen, obwohl sie grundsätzlich energetisch günstiger zu bewerten sind. Auch die Reinigungsziele werden einheitlich mit Stickstoff- und Phosphorelimination angesetzt, da die Energiekennwerte für unterschiedliche Ablaufqualitäten nicht mehr signifikant differieren.

Gleiches gilt für die Betrachtung von Kombinationsverfahren aus Tropfkörper und Belebung, bei der aber zur Berechnung der Kennzahlen für die Belüftung nur die anteilige Schmutzfracht angesetzt werden darf. Abwasserteiche werden wegen ihres etwas geringeren Energieverbrauches und der relativ großen Häufigkeit in den GK 1 und 2 noch getrennt aufgeführt, aber nicht weiter behandelt. Die übrigen Verfahren wie Pflanzenkläranlagen, getauchte Fest- und Fließbettreaktoren etc. werden in der Analyse der Ist-Situation anteilig den Anlagen mit und ohne Faulung zugeordnet. Da sie hinsichtlich der Summe der angeschlossenen Einwohnerzahlen nicht relevant sind, werden sie im weiteren nicht separat behandelt.

Grundsätzlich erscheint es uns sinnvoll, die Klärschlammstabilisierung zusammen mit der Abwasserbehandlung zu betrachten, da sie zumindest bei der aeroben Schlammstabilisierung häufig in die biologische Stufe integriert ist. Auch die weit verbreiteten Verfahren zur Klärschlammmentwässerung können in die pauschalen Energiekennwerte von Kläranlagen integriert werden, weil sie meist unabhängig von der weiteren Klärschlammmentsorgung eingesetzt werden und keine großen systematischen Unterschiede im Energieverbrauch aufweisen. Zur Vereinfachung wird nicht weiter differenziert nach Art der eingesetzten Aggregate und Verfahren (Dekanter, Kammerfilterpresse, Art der Voreindickung etc.), da ansonsten auch zusätzliche Aspekte wie erzielbarer Entwässerungsgrad oder erforderliche Peripherie (Flockungsmitteldosierstation, Kalkmilchaufbereitung etc.) mit einbezogen werden müssten. Angesichts einer zunehmenden Annäherung bei den Zielwerten für die einzelnen Verfahren und dem relativ geringen Anteil am Gesamtstromverbrauch ist eine pauschale Betrachtung angemessen.

Zusätzlich zu den drei Standardverfahren der Abwasser- und Klärschlammbehandlung kommen weitere energierelevante Verfahrensschritte, die vor allem bei größeren Kläranlagen (GK 4 und 5) so häufig sind, dass sie eine gesonderte Betrachtung erfordern. Dazu gehören im wesentlichen:

- Die **Sandfiltration** im Ablauf: Für Kläranlagen mit Sandfiltration werden gemäß der Häufigkeitsverteilung (statist. Bundesamt 2004) 4,5 Mio. EW in GK 4 und 17 Mio. EW in GK 5 angesetzt. Gemäß den Umfrageergebnissen (LfU 1998) und eigenen Erhebungen (KA Frankfurt, Wasserverband Eifel-Rur) wird ein mittlerer Wert von 5 kWh/(EW.a) als Ist-Verbrauch angenommen.
- Die **Abluftbehandlung**: Es werden zwar zunehmend Abluftbehandlungsanlagen in Kläranlagen installiert, aber es gibt kaum Informationen über die Häufigkeit und noch weniger über den Energieverbrauch solcher Anlagen. Klar ist, dass es sich um relevante Größenordnungen (ca. 1 bis 5 kWh/EW) handeln kann, die jedoch extrem schwanken und nur schwer mit der Größe der Kläranlagen zu korrelieren sind. Daher sind Angaben zu mittleren spezifischen Verbräuchen oder Zielwerten schwierig und müssen im Einzelfall untersucht werden.

Weitere, seltener angewandte **Sonderverfahren** wie z.B. die Membranfiltration werden bei der Ist-Analyse nicht betrachtet aber im Kap. 4 behandelt.

### **Klärschlamm Entsorgung**

Die energierelevanten Bereiche der Klärschlamm Entsorgung auf Kläranlagen (nach mechanischer Schlamm Entwässerung) betreffen vor allem:

- Die **Klärschlamm Trocknung**: Dieser Verfahrensschritt ist zwar auf Kläranlagen schon relativ häufig vorhanden. Es gibt aber eine große Vielfalt an Verfahren mit unterschiedlicher Vorentwässerungen, Trocknungsgraden und Abwärmennutzungen. Dementsprechend unterschiedlich sind die spezifischen Kennwerte. Bei der Ermittlung der Energieeffizienz von Kläranlagen muss der Stromverbrauch für die ggf. vorhandenen Anlagen zur Klärschlamm Trocknung als additiver Verfahrensschritt abgezogen werden. Allerdings ist die Trocknung vor allem bei der Wärmebilanz relevant, während der Stromverbrauch nur eine untergeordnete Rolle spielt. (s. auch nachfolgende grundsätzliche Anmerkungen zur Klärschlamm Entsorgung und Kap.4)
- Die **Klärschlamm Monoverbrennung** betrifft nur 17 Kläranlagen und kann wegen der komplexen Verfahrenstechnik und unterschiedlichen Einbindung in die Kläranlagen nur im Einzelfall untersucht werden. (s. auch nachfolgende grundsätzliche Anmerkungen zur Klärschlamm Entsorgung und Kap.4)

Für eine Bewertung der Energieeffizienz bei der Klärschlamm Entsorgung muss die gesamte Verfahrenskette der Schlammbehandlung auf der Kläranlage selbst (ab Schlamm Entwässerung) und ggf. auf externen Anlagen betrachtet werden. Wie im Abschnitt 2.4 (Systemgrenzen) beschrieben, ergeben sich hier gewisse methodische Schwierigkeiten durch die Anrechnung von Gutschriften aus der Nährstoffrückgewinnung und der externen Klärschlamm Verbrennung. Klärschlamm ist als regenerativer Brennstoff anerkannt und führt damit zu CO<sub>2</sub>-Gutschriften für die Betreiber beim Einsatz in Kraft- oder Zementwerken bzw. in Klärschlamm Verbrennungsanlagen. Andererseits muss der Klärschlamm Transport beim Vergleich verschiedener Verfahrensketten mit berücksichtigt werden.

Wegen dieser methodischen Schwierigkeiten und der Notwendigkeit einer gesamtheitlichen Betrachtung der Klärschlamm Entsorgung wurde in diesem Fall auf die Betrachtung von isolierten Kennzahlen für einzelne Verfahrensschritte verzichtet. Es wurden vielmehr aus dieser Gegenüberstellung der Energiebilanzen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten grundsätzliche Empfehlungen für eine optimale Energieeffizienz bei der Klärschlamm Entsorgung abgeleitet. Dabei finden die Klärschlammvererdung und die solare Trocknung als „alternative“ Trocknungsmethoden bei kleineren Kläranlagen Eingang in die Untersuchung, obwohl sie für Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 keine größere Relevanz besitzen. Diese Überlegungen werden in den Szenarien in Kap. 4 ausführlicher dargestellt.

Die landwirtschaftliche oder landschaftsbauliche Klärschlammverwertung soll aus übergeordneten Gründen nicht mehr berücksichtigt werden. Auch die Klärschlammkompostierung soll auf Vorgabe des UBA als Auftraggeber dieser Studie wegen der Schadstoffverlagerung (Verdünnungsverbot) nicht betrachtet werden, unabhängig von einer anschließenden landwirtschaftlichen Verwertung oder Deponierung. Demzufolge wird auch die Hygienisierung des Klärschlammes als separater Verfahrensschritt (außerhalb einer Trocknung oder Verbrennung) nicht betrachtet.

### **Verteilung des Stromverbrauchs innerhalb der Kläranlage**

Bei fast allen Kläranlagen (außer Tropfkörpern) ist die Belüftung mit großem Abstand der wichtigste Stromverbraucher. Hier wird nicht differenziert nach feinblasiger Belüftung oder Oberflächenbelüfter. Letztere werden vor allem bei Stabilisierungsanlagen eingesetzt, die in der Gesamtbewertung aus Umwälzung und Belüftung oft nur geringe Unterschiede gegenüber Druckluftbelüftung aufweisen (s. auch ATV-Bericht Energiebilanzierung in KA, 1999, S.15). Für die Szenarien wird aufgrund der ausgewerteten Feinanalysen und der mittleren Verteilung für die Belüftung ein durchschnittlicher Anteil von 50 % am Gesamtstromverbrauch angesetzt.

Bei den weiteren Aggregaten folgen mit großem Abstand die Rühr- und Pumpwerke. Bei Tropfkörpern ist vor allem das Pumpwerk für die TK-Beschickung und die Art der Kreislaufführung entscheidend für den Energieverbrauch.

Daraus ergeben sich auf der Verbrauchsseite klare Prioritäten für die Bemühungen um Energieeinsparungen (s. Abb. 3.4.3a und 3.4.3b). Oft werden dabei gute spezifische Werte in Teilbereichen durch ungünstige Werte in anderen Anlagenteilen kompensiert, so dass bei der Vorgabe von Kennwerten und der Abschätzung des Einsparpotenzials zumindest die Hauptverbraucher separat betrachtet werden müssen.

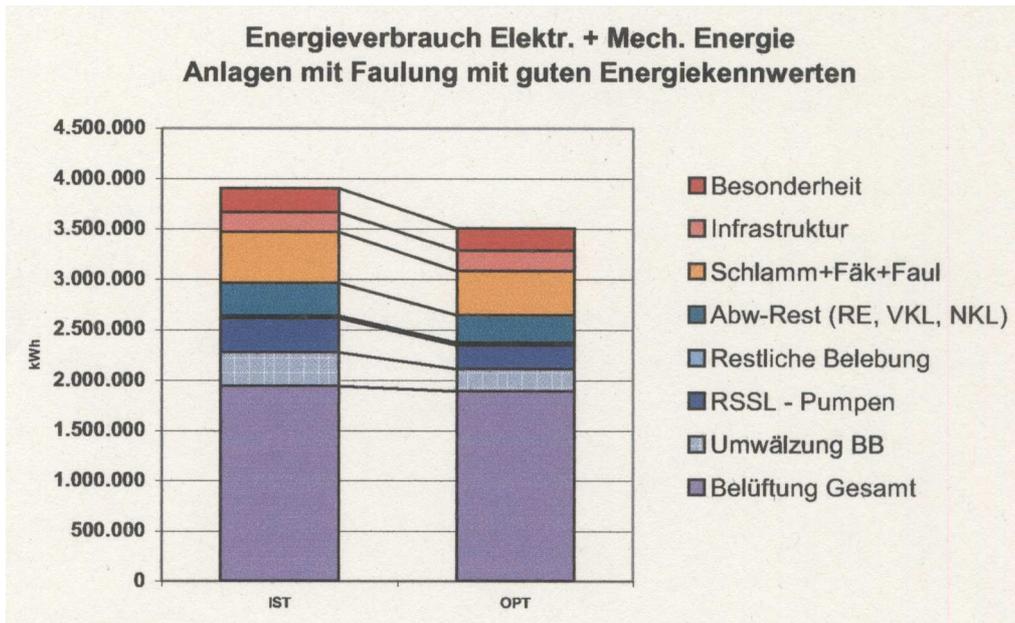


Abb. 3.4.3a: Stromverbrauch und Einsparpotenzial in effizienten Kläranlagen

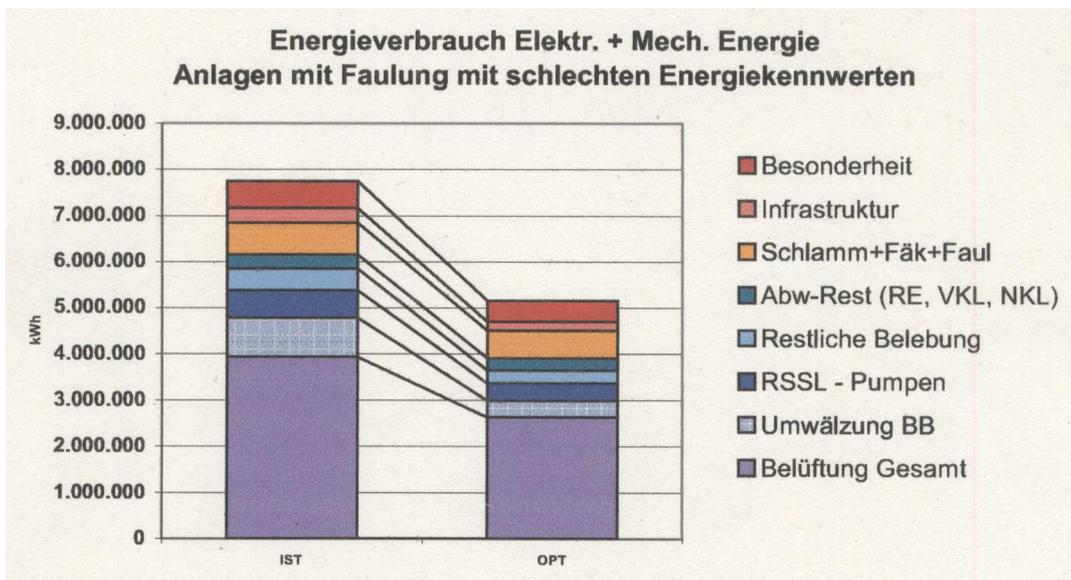


Abb. 3.4.3b: Stromverbrauch und Einsparpotenzial in Kläranlagen mit schlechten Energiekennwerten (beide Abb. aus AGIS, 2001)

Ggf. vorhandene besondere Verfahrensschritte oder Anlagenteile, die sich nicht in die o. g. Verfahren einordnen lassen, unterliegen einer Einzelfallbetrachtung und werden nicht systematisch in die Kläranlagentypisierung aufgenommen. In aller Regel können sie bzgl. der Kennzahlen entweder in die übrigen Rubriken eingeordnet werden (z.B. Klarwasserpumpwerk, Zwischenhebewerk analog zum Zulaufpumpwerk) oder sie sind irrelevant im Hinblick auf den Gesamtverbrauch (z. B.  $< 1 \text{ kWh}/(\text{EW.a})$ ) und werden pauschal über die Position Sonstiges erfasst.

### **Faulgaserzeugung und -verwertung**

Bei der Faulgaserzeugung wird im Weiteren nicht differenziert nach Art der Faulung (thermophil oder mesophil; ein- oder zweistufig etc.), da die Unterschiede bei der erzeugten Gasmenge gering sind i. V. zur Streubreite der Gaserzeugung insgesamt. Der Anteil des Faulgases aus systematischer Kofermentation externer Substrate sowie gelegentlicher Mitbehandlung von Festabscheiderrückständen, (Fäkal-) Schlämmen etc. aus dem Einzugsgebiet der Kläranlage kann praktisch nicht ermittelt werden und wird daher als Teil der normalen Faulgasproduktion betrachtet. Er dürfte im Mittel deutlich unter 10 % liegen.

In diesem Zusammenhang ist auffällig, dass praktisch bei allen Erhebungen der spezifische Faulgasanfall mit durchschnittlich 20 bis 25 l/EW.d (bzw. 500 bis 600 l/kg oTR) deutlich über den theoretisch postulierten 13 bis 18 l/EW.d liegt (Kapp, 1999 für Belebungsanlagen mit Vorklämung und 15 Tagen Schlammalter). Auch die von der DWA-Fachgruppe Biogas genannten Erwartungswerte von 14 bis 25 l/EW.d werden damit übertroffen. Diese Frage wird in Kap. 6.1.5 näher behandelt.

Da sich sowohl der Wirkungsgrad der BHKWs als auch der Anteil der Faulgasverstromung mit relativ geringem investivem Aufwand (im Vergleich zu einer verfahrenstechnischen Umstellung der Kläranlage) und ohne große Eingriffe in die übrige Anlagentechnik verbessern lässt, zeigt dies die große Bedeutung der Faulgasverwertung für die Optimierung der Energiebilanz auf Kläranlagen. Hinzu kommt eine Steigerung der Faulgasproduktion durch Klärschlamm-Desintegration, Kofermentation oder optimierten Betrieb des Faulturms (s. dazu Szenarien, Kap.4).

## Wärmebilanz

Wichtig erscheint uns auch ein Hinweis auf die stark gestiegene Bedeutung des Wärmebedarfs von Kläranlagen. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen steigt zum einen der Wärmebedarf wegen der zunehmend eingesetzten Klärschlamm-trocknung massiv an. Zum anderen kann der Wärmebedarf gerade bei Kläranlagen der GK 4 bei verstärktem Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung mit hohem elektrischen Wirkungsgrad und geringeren Abwärmemengen auch ohne Klärschlamm-trocknung selten vollständig durch das eigene Faulgas abgedeckt werden. Nach den massiven Preissteigerungen für Heizöl und Erdgas wird dieser externe Wärmebezug auch ökonomisch relevant.

Das Verhältnis von durchschnittlichem Bezugspreis pro kWh Strom und kWh Heizöl/Erdgas hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verschoben. Während Strom heute (wieder) etwa genau so viel kostet wie vor 20 Jahren ( $\sim 10$  ct/kWh<sub>el</sub>), hat sich der Heizölpreis im gleichen Zeitraum etwa verfünffacht (von  $\sim 1,2$  auf über 6 ct/kWh<sub>th</sub>). Daher gewinnt die Betrachtung von Wärmebedarf und -bereitstellung auch ökonomisch stark an Bedeutung.

Der Wärmebedarf ohne Klärschlamm-trocknung wird ganz überwiegend bestimmt von der Aufheizung des Rohschlammes für die Faulung (ca. 70 bis 80 %) und den Abstrahlungsverlusten des Faulturms (ca. 10 bis 20 %). Bei der Aufheizung des Rohschlammes sind die wesentlichen Einflussfaktoren die Temperaturerhöhung und vor allem die Schlammmenge. Während sich die Temperaturerhöhung nur sehr begrenzt beeinflussen lässt (z.B. über Absenkung der Faulraumtemperatur im Winter) ist die Schlammmenge ganz wesentlich bestimmt durch den Grad der Voreindickung des Rohschlammes.

Der Primärschlamm kann durch statische Voreindickung bereits in der Vorklärung auf TS-Gehalte von ca. 5 % eingedickt werden. Dagegen ist die statische Voreindickung des Überschussschlammes ohne Flockungsmittel sehr begrenzt auf maximal 1 bis 2 % TS. Die maschinelle Überschussschlamm-Voreindickung, die bisher nur für etwas mehr als die Hälfte der angeschlossenen EW praktiziert wird, erlaubt hier eine Verringerung des zu erwärmenden Schlammvolumens auf etwa ein Fünftel (ca. 6 bis 8 % TS). Sie ist deshalb sehr maßgeblich für die Energiebilanz, zumal sich auch zu-

sätzliche positive Effekte in anderen Bereichen erzielen lassen (z.B. höhere Verweilzeit im Faulturm, geringere Rückbelastung der Kläranlage durch Trübwasser etc.).

Der Wärmebedarf für die **Gebäudebeheizung und Brauchwasser** wird nachfolgend nicht näher betrachtet, da er selten getrennt erfasst wird und größenordnungsmäßig nur eine untergeordnete Rolle für den Gesamtwärmebedarf der Kläranlage spielt (< 10 %). Im Übrigen können hier die Kennwerte und Grundsätze aus dem Hochbau übertragen werden.

## 4. Neue Techniken und Trends

### 4.1. Überblick über neue Techniken und Trends

Es liegt auf der Hand, dass eine klare Abgrenzung zwischen „Neuen Techniken“ und Bestand, angesichts einer ständigen Veränderung und Optimierung der eingesetzten Technologien und Verfahren nicht eindeutig vorgenommen werden kann. Im Rahmen dieses Projektes wurde der Begriff „neue Techniken“ vor allem im Hinblick auf neue Anforderungen an die Reinigungsleistung der Kläranlagen (z.B. Hygienisierung des Ablaufes, Abwasserfiltration) oder an die Klärschlammbehandlung (insbesondere Nährstoffrückgewinnung) eingeführt.

Der Begriff soll auch neue Trends erfassen, die über den technischen Standard hinaus gehen, wie er in vorigen Kapitel definiert wurde. Darunter können auch bewährte Verfahren wie die Abluftbehandlung oder die Klärschlammverbrennung fallen, die in neuerer Zeit stärker eingesetzt werden. Da bei diesen künftigen Trends naturgemäß subjektive Einschätzungen zugrunde liegen, wurden verschiedene Szenarien für die mögliche Verbreitung von Verfahren und ihrer Energieeffizienz entwickelt. Damit soll zumindest der größenordnungsmäßige Einfluss verschiedener Trends auf den Energieverbrauch ermittelt werden.

Bei diesen Szenarien werden aber auch bereits absehbare neue gesetzliche Regelungen mit berücksichtigt. So soll künftig ein Verwertungsgebot für Phosphor über die Abwasserverordnung vorgegeben werden. Dies kann auf der Kläranlage durch nass-chemische Methoden oder Monoverbrennung mit Rückgewinnung aus der Asche erreicht werden.

In diesem Zusammenhang muss auch auf die Zusage der vier großen Kraftwerksbetreiber aus 2004 hingewiesen werden, nach der innerhalb von 9 Monaten die Bereitstellung einer Mitverbrennungskapazität für den gesamten Klärschlammfall möglich ist (anlagenscharf nachgewiesen), so dass eine vollständige Umstellung auf Klärschlammverbrennung sehr schnell möglich wäre. Die Konzerne wären sogar bereit, Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen mit P-Recycling zu errichten. Ein Entsorgungseingpass bei Beendigung der landwirtschaftlichen Verwertung ist deshalb nicht zu befürchten.

Die bereits bewährten, aber jetzt verstärkt eingesetzten Verfahren werden in diesem Abschnitt nicht näher beschrieben. Es werden lediglich die verfügbaren Werte zum spezifischen Energieverbrauch zusammengestellt und für die o. g. Szenarien ausgewertet.

Technische Verbesserungen, die sich bei den konventionellen Verfahren durchgesetzt haben, (z. B. höhere Wirkungsgrade aufgrund neuer Belüftermaterialien) werden direkt bei der Berechnung von Zielwerten für den Energieverbrauch berücksichtigt und nicht explizit erläutert. Aufgrund der Vielzahl spezieller Sonderfälle werden neue Verfahrenstechniken, die nur vereinzelt eingesetzt wurden und keine Aussicht auf starke Verbreitung haben oder deren Einsatz keinen signifikanten Einfluss auf den Stromverbrauch hat, ebenfalls nicht berücksichtigt.

Es werden also im Rahmen des Projektes solche „neuen Techniken“ betrachtet, die über die oben definierten gängigen Standardverfahren der Abwasser- und Schlammbehandlung hinausgehen und mittelfristig den Gesamtstromverbrauch von Kläranlagen aufgrund des spezifischen Stromverbrauchs und der Marktdurchdringung stark beeinflussen (könnten).

Dabei kann unterschieden werden zwischen

- neue Techniken, die bereits jetzt in großtechnischem Maßstab zumindest in einigen Kläranlagen betrieben werden und somit gewisse Betriebserfahrungen aufweisen und
- neue Techniken, für die lediglich Laborversuche oder Pilotanlagen im halb- bis großtechnischen Maßstab existieren.

Für die Verfahren der ersten Kategorie können bereits verlässliche Angaben für den Energieverbrauch gemacht werden. Dazu gehören:

- Membranverfahren (Reine Filtration oder Biomembrananlagen)
- Hygienisierung von Abwasser (z.B. mit UV-Bestrahlung, Ozon)
- Separate Prozesswasserbehandlung
- Klärschlammintegration, (mechanisch, thermisch, biologisch)
- Kofermentation

- Alternativen bei der Klärschlamm-trocknung (solare KS-Trocknung, KS-Vererdung, Niedertemperaturtrocknung und Nutzung von industrieller Abwärme)
- MSR-Technik: Fuzzy-logic für Sauerstoffregelung, NH<sub>4</sub>-Sonden mit ionenselektiver Membran
- Abluftbehandlung
- Einsatz von EFF 1-Motoren

Die Verfahren der zweiten Kategorie werden zwar nach unserer Einschätzung zukünftig eine gewisse Relevanz in Kläranlagen gewinnen; es liegen aber noch nicht genügend großtechnische Erfahrungen vor, um belastbare Aussagen zum Energieverbrauch abzuleiten. Dazu gehören:

- Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm
- Neuere Faulgasverstromung (Brennstoffzelle, Stirling-Motor, Mikroturbine)

Wegen fehlender Relevanz bei der Marktdurchdringung und/oder Energierelevanz werden nicht berücksichtigt:

- Sonderverfahren bei der thermischen Klärschlamm-Verwertung (Niedertemperaturkonvertierung, Niederdruckkonvertierung, Fischer-Tropsch-Verfahren etc.)
- **Biofilmverfahren** (außer Tropfkörper und Tauchtropfkörper): Insbesondere Biofilter, sowie Fließ- und Wirbelbetтанlagen wurden in Deutschland kaum gebaut. Die Umstellung einer signifikanten Anzahl bestehender Anlagen auf Biofilmverfahren ist in näherer Zukunft nicht erkennbar. Biofilmverfahren (außer Tropfkörper/Tauchtropfkörper) sollen auch deswegen nicht bei den neuen Techniken berücksichtigt werden, weil sie einen deutlich höheren Stromverbrauch als konventionelle Anlagen verursachen.
- **Festbett-Anaerob-Reaktoren** zur Abwasserreinigung: Trotz sehr günstiger Energiekennwerte ist eine Umsetzung in relevantem Umfang nicht erkennbar, da dies nicht nur exorbitante Investitionen für die Umstellung erfordern würde, sondern auch erhebliche betriebliche Probleme bei der Nährstoffelimination zu befürchten wären.

- **SBR-Anlagen:** Im Hinblick auf den Energieverbrauch sind keine signifikanten Unterschiede zum konventionellen Belebungsverfahren zu erkennen. Außerdem ist der Verbreitungsgrad relativ gering, so dass eine Differenzierung hinsichtlich der Energiekennzahlen nicht erforderlich ist.
- Die nachgeschaltete **Aktivkohlefilterung** mit Festbett-Adsorbentien oder durch Zugabe von Pulverkohle ist bisher noch kaum verbreitet, könnte aber möglicherweise im Rahmen der Entfernung von Arzneimittelrückständen oder anderen Spurenstoffen Bedeutung erlangen. Für eine fundierte Bewertung der Energierelevanz und Marktdurchdringung ist es noch zu früh.
- **Dezentrale Abwasserbehandlung:** Erste Studien zeigen, dass der Energieverbrauch dezentraler Systeme (Hauskläranlagen mit Belebungsverfahren oder Tropfkörper, etc.) deutlich über denen zentraler Kläranlagen liegt (wobei prinzipiell auch Pflanzenkläranlagen ohne Energieverbrauch im Betrieb denkbar sind). Ähnliches gilt für weitergehende Konzepte (Ecosan-Techniken wie z.B. Grauwasserrecycling, Gelbwasserabtrennung, Vakuumsysteme etc.), die jedoch noch nicht in nennenswertem Umfang eingesetzt werden. Ein signifikanter Einfluss auf den Gesamtstromverbrauch ist in naher Zukunft nicht zu erwarten.
- **Optimierte Faulgaserzeugung / verringerter Klärschlammfall durch Zugabe von biochemischen Hilfsstoffen wie Enzyme, Folsäure, Tenside etc.:** Die bisherigen Versuche im Labor- und großtechnischen Maßstab haben keine eindeutigen, systematisch reproduzierbaren Verbesserungen der Faulgaserzeugung durch die genannten Zusatzstoffe gezeigt, auch wenn im Einzelfall messbare Wirkungen auftraten. Im übrigen kann diese Dosierung als biochemische Klärschlamm-Desintegration betrachtet werden, für die ähnliche Überlegungen gelten wie bei den übrigen Desintegrations-Verfahren (s. dort).
- **Externe Nutzung von Faulgas:** Die externe Nutzung in Form von Einspeisung ins Gasnetz oder Verflüssigung zum Einsatz als Kraftstoff für Fahrzeuge etc. wird zwar in Einzelfällen durchgeführt, hat aber in der Gesamtbilanz keine Relevanz und erscheint für Klärgas (i. G. zu Biogasanlagen mit Abwärme-

überschuss) auch nicht als interessante Alternative. In der Schweiz wird zwar die Einspeisung von Faulgasüberschuss in zunehmendem Maße praktiziert. Dies hat aber rein fiskalische Gründe, die in Deutschland nicht gegeben sind.

- **Neue Möglichkeiten der Regelungstechnik:** In den letzten Jahren haben sich u. a. durch die Weiterentwicklung der rechnerischen Simulation des Belüftungsverfahrens, die Bereitstellung günstiger online-Messsonden und die Einbindung internet-gestützter Kommunikation neue Möglichkeiten der Regelung biologischer Prozesse und betrieblicher Optimierung ergeben. Dazu gehört auch die Fuzzy-logic-Regelung der Belüftung auf der Basis von Redox-, Potenzial- oder Nitrat- und Ammonium-Messungen die sich gerade bei kleinen bis mittleren Anlagen bewährt hat und im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Daneben gibt es aber eine Reihe weiterer Ansätze, die noch in der Erprobungsphase sind, z.B.
- Feed-Forward-Strategien, die eine frühzeitige Reaktion der Regelkreise auf Veränderungen der Zulauffrachten erlauben.
  - Case-based Reasoning CBR / Expertensysteme

Diese Möglichkeiten werden teilweise bereits von konventionellen Reglersystemen übernommen und sind in ihrer Wirkung nur schwer abzugrenzen von sonstigen Verfahrensoptimierungen. Sie werden deshalb als weitere Möglichkeit der Optimierung der Reinigungsleistung und der Energieeffizienz gerade auch bei kleineren Anlagen gesehen, die jedoch nicht zu einer signifikanten Veränderung der erreichbaren Zielwerte beim Energieverbrauch führen.

## 4.2. Neue Techniken zur Abwasserreinigung

### 4.2.1 Membranverfahren

#### Grundlagen

Die Membrantechnik ist in der kommunalen Abwasserbehandlung noch ein sehr junges Verfahren, zu dem noch wenig Betriebserfahrungen von großtechnischen Anlagen vorliegen. Das Handbuch „Membrantechnik zur Abwasserbehandlung“, das vom Ministerium MUNLV in NRW gefördert wurde, bietet eine aktuelle Marktübersicht der Verfahren.

Für den Einsatz von Membranen zur Abwasserreinigung gibt es verschiedene Möglichkeiten der Anordnung der Membranen im Prozess. Grundsätzlich kann zwischen dem Membranbelebungsverfahren und einer nachgeschalteten Membranfiltration unterschieden werden, beide Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

Als Membranbelebungsverfahren wird die Kombination aus dem konventionellen Belebungsverfahren mit einer Membranfiltration verstanden. Die Membranen ersetzen dabei die Nachklärung, wodurch die Abtrennung des belebten Schlammes unabhängig von seinen Sedimentationseigenschaften wird und allein von der Membran abhängt. Aufgrund der höheren möglichen Feststoffgehalte (bis 15 g/l) als beim konventionellen Belebungsverfahren kommt ausschließlich die Crossflow-Filtration als Verfahrensweise in Betracht, so dass diese als Standard für den Energieverbrauch definiert wird. Die Membranen können dabei direkt im Belebungsbecken getaucht oder in einem separaten Filtrationstank angeordnet werden. Der im Vergleich zur konventionellen Belebung erhöhte Energiebedarf resultiert aus der erforderlichen Crossflow-Belüftung und den insgesamt höheren TS-Gehalten. Da die Energie für die Belüftung nur beim Einsatz der Membranen im Belebungsbecken auch für die biologischen Reinigungsprozesse genutzt werden kann, wird diese Variante als Standard empfohlen.

Bei der nachgeschalteten Membranfiltration werden die Membranen hinter dem Nachklärbecken angeordnet und halten so die aus der Nachklärung abtreibenden Feststoffe zurück. Zur Nachfiltration kann sowohl das Dead-End- als auch das Crossflow-Verfahren eingesetzt werden. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt vom Feststoffgehalt des zu filtrierenden Mediums ab.

Zur Desinfektion von gering feststoffhaltigen Abläufen von Nachklärbecken oder Sandfiltern wird das Dead-End-Verfahren als Stand der Technik festgelegt, da es sich im Vergleich zum Crossflow-Verfahren durch einen wesentlich geringeren Energiebedarf auszeichnet, eine geringere Membranfläche benötigt und sich ein höherer Fluss erzielen lässt (Krampe und Vetter, 2003).

Der Energieverbrauch bei Membrananlagen schwankt auch stark nach Membrantyp (z.B. Porengröße, Membranmaterial). Die Keramikmembranen erweisen sich in neueren Versuchen als deutlich leistungsfähiger. Allerdings ist es zum derzeitigen Stand der Erprobung noch problematisch, einen Membrantyp als Stand der Technik festzulegen, zumal diese Auswahl auch von der Abwasserzusammensetzung abhängt und damit dem Planer bzw. Betreiber überlassen werden sollte.

### **Membranbelebungsanlagen (MBR)**

Der Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen setzt sich aus den einzelnen Verbräuchen der Vorbehandlung, dem Belebungsbecken, der Filtration und dem sonstigen Energiebedarf zusammen. Für einen kommunalen MBR mit einer internen Anordnung der Membranen (im Belebungsbecken) ergibt sich ein Gesamtenergiebedarf von etwa 0,71 kWh/m<sup>3</sup>, wobei der Energiebedarf zur Belüftung mit knapp 0,6 kWh/m<sup>3</sup> etwa 85% beträgt (Krause, 2005). Der Gesamtenergiebedarf einer kommunalen Membranbelebungsanlage mit externer Anordnung der Membranmodule wird theoretisch wie folgt berechnet:

Tab. 4.2.1: Theoretischer Energiebedarf einer kommunalen Membranbelebungsanlage (Krause, 2005)

	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Vorbehandlung	(kWh/m <sup>3</sup> )	0,024
Belebung	(kWh/m <sup>3</sup> )	0,34
Filtration	(kWh/m <sup>3</sup> )	0,43
Infrastruktur	(kWh/m <sup>3</sup> )	0,022
<b>Summe</b>	<b>(kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,816</b>

Demgegenüber weisen realisierte Anlagen einen durchschnittlichen Energiebedarf von  $1,4 \text{ kWh/m}^3$  auf (Krause, 2005). Bezogen auf die Werte aus Tabelle 4.2.1 ergibt sich damit ein Energiesparpotenzial von ca. 40%.

Im Rahmen der ATV-DVWK-Membrantage beschreibt Wedi (2003) den Energiebedarf des Membranbelebungsverfahrens. Als wesentlicher Verbraucher wird hier die Crossflow-Belüftung mit  $0,33$  bis  $0,73 \text{ kWh/m}^3$  angegeben. Zusätzlich sind für den Abzug des Permeats  $0,06 \text{ kWh/m}^3$  bis  $0,08 \text{ kWh/m}^3$  anzusetzen, für die Rezirkulation aus separaten Kammern weitere  $0,015 \text{ kWh/m}^3$  bis  $0,02 \text{ kWh/m}^3$ . Als Zielgröße für den Gesamtverbrauch neuer Membranbelebungsanlagen gibt Wedi  $0,9$  bis  $1,2 \text{ kWh/m}^3$  an.

Krampe und Laufer (2005) geben den spezifischen Energieverbrauch der Membranbelebungsanlage Waldmössingen anhand der gesamten Zulaufmenge (laut Betriebstagebuch) und der durch die Stadtwerke Schramberg für den jeweiligen Monat in Rechnung gestellten Gesamtwirkarbeit an. Damit war eine Aufteilung des Energieverbrauchs wie in Tabelle 4.2.1 dargestellt nicht möglich. Der hier im praktischen Betrieb ermittelte Stromverbrauch schwankte zwischen  $0,67$  und  $1,3 \text{ kWh/m}^3$ . Für den Zeitraum der Messungen ergab sich dabei ein Mittelwert von  $0,88 \text{ kWh/m}^3$ . Es zeigte sich dabei ein Zusammenhang zwischen dem spezifischen Stromverbrauch und der Zulaufmenge. In Abbildung 4.2.1 ist die Abhängigkeit des spezifischen Stromverbrauchs von der Zulaufmenge dargestellt.

Die höheren Energieverbräuche ergeben sich für trockenere Monate mit geringem Zufluss zur Kläranlage. Daraus kann abgeleitet werden, dass ein großer Teil des Stromverbrauches unabhängig vom Durchsatz ist.

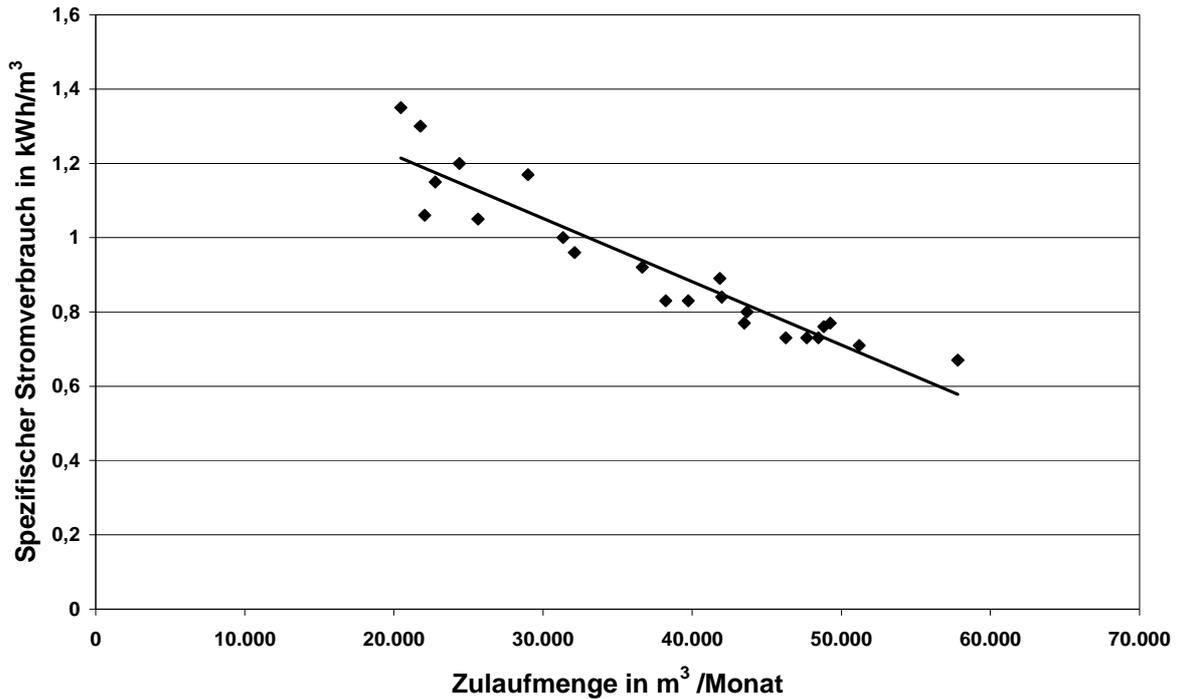


Abb. 4.2.1: Abhängigkeit zwischen Stromverbrauch und Zulaufmenge bei Biomembrananlage (Krampe und Laufer, 2006)

Die ersten Betriebsergebnisse einer als Demonstrationsanlage betriebenen Membranbelebung in Mohnheim belegten die Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs von den zufließenden Abwassermengen. Aufgrund der außergewöhnlich niedrigen Abwassermengen mussten zu Beginn des Pilotprojektes hohe spezifische Verbräuche bilanziert werden. Es konnte dennoch bereits abgeleitet werden, dass bei steigenden Abwassermengen die für die Anlage erwarteten spezifischen Werte von 0,9 bis 1,1 kWh/m<sup>3</sup> erreicht werden können (Wedi und Resch, 2003).

### Nachgeschaltete Membranfiltration

Die Auswertungen der Membranfiltration des Klärwerks Hailfingen ergab monatliche Mittelwerte von 0,10 bis 0,16 kWh/m<sup>3</sup> (Mittelwert 0,13 kWh/m<sup>3</sup>). Diese Praxiswerte liegen unter den Werten einer halbtechnischen Versuchsanlage, deren Betriebskostenabschätzung für zwei Hersteller Energieverbräuche von 0,2 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 0,24 kWh/m<sup>3</sup> ergaben.

### **Zusammenfassende Bewertung**

Der Energieverbrauch der Biomembrananlagen im Bestand liegt mit durchschnittlich 1,3 bis 1,4 kWh/m<sup>3</sup> noch deutlich über dem theoretisch abgeleiteten Wertebereich von 0,7 bis 0,8 kWh/m<sup>3</sup>. Bei einem üblichen Abwasseranfall von 250 l/EW.d ergibt sich daraus ein extrem hoher Einwohner-spezifischer Verbrauch von 120 bis 130 kWh/(EW.a), der mit dem üblichen Verbrauch der biologischen Stufe im Belebungsverfahren von rund 15 bis 20 kWh/(EW.a) zu vergleichen ist. Wegen der starken Korrelation des Energiebedarfs mit dem Durchsatz sind Membrananlagen besonders ungünstig bei hohem spezifischen Abwasseranfall, obwohl sich dort der mengen-spezifische Energieverbrauch (in kWh/m<sup>3</sup>) reduziert.

Als Zielwert wird der Mittelwert aus dem theoretisch abgeleiteten Minimalverbrauch von 0,7 kWh/m<sup>3</sup> und dem bisher besten Ergebnis aus der betrieblichen Praxis von 0,9 kWh/m<sup>3</sup> angesetzt. Daraus ermittelt sich der Wert von 82 kWh/(EW.a). Biomembrananlagen erweisen sich als große Energieverbraucher, die bei durchschnittlichem Betrieb im Vergleich zu konventionellen Verfahren etwa zu einer Verfünffachung des gesamten Energieverbrauchs der Kläranlage führen.

Wesentlich günstiger ist die Situation bei einer nachgeschalteten Membranfiltration (im Ablauf der Nachklärung) mit einem spezifischen Verbrauch von 0,1 bis 0,15 kWh/m<sup>3</sup> (entsprechend 13,7 kWh/(EW.a)). Sofern das wesentliche Ziel der Membranfiltration die Hygienisierung des Ablaufes und der zusätzliche Feststoff- bzw. P-Rückhalt ist, sollte aus energetischer Sicht nur eine nach geschaltete Anlage gewählt werden. Dabei sind Keramikmembranen aus energetischer Sicht vorteilhafter.

Nachdem in den letzten Jahren in NRW und einigen anderen Bundesländern Pilotanlagen zur Erprobung dieser neuen Technik installiert wurden, zeichnet sich derzeit eine gewisse Ernüchterung und Stagnation bei Neubauten ab. Dies ist nicht zuletzt auf die hohen Investitions- und Betriebskosten zurückzuführen, sowie auf einige betriebliche Probleme wie z.B. Verzapfung der Hohlfasermodule.

#### **4.2.2 Hygienisierung von Abwasser**

Die Hygienisierung des Kläranlagenablaufes ist auch im Hinblick auf die neue EU-Richtlinie für Badegewässer ein relevantes Verfahren. Eine bundesweite Regelung für die Hygienisierung von Abwasser ist derzeit allerdings nicht vorgesehen. Die Hy-

gienisierung wird daher auf Einzelfälle beschränkt bleiben. Neben den im obigen Abschnitt bereits beschriebenen Verfahren der Membrantechnologie eignen sich zur Abwasserdesinfektion auch die UV-Bestrahlung, die Ozonung sowie die Chlorung. Aus Umweltschutzgründen wird letzteres Verfahren zur Desinfektion von Kläranlagenabläufen in Deutschland nicht eingesetzt.

Die Verfahren unterscheiden sich auch hinsichtlich ihres Wirkungsgrades. Strittig stellt sich z. B. die Bewertung der UV-Bestrahlung im Hinblick auf die Elimination von Parasiten und Viren dar. Membranverfahren weisen hier nach Untersuchungen des UBA bessere Wirkungsgrade auf. Bei der UV-Bestrahlung und Ozonung ist der Wirkungsgrad auch stark abhängig von der eingesetzten Dosis, der Aufenthaltszeit im Reaktor und der Abwasserqualität. Nachfolgend werden die UV-Bestrahlung und die Ozonung näher beschrieben:

### **UV-Desinfektion**

Die UV-Bestrahlung ist ein physikalisches Desinfektionsverfahren mit dem ausschließlichen Ziel der Keimreduktion des bestrahlten Mediums. Seit Mitte der 70er Jahre wird zur Desinfektion von Abwasser vermehrt die UV-Bestrahlung eingesetzt. In Nordamerika sind einige hundert Anlagen in Betrieb, die biologisch gereinigtes Abwasser mit Durchflüssen von 10 m<sup>3</sup>/h bis 16.000 m<sup>3</sup>/h desinfizieren und auch zunehmend bestehende Chlorungsanlagen ersetzen. Die erste großtechnische UV-Desinfektionsanlage zur Desinfektion eines Kläranlagenablaufs in Deutschland wurde 1987 in Cuxhaven installiert. Drei weitere Anlagen in Cismar, Norden und Wyk auf Föhr folgten, im Rahmen des Sonderprogramms Badegewässer Obere Isar findet seit einigen Jahren eine weitere Verbreitung dieser Technik statt.

Die Wirksamkeit der Strahlung hängt von der Empfindlichkeit der zu inaktivierenden Mikroorganismen ab. Diese wird im Abwasser durch UV-absorbierende Stoffe, Art und Menge der suspendierten Stoffe sowie sonstiger chemisch-physikalischer Eigenschaften des Abwassers vermindert.

Auf der Kläranlage München II Gut Marienhof ist seit Anfang des Jahres 2006 eine UV-Desinfektion in Betrieb, ausreichend detaillierte Auswertungen zum Stromverbrauch liegen daher bislang noch nicht vor. Eine erste Abschätzung ergab einen spezifischen Stromverbrauch von ca. 0,03 kWh/m<sup>3</sup> (Kirchner, 2006). Die Betriebser-

gebnisse des Jahres 2001 der Kläranlage Bad Tölz ergaben für die UV-Desinfektion folgende Zahlen (Grägel, 2003):

- Desinfizierte Abwassermenge: 3.071.539 m<sup>3</sup>/a
- Energieverbrauch: 81.162 kWh/a

Daraus ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch von 0,026 kWh/m<sup>3</sup> (entsprechend 2,4 kWh/(EW.a)), dieser Wert korreliert sehr gut mit den Abschätzungen der Kläranlage München II. Als Toleranzwert wird daher 0,03 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 2,7 kWh/(EW.a) angesetzt.

### **Ozonung**

Die Fähigkeit des Ozons zur Abtötung von Viren und Mikroorganismen und der Entfernung weiterer unerwünschter Stoffe kann u. a. auch zur Aufbereitung von Abwasser genutzt werden. Ozon reagiert wegen seiner starken oxidativen Wirkung mit organischen Reststoffen im Abwasser, entstandene Zwischenprodukte können weiter biologisch abgebaut werden. Der Gehalt an oxidierbaren und damit ozonzehrenden gelösten und ungelösten Wasserinhaltsstoffen hat einen erheblichen Einfluss auf die Desinfektionsleistung. Die Oxidation dieser Stoffe verbraucht soviel Ozon, dass für die Abtötung der Keime nur noch eine Restkonzentration zur Verfügung steht.

Daher können die im Abwasserbereich erforderlichen Mengen das 100 bis 1000fache der für die Desinfektion von Reinwasser notwendigen Ozonkonzentrationen betragen (ATV, 1997). In Deutschland wurden bisher Erfahrungen mit der Ozon-Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser nur mit Versuchs- und Pilotanlagen, teilweise in Kombination mit UV-Bestrahlungsanlagen, gesammelt (z.B. TU Berlin / Klärwerk Ruhleben: PILOTOX-Projekt). Die WEDECO Umwelttechnik GmbH nennt ca. 25 ausgeführte Anlagen mit Durchsätzen von < 100 m<sup>3</sup>/h bis zu 200.000 m<sup>3</sup>/d, die im Wesentlichen in Gebieten mit höheren Temperaturen (Mittelmeerraum) installiert wurden (Krampe und Vetter, 2003).

Die wirtschaftliche Betrachtung der Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe im Rahmen einer aktuellen Dissertation (Schumacher, 2006) ergab in Abhängigkeit verschiedener Reinigungsziele die in Tabelle 4.2.2 dargestellten spezifischen Energieverbräuche. Für die Berechnung wurde auf Basis be-

trieblicher Kennwerte angenommen, dass für die Bereitstellung von 1 kg Ozon aus atmosphärischer Luft ein Energiebedarf von 14,4 bis 33,4 kWh besteht. Das ATV-Merkblatt „Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser“ (ATV, 1998) gibt an, das für die Erzeugung von 1 kg Ozon aus Reinsauerstoff ca. 6 bis 15 kWh Strom benötigt werden. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass das eingesetzte Ozon zu 100% reagiert.

Tab. 4.2.2: Spez. Energieverbrauch in Abhängigkeit des Reinigungsziels (Schumacher, 2006; eigene Berechnungen)

Reinigungsziel	Eingesetzte Menge an Ozon	Spez. Energieverbrauch
Reduktion von Einzelstoffen, die eine hohe Reaktivität gegenüber molekularem Ozon zeigen	6 mg/l	0,086 bis 0,2 kWh/m <sup>3</sup>
Reduktion von Einzelstoffen und Desinfektion	12 mg/l	0,173 bis 0,4 kWh/m <sup>3</sup>
Zusätzlich Röntgenkontrastmittel oxidativ umwandeln *	24 mg/l	0,346 bis 0,8 kWh/m <sup>3</sup>
* Neben Ozon 8 mg/L Wasserstoffperoxid notwendig		

Hinsichtlich der Dosierung, der Reaktionszeit und der anzustrebenden Restkonzentration des Desinfektionsmittels gibt (ATV, 1998) für biologisch gereinigte Abwässer folgende Orientierungsdaten an:

- Dosierung: 5 - 35 g Ozon/m<sup>3</sup> Abwasser
- Reaktionszeit: 5 - 30 min
- Restozongehalt: 0,1 - 1,0 g Ozon/m<sup>3</sup> Abwasser

Auf Basis dieser Orientierungsdaten kann für den spezifischen Energieverbrauch eine Spannbreite von 0,03 kWh/m<sup>3</sup> (Sauerstoff, minimale Dosierung) bis 1,05 kWh/m<sup>3</sup> (atmosphärische Luft, maximale Dosierung) abgeschätzt werden. Für eine effektive Hygienisierung muss umgerechnet mit spezifischen Verbräuchen von 20 bis knapp 100 kWh/(EW.a). (letzteres bei gleichzeitiger Elimination von Arzneimittelrückständen) gerechnet werden, was energetisch ineffizient ist. Da dieses Verfahren außerdem selten eingesetzt wird, kann auf die Angabe von Ziel- und Toleranzwerten verzichtet werden. Auch im Hinblick auf eine bessere Elimination von organischen Spu-

renstoffen (z.B. Arzneimittelrückstände) erscheint aus energetischer Sicht der Einsatz anderer Verfahren wie z.B. Aktivkohlefilterung effizienter.

### 4.2.3 Abluftbehandlung

Die Abluftbehandlung ist regional sehr verbreitet (z.B. auf Kläranlagen in NRW) und gewinnt immer mehr an Bedeutung. Der Stand der Technik wird im DWA-Merkblatt M 204 dargestellt, das zur Zeit gerade überarbeitet wird. Die energierelevanten Vorgaben des Merkblattes zum Luftwechsel (10- bis 12fach pro Stunde) bleiben dabei aber erhalten.

Die wichtigsten Einflussfaktoren für den Energieverbrauch neben dem Luftwechsel sind vor allem die Größe des zu entlüftenden Raumes, klimatische Faktoren und die Art der Abluftbehandlung. Für letzteres sind neben einfachen Kaminen vor allem Biofilter, Aktivkohlefilter und Wäscher im Einsatz. Während bei Kaminen der Gegendruck für die Abluftgebläse und damit der Energieverbrauch minimal ist, können Biofilter im Betrieb (z.B. bei hoher Verdichtung des Filterbetts) starke Gegendrücke aufbauen, die zu entsprechendem Stromverbrauch der Gebläse führen. Aktivkohlefilter und Wäscher liegen im Mittelfeld, wobei beim Wäscher ein zusätzlicher Stromverbrauch durch die Kreislaufführung der Waschflüssigkeit entsteht.

Die Abluftbehandlung betrifft in der Regel die Vorbehandlung (Zulaufpumpwerk, Rechen, Sandfang) und die Schlammbehandlung. Dabei ist entscheidend, ob die Geruchsquellen gut gekapselt sind oder ganze Hallen entlüftet werden müssen. Wird bei großen Räumen der Luftaustausch gemäß Merkblatt voll umgesetzt, kann der Stromverbrauch schnell Größenordnungen von mehreren 10 MWh/a (bei Nennleistungen von 5 bis 10 kW) annehmen. Sinnvoll ist eine Regelung der Entlüftung in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen (Windrichtung, Luftfeuchtigkeit etc.)

Da sich der Energieverbrauch nur schwer auf die Schmutzfracht beziehen lässt, gibt das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ als Richtwerte den Stromverbrauch der Lüftung bezogen auf einen Luftwechsel von 1.000 m<sup>3</sup>/h mit 5 bis 8 kWh/d an. Außerdem werden folgende Stromverbräuche für die Abluftbehandlung genannt:

- Biofilter      2 - 2,5      kWh/1.000 m<sup>3</sup> Abluft
- Wäscher      1,7- 2      kWh/1.000 m<sup>3</sup> Abluft
- Aktivkohle   0,8-0,9      kWh/1.000 m<sup>3</sup> Abluft

Dies entspricht bereits bei einem kleinen Raum von 100 m<sup>3</sup> und einem kontinuierlich betriebenen 10fachen Luftwechsel einem Jahresverbrauch von 10 bis 20 MWh.

Bei einer Feinanalyse einer Kläranlage für 35.000 EW betrug der Stromverbrauch für die zwei Abluftbehandlungsanlagen mit chemischem Wäscher für Rechengebäude und Sandfang bzw. Schlammwässerung knapp 50 MWh/a (1,4 kWh/(EW.a)) und damit 3,7 % des gesamten Stromverbrauchs, obwohl die Anlagen nicht durchliefen. Da sich bei kleineren Kläranlagen die Abluftmengen und die Anlagentechnik nicht proportional zur Schmutzfracht verkleinern lassen, steigt der prozentuale Anteil in den unteren Größenklassen stark an und kann zu einer signifikanten Erhöhung des spezifischen Stromverbrauches führen.

Die Abluftbehandlung ist daher für die Energiebilanz vor allem in den unteren GK 1 bis 3 nicht vernachlässigbar. Aber auch bei großen Kläranlagen kann die Abluftbehandlung zu einem relevanten Stromverbraucher werden, wenn aufgrund der Nähe zur Wohnbebauung in größerem Umfang Becken und Anlagenteile eingehaust und entlüftet werden müssen. Extrembeispiel ist eine Kavernenkläranlage in Südtirol, deren Stollenentlüftung mit 470 MWh/a (rund 4 kWh/(EW.a)) 15 % des Stromverbrauches der Kläranlage verursacht. Der einwohnerspezifische Kennwert kann deshalb aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen in einem Bereich zwischen 0 und etwa 5 kWh/(EW.a) schwanken.

#### **4.2.4 Neuere Ansätze bei der Mess-, Steuer- und Regeltechnik**

##### **Grundsätzliches**

Grundsätzlich ist auf Kläranlagen zu beobachten, dass der Anteil von Mess-, Steuer- und Regelungstechnik kontinuierlich angestiegen ist und durch die stark vereinfachte Datenfernübertragung auch die Überwachung von entlegenen Anlagenteilen über zentrale Schaltwarten üblich ist. Die Fortschritte bei der Protokollierung und Auswertung von Daten in Prozessleitsystemen erlauben selbst in kleinen Anlagen eine wesentlich höhere Transparenz.

Allerdings hatte eine größere Messdichte und starke Automatisierung der Regelungen nicht unbedingt eine höhere Energieeffizienz zur Folge. Da die Regelkreise oft

komplexen Zusammenhängen gehorchen und immer wieder neu auf geänderte Rahmenbedingungen eingestellt werden müssen waren „menschliche Expertensysteme“ in Person der Klärmeister manchmal eher in der Lage, Aggregate zeitnah und empirisch an saisonale oder sonstige Schwankungen der Abwasserqualität und Veränderungen des Anlagenbetriebes anzupassen. Hinzu kommen fehlerhafte Messungen der Sonden, Fehler oder überholte Vorgaben in der Steuerungssoftware die gelegentlich zu unsinnigen Betriebsweisen führen.

Die Chancen heutiger MSR-Technik können daher oft am besten genutzt werden, wenn sie sich auf die Messung weniger, aber aussagekräftiger Parameter und einfach nachvollziehbarer Regelkreise beschränken. Die MSR-Technik sollte nicht zu einer unüberschaubaren Datenflut, sondern zu mehr Transparenz der Prozesse beitragen.

Bei den online-Messungen haben sich immer mehr wartungsfreundliche und kostengünstige Sonden durchgesetzt und die früher üblichen nasschemischen Messstationen mit separater Probenaufbereitung (z.B. mit Ultrafiltration) abgelöst. Dies macht ihren Einsatz auch für kleinere Kläranlagen interessant (s. unten).

Für die Energieoptimierung sind vor allem die Regelung der Belüftung und der internen Kreisläufe wichtig. Für letztere sind die Regelung der internen Rezirkulation über Nitratmessung und die Regelung der Rücklaufschlammführung über Zulaufmenge und/oder Schlammspiegelmessung im Nachklärbecken zu nennen.

### **Regelung der Belüftung**

Da die Belüftung nicht nur das Kernstück der Abwasserbehandlung, sondern in der Regel auch der größte Stromverbraucher ist, gab es hier schon immer die intensivsten Bemühungen, die Regelung der Gebläse oder Oberflächenbelüfter im Hinblick auf Reinigungsleistung und Stromverbrauch zu optimieren. Diese sollen hier nicht im Detail beschrieben werden, zumal sie oft Einzelfall-bezogen sind und pauschale Vergleiche mit anderen Regelstrategien schwierig sind (s. dazu Hinweise im DWA-Merkblatt 268, 2006). Grundsätzlich hat sich klar herausgestellt, dass eine Regelung der Belüftung nach dem Ammoniumgehalt energetisch am günstigsten ist und außerdem auch betriebliche Vorteile bietet.

Während Großanlagen dabei schon seit längerem auf Online-Messtechnik setzen, waren die Investitions- und Wartungskosten für solche Ammonium-Messstationen für kleinere Anlagen (< 10.000 EW) meist zu hoch. Hier haben sich durch die Markteinführung von preiswerteren Ammonium-Messsonden auf Basis ionenselektiver Membranen neue Möglichkeiten ergeben.

Marktübliche (Fuzzy-Logic-)Regler arbeiten entweder mit Nitrat- und Redox-Messungen, für die schon länger günstige Sonden auf dem Markt sind oder in letzter Zeit auch verstärkt mit Ammoniumsonden. Die Signale der Messsonden werden über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder separate Prozessrechner verarbeitet und mit mittels einer patentierten Software in Steuerbefehle für die Belüftung umgewandelt.

Unabhängig von Fuzzy-Logic-Reglern ist der Einsatz von Ammonium-Messsonden aufgrund der einfachen Wartung und Investitionspreisen von unter 5.000 € pro Sonde auch für Kläranlagen unter 10.000 EW interessant. Die Belüftung kann direkt nach dem Ammoniumgehalt im Ablauf der Belebung geregelt werden, sofern redundante Messsysteme vorliegen. Dies kann bei mehreren Belebungsbecken zu erhöhten Kosten führen.

Damit kann aber nicht nur der Stromverbrauch deutlich reduziert, sondern auch die Denitrifikation und die biologische P-Elimination verstärkt werden. Voraussetzung ist, dass die Belüftung abschaltbar ist, d.h. keine Keramikbelüfter eingesetzt werden und eine Beckenumwälzung unabhängig vom Lufteintrag möglich ist.

Der Ersatz einer konventionellen Belüftungsregelung über Sauerstoffsollwert durch eine Regelung nach  $\text{NH}_4$ -Konzentration im Belebungsbecken führt in der Regel zu Stromeinsparungen bei der Belüftung von ca. 5 bis 10 %. Bei Stabilisierungsanlagen kann diese Einsparung durch die verstärkte Denitrifikation noch deutlich höher liegen.

## 4.2.5 Separate Prozesswasserbehandlung

### Prozesswasseranfall

Höher belastetes Prozesswasser fällt im wesentlichen aus der Eindickung und Entwässerung von Klärschlamm nach der Faulung an. Die maschinelle Eindickung von Rohschlamm wird nur selten angewendet und findet hier keine weitere Berücksichtigung. Das Prozesswasser aus der Überschussschlamm-entwässerung ist nur gering belastet.

Die Rückbelastung aus der Eindickung und Entwässerung von Faulschlamm betrifft vor allem die Stickstofffracht und liegt bei ca. 16 - 21 % von  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{zu}}$ . Im Mittel kann eine Rückbelastung von 18 % von ca.  $8 \text{ g}/(\text{EW} \cdot \text{d}) = 1,48 \text{ g NH}_4\text{-N}/(\text{EW} \cdot \text{d}) = 0,54 \text{ kg NH}_4\text{-N}/(\text{EW} \cdot \text{a})$  angenommen werden.

Die Rückbelastung mit Phosphor ist dagegen vernachlässigbar. Bei Kläranlagen mit biologischer Phosphatelimination liegt sie bei max. 5 % von  $\text{P}_{\text{zu}}$ . Bei Anlagen mit chemisch-physikalischer Phosphatelimination geht die Phosphorrückbelastung gegen null.

Zusätzlicher Prozesswasseranfall resultiert außerdem aus folgenden Verfahrensschritten:

- Mitentwässerung von Fremdschlämmen
- Kofermentation
- Desintegration (mechanisch / thermisch / chemisch)
- Klärschlamm-trocknung

### Prozesswasserbehandlung im Hauptstrom

Die Prozesswässer werden meist durch Rückführung in den Zulauf im Hauptstrom mit behandelt. Die Rückbelastung aus kläranlageninternem Prozesswasser hat im Hauptstrom Auswirkungen auf

- Betriebsmittelbedarf
- Belüftung
- Schlammanfall
- Kreislaufwasserführung

Der theoretische Energiebedarf für die Prozesswasserbehandlung im Hauptstrom beträgt ca. 3 kWh/kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  allein für die zusätzliche Belüftung bei der Nitrifikation (bzw. 1,5 kWh/(EW.a) bei einer Rückbelastung von 18 %). In der Praxis ergibt sich für die zusätzliche Stickstoffelimination in der biologischen Stufe sogar ein mittlerer Energiebedarf von 2 bis 3 kWh/(EW.a) (bzw. 4 bis 6 kWh/kg  $\text{N}_{\text{eli}}$ ), der bereits in den Zielwerten für die Standardkläranlage enthalten ist.

Bei der Behandlung der Prozesswässer im Hauptstrom ist die Denitrifikationsleistung üblicherweise der begrenzende Faktor, der zu relativ hoher Kreislaufführung und / oder der Dosierung von externen C-Quellen führt. Überlegungen zur Installation einer separaten Prozesswasserbehandlung sind deshalb relevant u. a. für Kläranlagen, die erhöhte Reinigungsanforderungen einhalten müssen (GK 5:  $\text{N}_{\text{ges}} < 13 \text{ mg/l}$ ) oder Kläranlagen, die von Nassschlammausbringung auf Schlammmentwässerung umstellen müssen. Es ist eine Abwägung zwischen einer Vergrößerung des Belebungsvolumens und einer separaten Prozesswasserbehandlung erforderlich.

### **Separate Prozesswasserbehandlung**

In den letzten Jahren werden für kläranlagenintern anfallende Prozesswässer vermehrt separate Behandlungsanlagen zur Entlastung der Belebungsstufe errichtet. Dafür kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz:

#### 1.) Biologische Verfahren:

- Nitrifikation/Denitrifikation
- Nitritation/Denitritation
- direkte Stickstoffelimination (Deammonifikation)

Dafür werden neben dem klassischen Belebungsverfahren auch SBR und Festbett- oder Wirbelbettverfahren eingesetzt.

#### 2.) Chemisch-thermische Verfahren

- MAP-Fällung
- Dampfstrippung
- Luftstrippung mit saurer Wäsche

Hinsichtlich der Energieeffizienz können die Verfahren differenziert werden in

- Verfahren zur Stickstoffelimination (Überführung in Luftstickstoff) und
- Verfahren, bei denen ein stickstoffhaltiges Produkt entsteht, das als Düngemittel eingesetzt werden kann (→ Energie-Gutschrift)

Die erforderliche Eliminationsleistung der Prozesswasserbehandlung ist abhängig von der Höhe der Rückbelastung und den Anforderungen an die Ablaufwerte bzw. die Eliminationsleistung der Gesamtanlage. Demzufolge können hier keine einwohnerspezifischen Richtwerte angegeben werden.

Die Auswirkungen einer separaten Prozesswasserbehandlung auf die Abwasserbehandlung im Hauptstrom sind i. w.:

- Reduzierung des Sauerstoffbedarfs entsprechend der Frachtreduzierung im Teilstrom
- Reduzierung der Kreislaufwasserführung wg. geringerem Denitrifikationsbedarf
- Ggf. Entfall erforderlicher externer C-Quellen im Hauptstrom

### Biologische Verfahren

Der Stromverbrauch dieser Verfahren bezogen auf die zu eliminierende Stickstofffracht ( $\text{kWh/kg N}_{\text{ei}}$ ) liegt zunächst naturgemäß in gleicher Größenordnung wie der Stromverbrauch der Prozesswasserbehandlung im Hauptstrom. Allerdings kann im Teilstrom durch eine Begrenzung der Stickstoffoxidation auf die Nitrifikation (Nitrit statt Nitrat als Zwischenprodukt) sowohl der Sauerstoffbedarf als auch der Bedarf an C-Quellen für die Denitrifikation reduziert werden. Außerdem können ggf. aufgrund der höheren Temperaturen und Konzentrationen der Prozesswässer kinetische Vorteile genutzt werden (kürzeres Schlammalter, schnellere Denitrifikation etc.). Soll nur die Nitrifikation im Teilstrom erfolgen, ist eine Stabilisierung des pH-Wertes erforderlich, so dass hier erhöhter Betriebsmittelverbrauch entsteht.

Der wesentliche Vorteil der Teilstrombehandlung liegt aber in der Vermeidung von Lastspitzen für die Nitrifikation im Hauptstrom, so dass die biologische Stufe kleiner ausgelegt und sparsamer betrieben werden kann.

Eine weitergehende Einsparung ist durch die so genannte Deammonifikation möglich, bei der Ammonium ohne Umweg über die Nitrifikation direkt in Luftstickstoff umgewandelt wird. Für diesen Prozessschritt ist allerdings der Aufbau einer spezialisierten Biozönose und die strikte Einhaltung bestimmter Milieubedingungen (Temperatur, pH-Wert) erforderlich. Dann kann der spezifische Stromverbrauch auf unter 2 kWh/kg  $N_{\text{eli}}$  verringert werden, was einer Einsparung von etwa 50 bis 70 % im Vergleich zur Behandlung im Hauptstrom entspricht. Dieses Verfahren ist allerdings noch in der Erprobung, sehr instabil und benötigt eine lange Anfahrphase (s. dazu auch Fallbeispiel ARA Strass in Kap. 7.1).

### Chemisch-thermische Verfahren

In der folgenden Tabelle sind Verfahrensparameter für die unterschiedlichen Verfahren der chemisch-thermischen Prozesswasserbehandlung aufgeführt.

Tab. 4.2.3: Vergleich chemisch-physikalische Prozesswasserbehandlung

Verfahren	Energiebedarf	nährstoffhaltiges Produkt	Betriebsmittelbedarf
MAP-Fällung	Strombedarf: 1,6-1,8 kWh/kg $N_{\text{eli}}$	Strombedarf: 1,5-1,7 kWh/m <sup>3</sup>	Magnesium- Ammonium- Phosphat, MAP (100%): 17,5-19 kg/kg $N_{\text{eli}}$
			Magnesiumoxid: 4,8-5,4 kg/kg $N_{\text{eli}}$ , Phosphorsäure,85%: 6,78-8 kg/kg $N_{\text{eli}}$
Dampfstrippung	Strombedarf: 2,9-3,7 kWh/kg $N_{\text{eli}}$ ; Wärmebedarf 42-47 kWh/kg $N_{\text{eli}}$	Strombedarf: 2,8-3,5 kWh/ m <sup>3</sup> Wärmebedarf 40-45 kWh/ m <sup>3</sup>	Ammoniakwasser Natronlauge, 50%: 3,5-4,5 kg/kg $N_{\text{eli}}$
Luftstrippung mit saurer Wäsche	Strombedarf: 1,6-1,9 kWh/kg $N_{\text{eli}}$ ; Wärmebedarf 8,4-10,5 kWh/kg $N_{\text{eli}}$	Strombedarf: 1,5-1,8 kWh/ m <sup>3</sup> Wärmebedarf 8-10 kWh/ m <sup>3</sup>	Ammoniumsulfat Natronlauge, 50%: 3,5-4,5 kg/kg $N_{\text{eli}}$ , Schwefelsäure, 78%: 3,72-3,9 kg/kg $N_{\text{eli}}$

Der Strombedarf der Dampfstrippung ist etwas günstiger als bei der Prozesswasserbehandlung im Hauptstrom. MAP-Fällung und Luftstrippung weisen sogar deutlich niedrigeren Strombedarf auf.

Die Strip-Verfahren sind allerdings mit Wärmebedarf verbunden. Sie sollten deshalb bevorzugt zur Anwendung kommen, wenn Überschusswärme ganzjährig zur Verfügung steht. Dies kann beispielsweise sehr interessant sein in Kombination mit zusätzlichem Gasanfall bei einer Kofermentation.

Der Betriebsmittelbedarf der Verfahren kann hier nicht näher hinsichtlich der Energieeffizienz berücksichtigt werden, da dies über den allgemeinen Betrachtungsrahmen hinausgeht. Im Vorfeld der Entscheidung für ein geeignetes Verfahren sollten diese Punkte jedoch auf jeden Fall Eingang in den Vergleich finden.

### **Bewertung**

Angesichts der hohen Rückbelastung durch stickstoffhaltiges Prozesswasser und dementsprechendem Energiemehrbedarf bei einer Behandlung im Hauptstrom ist eine separate Prozesswasserbehandlung zumindest für größere Kläranlagen ein interessanter Ansatzpunkt für Energieoptimierung. Dies gilt umso mehr, wenn dadurch auch eine zusätzliche Nährstoffrückgewinnung (wie bei MAP-Fällung und Strippung) möglich ist.

Während die Stripp-Verfahren oder die Deammonifikation aufgrund der anspruchsvollen Verfahrenstechnik eher für größere Kläranlagen in Frage kommen, ist eine MAP-Fällung auch bei kleineren Anlagen denkbar. Die Dampfstrippung ist vor allem dann interessant, wenn Abwärme auf möglichst hohem Temperaturniveau zur Verfügung steht.

### 4.3. Neue Techniken der Klärschlammbehandlung

#### 4.3.1 Klärschlamm-Desintegration, Energiebedarf und –gewinn

##### Anwendungsgebiete und Zielsetzung der Desintegration

Unter Klärschlamm-Desintegration versteht man die Zerkleinerung des Schlammes durch Einwirkung physikalischer, chemischer oder biologischer Kräfte. Durch die Einwirkung dieser Kräfte werden die Flockenstruktur des Schlammes aufgelöst und die im Schlamm enthaltenen Zellverbände, aber auch die Zellen selbst zerstört und Zellinhaltsstoffe freigesetzt.

Die Anwendungsgebiete und Zielsetzungen der Desintegration sind sehr unterschiedlich und die erzielten Ergebnisse zum Teil noch fraglich. Haupteinsatzgebiet der Desintegration ist bisher sicherlich die Verbesserung der Faulung, die auch im Hinblick auf die Energieoptimierung am interessantesten ist.

Durch den Zellaufschluss und die Freisetzung organischer Stoffe im Roh- oder Faulschlamm werden die Abbauprozesse im Faulbehälter beschleunigt und/oder intensiviert. Es kann eine Steigerung des Abbaugrades der organischen Substanz verbunden mit einer Erhöhung der Faulgasproduktion erreicht werden. Im folgenden sind Voraussetzungen aufgeführt, die für einen wirtschaftlich vorteilhaften Einsatz der Desintegration zur Optimierung der Faulung vorliegen sollten:

<b>Günstige Voraussetzungen für den Einsatz einer Desintegration zur Verbesserung des Abbaugrades</b>
Kurze Faulzeiten < 20 d
oTS-Gehalt im Faulschlamm > 55 %
geringe spezifische Biogasausbeute < 350 l/kg oTS <sub>zu</sub>
getrennte Führung von Primär- und Überschussschlamm
auf ca. 3 - 6 % eingedickter Überschussschlamm
niedriger Anteil an Grob- und Faserstoffen

Daneben sind folgende Anwendungen der Klärschlamm-Desintegration zu nennen:

- Verbesserung der Denitrifikation durch Bereitstellung zusätzlicher C-Quellen

- Verringerung des Überschussschlammanfalls
- Verbesserung der Schlammeigenschaften (Absetzbarkeit, Schwimmschlamm-bekämpfung, bessere Entwässerbarkeit)

Der Einfluss der Desintegration auf den Kläranlagenbetrieb ist noch nicht endgültig geklärt und von zahlreichen Einflussfaktoren im Einzelfall abhängig. Im Anhang werden verschiedene Auswirkungen genannt und teilweise quantifiziert.

### Verfahren zur Desintegration

Tab. 4.3.1: Übersicht der Verfahren zur Klärschlamm-desintegration

<b>Physikalische Verfahren</b>	- Mechanisch	z.B. Mühlen, Ultraschall, Lysatzentrifuge
	- Thermisch	- Trocknen/Gefrieren - Temperaturbereiche von 80 - 200°C; großtechnisch erprobte Verfahren: Cambi, Pondus (ehemals Limus)
	- Elektrisch	
	- Osmotisch	z.B. Dekompression
<b>Chemische Verfahren</b>	- Hydrolyse	alkalisch oder sauer
	- Oxidation	Ozon, Nassoxidation (z.B. Loprox-Verfahren, Vertech-Verfahren)
	- Detergentien	
<b>Biologische Verfahren</b>	- Enzymatische Lyse	
	- Autolyse	

Das derzeit am häufigsten großtechnisch eingesetzte Verfahren ist die Desintegration mittels **Ultraschall**. Daneben kommt auch die **Lysatzentrifuge** häufiger zum Einsatz, da sie mit vergleichsweise geringen zusätzlichen Investitionskosten verbunden ist, sofern bereits eine Zentrifuge zur maschinellen Überschussschlammindickung auf der Kläranlage installiert ist. Allerdings ist der erreichbare Aufschlussgrad geringer, verglichen mit dem Aufschlussgrad bei Ultraschall-desintegration.

### Energieeffizienz

Als Richtwert für die mechanische Desintegration zur Verbesserung des Faulverhaltens wird ein elektrischer Energiebedarf von 1,4 kWh/(EW\*a) angenommen. Dieser basiert auf der Annahme, dass ein Drittel des auf 4 % eingedickten Überschussschlammes desintegriert werden.

In der folgenden Beispielrechnung (Tab. 4.3.2 entsprechend KA 2003 (50), modifiziert) ist dargestellt, wie sich die Desintegration in Abhängigkeit von der erzielbaren Erhöhung des oTR-Abbaugrades auf die Energiebilanz der Kläranlage auswirkt. Aus der Zusammenstellung wird ersichtlich, dass der Einsatz der Desintegration nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung der Energieeffizienz einer Kläranlage beiträgt.

Tab. 4.3.2: Beispielrechnung zur Energiebilanz der Klärschlamm-desintegration

<b>Erhöhung oTR-Abbaugrad um</b>	<b>5 %</b>	<b>20 %</b>
Energiebedarf Desintegration	1,4 kWh/(EW*a)	1,4 kWh/(EW*a)
Energiebedarf für Belüftung zur Elimination N-Rückbelastung	0,08 kWh/(EW*a)	0,32 kWh/(EW*a)
Energiegewinn aus Gasmehrertrag	- 0,74 kWh/(EW*a)	- 2,98 kWh/(EW*a)
<b>Bilanzrahmen Kläranlage:</b>	<b>+ 0,74 kWh/(EW*a)</b>	<b>- 1,26 kWh/(EW*a)</b>
<b>Strombilanz ohne Berücksichtigung Mindermenge zur Entwässerung</b>		
ausgedrückt in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten, mit 0,682 kg / kWh	+ 0,5 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)	- 0,86 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)
Reduzierung Schlammmenge		
oTR	- 0,4 kg oTR/(EW*a)	- 1,7 kg oTR/(EW*a)
Filterkuchen	- 1,4 kg FK/(EW*a)	- 5,9 kg FK/(EW*a)
Transportaufwand, ausgedrückt in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten mit 0,13 kg/kg TR <sup>1</sup>	- 0,05 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)	- 0,77 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)
Verbrennung, ausgedrückt in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten mit 0,21 kg/kg Filterkuchen	+ 0,29 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)	+ 1,24 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)
<b>Bilanzrahmen incl. Entsorgung:</b>	<b>Erhöhung um</b>	<b>Reduzierung um</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>	<b>+ 0,74 kg CO<sub>2</sub>/(EW*a)</b>	<b>- 0,39 kg CO<sub>2</sub>/(EW*a)</b>

1: einfache Transportentfernung von 250 km

Die Desintegration sollte mindestens energieneutral im Bilanzrahmen Kläranlage erfolgen, sofern sie zur Erhöhung des Abbaugrades in der Faulung eingesetzt wird. Vor Installation einer Desintegration sollten, sofern die Randbedingungen günstig sind (s. oben), Laborversuche und Vor-Ort-Versuche mit einer mobilen Anlage durchgeführt werden. Diese werden mittlerweile von mehreren Herstellern von Desintegrationsanlagen angeboten.

### **Bewertung**

Klärschlamm-desintegration bringt in der Regel (d. h. bei üblicherweise niedrig belasteten Faultürmen und gutem Abbaugrad der oTR) keine entscheidenden Verbesserungen hinsichtlich Energieeffizienz. Der Energiegewinn durch die erhöhte Faulgasproduktion kann sogar überkompensiert werden durch den Strombedarf für den Klärschlamm-Aufschluss und die zusätzliche Rückbelastung der biologischen Stufe. Es ist aber dennoch mit einer gewissen Verbreitung dieses Verfahrens zu rechnen, da in Einzelfällen sonstige Vorteile für ihren Einsatz sprechen (Verringerung Klärschlammmenge, Bekämpfung von Blähschlamm, Sanierung überlasteter Faultürme). Aus energetischer Sicht sollte, wenn überhaupt, nur eingedickter Überschussschlamm desintegriert werden.

### **4.3.2 Kofermentation**

Unter Kofermentation oder Co-Vergärung wird die Mitbehandlung organischer (Abfall-) Stoffe in den Faultürmen kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen verstanden. Prinzipiell stehen dazu freie Behandlungskapazitäten in Faultürmen zur Verfügung, da sich durch die zunehmende maschinelle Voreindickung von Überschussschlamm die Rohschlammmenge deutlich verringert hat. Da Faultürme üblicherweise nach der Aufenthaltszeit (20 Tage) bemessen werden, ergeben sich dadurch die im Kapitel 3 genannten Kapazitätsreserven von durchschnittlich 100 %.

Der zweite zu beachtende Parameter ist die Raumbelastung des Reaktors. Da das mittlere Reaktorvolumen der Faultürme bei etwa 50 l/EW liegt (eigene Umfrage in Hessen, 1997) und der oTS-Anfall bei rund 50 g/EW.d ergeben sich mittlere Raumbelastungen von 1 kg oTS/m<sup>3</sup>.d. Als Richtwert für die zulässige Faulraumbelastung gibt das ATV-Klärschlammhandbuch 5 kg oTS/(m<sup>3</sup>.d) an. Laut MUNLV 2001 sollte eine Raumbelastung von 3 kg oTS/(m<sup>3</sup>.d) nicht überschritten werden. Es werden derzeit aber auch Intensivfaulverfahren untersucht, bei denen eine Erhöhung der

Raumbelastung auf 6 - 12 kg oTS/(m<sup>3</sup>.d) angestrebt wird (Intensivfaulung Fraunhofergesellschaft, Versuche auf KA Waßmannsdorf, Berlin).

Die Raumbelastung dürfte also genauso wie die Aufenthaltszeit in den meisten Fällen nicht limitierend wirkend. Nach einschlägigen Untersuchungen ist durch die Zugabe von externem Substrat in der Regel sogar auch eine Steigerung des Abbaugrades des oTS-Anteils im Klärschlamm möglich.

Allerdings ist bei Kofermentation nicht nur die Faulturnkapazität zu berücksichtigen, sondern auch die Kapazität bzw. Verfügbarkeit von Nebeneinrichtungen, wie z.B.

- Anforderungen an die Anlieferung (Lärm aus zusätzlichem Verkehrsaufkommen, Zufahrtsmöglichkeiten zur Annahmestation)
- Annahmeeinrichtungen, Substratspeicherung
- Entwässerungskapazität
- Faulgasspeicherung und -verwertung (Größe Gasspeicher, Leistung BHKW)

Vor allem aber muss auch die biologische Stufe der Kläranlage Kapazitäten für die zusätzliche Rückbelastung durch die Prozesswässer aus der Entwässerung der Gärreste im Klärschlamm aufweisen, damit eine zusätzliche Belastung der Gewässer vermieden wird.

Aus den betrieblichen Anforderungen leiten sich folgende allgemeine Anforderungen an Substrate zur Kofermentation ab:

- pumpfähig (6 -8 %),
- störstofffrei (keine langen Fasern, Steine etc.)
- bei fetthaltigen Stoffen Temperatur > 20 -25 °C
- Fette emulgierbar in Klärschlamm
- möglichst geringer Gehalt an Stickstoff

Prinzipiell sind Fette wegen des hohen Gasbildungspotenzials als Substrat sehr interessant und beliebt, obwohl sie zur Bildung von Fettkugeln neigen können, die sich an der Oberfläche der Faulbehälter sammeln und zu betrieblichen Problemen führen können.

Anhand der Inhaltsstoffe des Co-Substrates kann überschlägig abgeschätzt werden, mit welcher zusätzlichen Gasproduktion im Faulturm zu rechnen ist (s. Tab. 4.3.3).

Tab. 4.3.3: Zusammensetzung von Biogas und spezifische Gasmengen [Roediger et al., 1990]

	Methan CH <sub>4</sub> [Vol-%]	Kohlendioxid CO <sub>2</sub> [Vol-%]	spezifische Gas- menge [l/kg oTR <sub>abg</sub> ]
Kohlenhydrate	50	50	790
Fette	68	32	1.270
Proteine	71	29	700

Aus seuchenhygienischer Sicht sind folgende Punkte zu prüfen:

- Nach Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG und TierNebV) eingeschränkt (z. B. Schlachtabfälle)?
- Thermische Vorbehandlung nach EU-Vorschrift Nr. 1774/2002 erforderlich?
- ATV-M 365 Hygiene bei der biol. Abfallbehandlung ist zu beachten (In Kürze ersetzt durch neues Merkblatt DWA M 380)
- Regelungen nach BiostoffV und BioAbfV (Klärschlammverordnung)

Das Umweltministerium in Nordrhein-Westfalen hat 2001 in einem Merkblatt wichtige Anforderungen an die Mitbehandlung von Substraten in Faultürmen formuliert, die auch von anderen Bundesländern übernommen wurden. Darin sind auch Faulgasausbeuten für verschiedene Abfälle genannt.

Das Faulverhalten des Co-Substrates sollte jedoch zusätzlich in Voruntersuchungen überprüft werden. Folgende Punkte sollten dabei untersucht werden:

- Anaerobe Stabilisierung des KS-Substrat-Gemisches muss möglich sein
- Keine Hemmung des Faulprozesses
- oTR-Anteil im Substrat > 50 %
- Abbaubarkeit oTR im Faulturm > 50 %
- Methanproduktion durch Substrat mindestens 250 l/kg oTR<sub>zugef.</sub>
- Schwimmdeckenbildung, Schäumen darf nicht auftreten
- Einfluss auf Schwefelwasserstoff- und Siloxankonzentration im Klärgas

Aus der Kofermentation darf zudem keine unzulässige Zusatzbelastung der Kläranlage resultieren. Folgende Punkte sind zu beachten:

- Rückbelastung mit Nährstoffen:  
Nährstoffe im Prozesswasser (CSB / N / P); das Verhältnis C/N im Substrat sollte möglichst hoch sein; zum Vergleich: Mischschlamm ca. 10/1
- Schadstoffe im Prozesswasser
- Geruchsbildung durch Roh-Substrat, Trübwasser, Faulschlamm

Folgende Quereinflüsse sind bei Vorüberlegungen zur Kofermentation zu berücksichtigen:

- Energiebedarf für die Aufbereitung des Co-Substrats
- Erhöhung Klärgasausbeute und damit Stromerzeugung
- Erhöhung O<sub>2</sub>-Bedarf in Belebung für Stickstoffelimination (Rückbelastung); ggf. sogar Zugabe C-Quelle erforderlich
- Erhöhung Schlammmenge
- Mehraufwand Entwässerung (Betrieb, Strom, Polymerbedarf)

### **Energieeffizienz und Einsparpotenzial**

Als allgemeiner Richtwert für die Kofermentation sollte gelten, dass

1. mindestens 50 % der zusätzlich zugeführten organischen Trockenmasse im Faulturm abgebaut und
2. eine zusätzliche Faulgasproduktion durch Substrat von mindestens 0,4 m<sup>3</sup>/kg oTR<sub>zugef</sub> erzielt werden.

Mit diesem Kriterien und den folgenden Annahmen

1. Faulturmvolume bei 50 l/EW und 96 Mio. EW an Anlagen mit Faulung: 4,8 Mio. m<sup>3</sup> Reaktorvolumen,
2. Raumbelastung durch Kofermentation verdoppelt von 1 auf 2 kg oTR/m<sup>3</sup>.d, kann zunächst das theoretische Potenzial der zusätzlichen Faulgaserzeugung abgeschätzt werden mit 1,92 Mio. m<sup>3</sup>/d (+1 x 4,8 Mio. x 0,4). Bei einer vollständigen Verstromung entspräche dies beim derzeitigen Wirkungsgrad von 30 % einer zusätzlichen Stromproduktion von 3,5 GWh/d, bzw. knapp 1.300 GWh/a. Kämen dafür effizientere BHKWs mit durchschnittlich 35 % Wirkungsgrad zum Einsatz, wäre sogar

eine Mehrproduktion von 1.500 GWh/a denkbar und damit fast eine **Verdreifachung** der derzeitigen Erzeugung von 860 GWh/a auf knapp 2.400 GWh/a.

Dieses theoretische Potenzial, das aufgrund des Reaktorvolumens und der verfügbaren Substrate durchaus noch höher angesetzt werden könnte, wird allerdings begrenzt durch die

- Verfügbarkeit sowie hohe Fixkosten für Nebeneinrichtungen zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Substrate, vor allem bei kleineren Kläranlagen
- betriebliche und rechtliche Anforderungen der Kläranlage bzgl. der Klärschlammbehandlung und vor allem
- Anforderungen an eine schadloose Aufbereitung der Gärreste bzw. der Prozessabwässer in der Kläranlage.

Im Gegensatz zu Biogasanlagen, bei denen die Gärreste (= Faulschlamm) meist direkt als Dünger verwertet werden können, erhöht der zusätzliche Faulschlammfall bei der Kofermentation auf Kläranlagen in der Regel die Menge an stark stickstoffhaltigen Prozesswässern aus der Schlammentwässerung. Dies stellt oft eine große Rückbelastung für die Kläranlage dar. Wenn allerdings künftig im Rahmen der verstärkten Nährstoffrückgewinnung ohnehin eine separate Prozesswasserbehandlung z. B. über MAP-Fällung oder Strippung eingerichtet würde, ließe sich das Potenzial der Kofermentation in weit größerem Umfang als bisher erschließen (s. Abschnitt 4.2.5).

Energetisch besonders interessant ist die Kofermentation vor allem dann, wenn Konzentrate bei gewerblichen Indirekteinleitern verstärkt aus dem Abwasserstrom abgetrennt und separat zum Faulurm der Kläranlage gefahren werden. So wurde in einem Fall die Überschuss-Hefe einer Brauerei nicht mehr in den Kanal eingeleitet, sondern separat gesammelt und per Tankwagen zur Kläranlage gefahren. In diesem Fall entfällt zusätzlich der Energieaufwand für die (aerobe) Behandlung dieser Abwasserfracht. Im Übrigen entdecken die Kläranlagenbetreiber angesichts steigender Energiepreise zunehmend diese zusätzliche Einkommensquelle.

Ein großes Hemmnis ist in diesem Zusammenhang die unterschiedliche Vergütung von Strom aus Klärgas (7,67 ct/kWh bis 500 kW) und Biogas (9,9 ct/kWh bis 500 kW),

11,5 ct/kWh bis 150 kW, zzgl. Bonus von 4 bis 6 ct/kWh für NAWARO-Anlagen). Bei einer Kofermentation von Biomasse können derzeit die deutlich höheren Einspeiserlöse für Strom aus Biogas nicht realisiert werden. Die Kofermentation soll durch die neue Abwasserverordnung begünstigt werden. Dabei wäre eine Regelung analog zum neuen Stromvergütungsgesetz in der Schweiz sinnvoll, in dem Bio- und Klärgas gleichgestellt sind.

### **Zusammenfassung**

Die Kofermentation sollte als interessante Option auf jeder Kläranlage geprüft werden. Das Potenzial für die energetische Optimierung der Kläranlage ist hier mit über 1.000 GWh/a am höchsten und oft rentabel zu realisieren. Eine pauschale Vorgabe erscheint aber nicht praktikabel, da es sich um eine Aktivität außerhalb der Abwasserreinigung handelt und die Randbedingungen von Anlage zu Anlage variieren. Ähnlich wie bei Nutzungen von sonstiger regenerativer Energie (Solaranlagen, Windräder etc.) kann es sich nur um eine Eigeninitiative des Anlagenbetreibers handeln.

Problematisch ist vor allem das Fehlen transparenter und bundesweit einheitlicher Vorgaben für die juristische Bewertung von Substraten zur Kofermentation, die sich aus seuchenhygienischer, abfall-, wasser- und immissionsschutzrechtlicher Sicht ergeben. Hier ist sowohl bei Betreibern als auch Behörden eine große Rechtsunsicherheit gegeben, die als gravierendes Hemmnis für eine verstärkte Kofermentation wirkt.

### **4.3.3 Verfahren der Klärschlamm-trocknung**

#### **Grundsätze und Verfahren im Überblick**

Als Vorbehandlungsschritt vor der thermischen Entsorgung des Klärschlammes kann eine Klärschlamm-trocknung positive Effekte aufweisen (geringere Transportaufwendungen, bessere Lagerfähigkeit des Trockengutes). Für den Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken ist, je nach Anlagenkonstellation des Zementwerkes, eine vorhergehende Trocknung erforderlich. Dies gilt z. T. auch für Steinkohlekraftwerke.

Vor einer Trocknung ist üblicherweise eine Entwässerung des Schlammes erforderlich, da der Energiebedarf für die Wasserverdampfung wesentlich höher als der Energiebedarf für die mechanische Schlammwasserabtrennung ist. Desweiteren sollte der Schlamm aerob oder anaerob stabilisiert sein.

Die Verfahren der Klärschlamm-trocknung können folgendermaßen eingeteilt werden:

- Hochtemperaturtrocknung: Hierbei erfolgt die Erwärmung eines Mediums (Luft, Wasser etc.) durch Zuführung von Energie auf Temperaturen über 100°C (bis > 450°C, abhängig von Trocknungsverfahren). Durch die hohe Temperatur des Trocknungsmediums ist hier die Verdampfungsleistung ( $\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{h}$ ) am höchsten. Diese Verfahren sind von den Umgebungsbedingungen (z.B. Lufttemperatur und -feuchtigkeit) unabhängig.
- Kaltluft- / Niedertemperaturtrocknung: Das Trocknungsmedium wird hier auf Temperaturen bis max. 40°C („Kaltluft“) bzw. < 80°C („Niedertemperatur“) erwärmt. Bei ausreichend niedriger relativer Luftfeuchtigkeit erfolgt bei der Kaltlufttrocknung der Austrieb und Abtransport der Schlammfeuchtigkeit i. w. durch den sehr hohen Luftaustausch. Mittlerweile jedoch erfolgt bei diesem Trocknungsverfahren die Trocknung bevorzugt im Umluftbetrieb bei etwas höheren Temperaturen (ca. 60°C bis < 80°C).
- Solare Trocknung: Das Trocknungsmedium bzw. der Schlamm wird lediglich durch solare Einstrahlung erwärmt, gleichzeitig wird ein hoher Luftaustausch gewährleistet. Dieses Verfahren weist die geringste Verdampfungsleistung ( $\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{h}$ ) auf und ist in hohem Maße von den Umgebungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit und -temperatur) abhängig.

Im Anhang sind die einzelnen Trocknungsverfahren ausführlicher beschrieben. Die wichtigsten Punkte im Hinblick auf die Energieeffizienz werden nachfolgend zusammengefasst:

### Energiebedarf der Klärschlamm-trocknungsverfahren

Zur Erwärmung von 1 kg Wasser von 10°C auf 100°C und anschließende Verdampfung werden unabhängig von der eingesetzten Energieform (Erdgas, Erdöl, Sonne) theoretisch

$$(4,19 \text{ kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})\cdot 90 \text{ K} + 2.261 \text{ kJ}/\text{kg})$$

$$2.638 \text{ kJ}/\text{kg} \approx 0,73 \text{ kWh}/\text{kg}$$

an Wärme benötigt. Dies entspricht einem Wärmebedarf von rund 500 kWh pro t entwässertem Klärschlamm (bei Trocknung von 30 auf 95 % TR).

Der tatsächliche Wärmebedarf von Trocknungsanlagen liegt infolge von verfahrensbedingten Energieverlusten höher (je nach Verfahren: 15 - 25 %), so dass von einem Wärmebedarf von 800 - 900 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O (bzw. rund 600 kWh/t entwässerter Klärschlamm) ausgegangen werden kann. Daher sollte die Trocknung bevorzugt am Standort der thermischen Verwertung erfolgen, da dort Abwärme aus dem Verbrennungsprozess für die Trocknung genutzt werden kann. Durch Wärmerückgewinnung aus den Brüden der Abluftbehandlung kann die Wärmebilanz der Klärschlamm-trocknungsanlage verbessert werden.

Daneben benötigen alle Trocknungsanlagen elektrische Energie für Förder- und Mischaggregate, Gebläse, etc. Außerdem verursacht bei Anlagen, in denen Brüden-kondensat aus der Abluft anfällt, die Rückbelastung einen zusätzlichen Energieverbrauch in der Kläranlage. Dieser ist allerdings vernachlässigbar i. V. zum Strombedarf der Trocknung selbst (< 5 %).

### Hochtemperaturtrocknung

Eine Auswertung von Literaturdaten und Richtpreisangeboten zeigt, dass Trockner-systeme im Hochtemperaturbereich unabhängig vom Verfahren einen durchschnittlichen Gesamtenergiebedarf von ca. 1 MWh/t H<sub>2</sub>O aufweisen. In der Regel werden dazu Primärbrennstoffe (Erdöl, Erdgas) zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Davon sind 50 und 150 kWh/t H<sub>2</sub>O elektrische Energie.

### Kaltluft- bzw. Niedertemperaturtrocknung

Die Niedertemperaturtrocknung benötigt niedrigere Vorlauftemperaturen, so dass auch Abwärme aus Blockheizkraftwerken (Vorlauftemperaturen bis max. 90°C) ge-

nutzt werden kann. Somit kann zumindest im Sommer ein Teil der erforderlichen Trocknungswärme durch die Klärgasverwertung im BHKW bereitgestellt werden. Im Winter steht üblicherweise jedoch keine Überschusswärme aus der Klärgasverwertung im BHKW zur Verfügung, so dass dann Primärbrennstoffe (Erdöl, Erdgas) zur Trocknung eingesetzt werden müssen.

In Angeboten von Herstellern wird häufig davon ausgegangen, dass ca. 30% der erforderlichen Trocknungswärme durch Abwärme der Blockheizkraftwerke gedeckt werden kann. Der elektrische Energiebedarf liegt zwischen 50 und 150 kWh/t H<sub>2</sub>O.

### Solare Klärschlamm-trocknung

Die solare Klärschlamm-trocknung gewinnt vor dem Hintergrund der Einsparung primärer Energieträger für die Trocknung von Klärschlamm zunehmend an Bedeutung. Sie kommt vollständig ohne Zufuhr von Primärbrennstoffen aus. Allerdings können hier auch keine definierten End-Trockengehalte erzielt werden. Die Trocknungsleistung im Winter ist deutlich herabgesetzt. Um diesen jahreszeitlich bedingten Effekt zu minimieren, müssten überproportional große Trockenhallen gebaut werden.

Die solare Klärschlamm-trocknung weist auch einen relativ niedrigen elektrischen Energiebedarf auf. Je nach Verfahren und Klimabedingungen liegt er bei ca. 20 - 80 kWh/t H<sub>2</sub>O für Wende- und Transportvorrichtung, Ventilatoren und ggf. Eintragspumpen.

### **Richtwerte für die Klärschlamm-trocknung**

Zum Vergleich mit dem Energieverbrauch der übrigen Anlagenteile auf der Kläranlage wurden die o. g. Werte für den mengen-spezifischen Energiebedarf umgerechnet in einwohnerspezifische Kennwerte unter folgenden Annahmen (s. auch Kap. 2.3):

- Nassschlamm: 3 % TS
- Entwässerung auf 28 % TS
- solare Trocknung auf 75 % TS
- Hoch-/Niedertemperatur-trocknung auf 90 % TS

Tab. 4.3.4: Einwohnerspezifischer Energiebedarf für Klärschlamm-trocknung

	Hochtemperatur-trocknung	Niedertemperatur-trocknung	solare Trocknung, entwässerter Schlamm	solare Trocknung, Nassschlamm
Strombedarf kWh <sub>el</sub> /(EW*a)	3 - 5	4 - 6	ca. 1,4	ca. 7 bzw. 5 <sup>1)</sup>
Wärmebedarf kWh <sub>th</sub> /(EW*a)	ca. 45	42 - 48	--	--

<sup>1)</sup> Bei der Trocknung von Nassschlamm entfällt dafür die Schlamm-entwässerung mit ca. 2 kWh/(EW.a)

### **Bewertung**

Eine Klärschlamm-trocknung auf der Kläranlage führt zu einem Mehrverbrauch an Strom in der Größenordnung von 2 bis 6 kWh/(EW.a) oder ca. 10 bis 15 % des Bedarfs einer Standardkläranlage. Dies gilt auch für solare Klärschlamm-trocknung. Dagegen wird der Wärmebedarf von Kläranlagen bei thermischer Trocknung mit zusätzlich knapp 50 kWh/(EW.a) etwa verdoppelt und kann nicht mehr über die (Ab-) Wärme aus der Faulgasverwertung gedeckt werden. Selbst bei Niedertemperatur-trocknung können nur ca. 30 % des zusätzlichen Wärmebedarfes aus der Abwärme von BHKWs gedeckt werden.

Deshalb ist eine Trocknung am Ort der Verbrennung oder aber die Nutzung von Abwärme aus anderen industriellen Prozessen – soweit verfügbar – sinnvoll, auch wenn dadurch ein erhöhter Transportaufwand für den entwässerten Klärschlamm entsteht. Dies geht klar hervor aus einer Bilanz der CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die verschiedenen Klärschlamm-entsorgungswege (s. Kap. 4.3.5).

### **4.3.4 Klärschlamm-Vererdung**

Als Alternative zu einer Klärschlamm-trocknung ist bei kleineren Kläranlagen auch die Klärschlamm-Vererdung in Schilf-beeten denkbar. Dazu ist keine mechanische Entwässerung des Schlammes erforderlich, so dass dieses Verfahren besonders für Anlagen ohne ein eigenes Entwässerungsaggregat geeignet ist. Dagegen scheint die Vererdung von Faulschlamm problematisch zu sein, weil das ausgasende Methan als Pflanzengift wirkt und in der Regel zu einer starken Hemmung des Schilfwachstums führt.

## **Aufbau und Betrieb einer Klärschlammvererdungsanlage**

Über einer wasserdichten Fläche (z.B. Abdichtung mit Teichfolie) wird eine Filter- und Drainageschicht errichtet, um das anfallende Sickerwasser fassen und ableiten zu können. Über dieser Schicht wird das Pflanzsubstrat aufgebracht. Dabei kommen sowohl Lehm- und Tonboden als auch Sand zum Einsatz. In diesem Pflanzsubstrat werden Schilfpflanzen gesetzt (Zuchtschilf oder standortnaher Schilf, ca. 6 - 7 Pflanzen pro m<sup>2</sup>).

Der Klärschlamm wird mit TS-Gehalten zwischen 1,5 und 5 % TS auf das Schilfbeet gepumpt. Nach 4 bis 8 Jahren Befüllung und einem Jahr Ruhezeit des Beetes wird die Klärschlammmerde aus dem Beet ausgebaut. Aufgrund der erforderlichen, einjährigen Ruhezeit sind demnach mindestens zwei Beete zu errichten.

Bis zum Ausbau des Beetes erfolgt entsprechend der Literaturangaben ein oTS-Abbau von ca. 50 % im Verlauf der Behandlung. Allerdings wird die Output-TS wiederum durch die Wurzeln des Schilfes, die beim Ausräumen des Beetes in der Klärschlammmerde verbleiben, erhöht. Die Wurzeln können ggf. abgesiebt und einer Kompostierung oder anderweitigen Verwertung zugeführt werden.

### **Energiebedarf**

Energie wird ggf. benötigt für

- die Befüllung des Beetes (abhängig von der Lage im Gelände kann die Befüllung im Freispiegel erfolgen, so dass kein Pumpaufwand erforderlich wird),
- das Abpumpen des anfallenden Sickerwassers (entfällt nach wenigen Betriebsjahren)
- sowie für das Ausräumen des Beetes mittels Radlader und ggf. eine Nachsiebung der Klärschlammmerde.

Da letzteres bereits außerhalb der Systemgrenzen der Standardkläranlage liegt (der Abtransport des entwässerten Klärschlammes wird nicht berücksichtigt) und die übrigen Positionen vernachlässigbar klein sind, kann in erster Näherung der Energiebedarf der Klärschlammvererdung gleich null gesetzt werden.

Hinzu kommt, dass auch der Energiebedarf für die Schlamm-Entwässerung entfällt und bei Anlagen mit Faulung die Rückbelastung der Kläranlage mit Prozesswasser stark reduziert wird. In der Gesamt-Bilanz kommt es daher sogar zu einer Einsparung i. V. zur Standardkläranlage in der Größenordnung von 2 bis 3 kWh/(EW.a).

Sofern der hohe Platzbedarf für die Vererdung (zwischen 0,5 und 1 m<sup>2</sup>/EW) vorhanden ist, stellt dieses Verfahren eine interessante Alternative zu den übrigen Behandlungsverfahren dar.

### **4.3.5 Alternativen bei der thermischen Verwertung**

#### **Übersicht der Verfahren**

Zukünftig wird Klärschlamm bevorzugt einer thermischen Behandlungsanlage zugeführt. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Steinkohle- oder Braunkohlekraftwerke
- Zementwerke
- industrielle Feuerungsanlagen
- Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage
- Müllverbrennungsanlagen

Unter dem Aspekt der Einsparung von Primärenergieträgern ist hier insbesondere die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken und industriellen Feuerungsanlagen von Interesse, da Klärschlamm ein regenerativer Energieträger ist.

Derzeit stellt die Mitverbrennung in Stein- und Braunkohlekraftwerken trotz teilweise sehr großer Transportentfernungen in der Regel den kostengünstigsten Entsorgungsweg dar. Die Mitverbrennung in Zementwerken oder industriellen Feuerungsanlagen findet bisher in Deutschland noch nicht in größerem Umfang statt.

Daneben gibt es eine Reihe alternativer Verfahren, z.B.:

- Klärschlammvergasung (Pilotanlage Kläranlage Balingen, s. auch Kap 7; "Schwarze Pumpe")
- Niedertemperaturkonvertierung
- Choren-Verfahren
- Klärschlamm als Zuschlagstoff bei der Asphaltherstellung, für Leichtbeton oder bei der Ziegelherstellung

Diese wurden jedoch nur in Einzelfällen realisiert bzw. sind erst in der Entwicklung und werden auch deshalb hier nicht näher beschrieben, weil eine weitere Marktdurchdringung aufgrund der relativ hohen Investitionskosten nicht absehbar ist.

### **Kohlekraftwerke**

Die Mitverbrennung von entwässertem oder getrocknetem Klärschlamm in Kohlekraftwerken ist mittlerweile Stand der Technik.

Der Klärschlammanteil ist häufig auf einen Prozentsatz von 5 % der Feuerungswärmeleistung begrenzt. Dies hängt sowohl mit feuerungstechnischen Einschränkungen als auch mit Einschränkungen bei der Reststoffverwertung zusammen.

Filterstaub und Asche aus Kohlekraftwerken werden i.d.R. bei der Zementherstellung als Zuschlagstoffe eingesetzt. Die Flugasche wird dem Zementklinker nach dem Brennprozess zugesetzt. Somit erfolgt indirekt auch eine rohstoffliche Verwertung des Klärschlammes.

Die Möglichkeiten des Klärschlammeinsatzes in Kohlekraftwerken werden durch folgende Randbedingungen begrenzt (nach Steier, 2003):

1. Vor allem bei Steinkohlekraftwerken reicht die zur Verfügung stehende Restwärme oft nur zur Trocknung eines Klärschlammanteils von 2 - 3 % der Feuerungswärmeleistung.
2. Bei Mittellastkraftwerken (Haupteinsatzgebiet der Steinkohlekraftwerke) wird oft im Teillastbetrieb gefahren, bei dem ein deutlich niedrigerer Restwärmeanteil für die Klärschlamm-trocknung zur Verfügung steht als bei Vollast.
3. Die technischen und räumlichen Voraussetzungen für eine Klärschlammannahme und - mitverbrennung müssen gegeben sein.
4. Die Verwertung von Asche bzw. Schlacke und REA-Gips darf nicht gefährdet werden.
5. Akzeptanz bei Kraftwerk und Bevölkerung sowie behördliche Genehmigung müssen vorliegen (z.B. wurde im September 2003 die Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk Bexbach, Saarland, vom saarländischen Umweltministerium abgelehnt)
6. Die Restlaufzeit des Kraftwerkes muss die erforderlichen Investitionen absichern.

Derzeit sind die Transportentfernungen zur thermischen Klärschlamm Entsorgung in Kohlekraftwerken je nach Bundesland z.T. sehr hoch (bis > 600 km einfache Fahrtstrecke). Der Transport erfolgt üblicherweise per Lkw, da der Transport über die Schiene nur in Einzelfällen wirtschaftlich realisiert werden kann.

### **Zementwerke**

Zur Herstellung von Zement wird eine Rohmischung aus Kalkstein und Ton unter Verwendung heißer Ofenabgase getrocknet und gleichzeitig gemahlen. Das entstehende Rohmehl wird nach einer Vorwärmstufe in einem Drehrohrofen, mittels einer Kohlestaubflamme bei 1.450°C gesintert. Der Brennstoff wird in der Vorwärmstufe (etwa 20 % des Gesamtbrennstoffes) und in der Hauptbrennstufe eingesetzt.

Die Zementherstellung ist ein sehr energieintensiver Prozess. Im Laufe der letzten 30 Jahre hat die Branche ihren Energieverbrauch um 30 % gesenkt, zum einen durch Wärmerückgewinnung, zum anderen durch verbesserte Feuerungstechnik. Zudem wird ein Teil der erforderlichen Energie durch Sekundärbrennstoffe, z.B. Altöle, Altreifen, Tiermehl, Kunststoffabfälle gedeckt. Auch Rohstoffe werden durch Einsatz von Abfallmaterialien substituiert.

Klärschlamm kann bei der Zementherstellung sowohl den Brennstoffbedarf reduzieren als auch Rohmaterialien substituieren: Der Heizwert von getrocknetem Klärschlamm liegt im Bereich schlechter Braunkohlen. Aufgrund des hohen Anteils an flüchtigen Bestandteilen verfügt Klärschlamm über ein gutes Ausbrandverhalten. Die Klärschlammmasche ersetzt durch ihre Hauptbestandteile Calcium und Silizium Rohmaterialien bei der Klinkerherstellung.

Die Klinkerqualität und die bautechnischen Eigenschaften des Zementes werden durch die Mitverbrennung von max. 5% Klärschlamm-TS nicht wesentlich beeinflusst. Durch die gute Einbindung der im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle in den Klinker ergeben sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Verwendbarkeit des Zementes. Die im Klärschlamm enthaltenen organischen Schadstoffe werden bei den hohen Brennraumtemperaturen zerstört.

Quecksilber wird nicht in den Klinker eingebunden, sondern i. w. mit dem Rauchgas ausgetragen. Problematisch ist, dass die Rauchgasreinigungsanlagen der Zementwerke in der Regel nicht für eine Quecksilberelimination aus dem Rauchgas ausgerüstet sind. Die Installation von Aktivkohlefiltern ist bei den meisten Werken aufgrund der sehr großen Rauchgasströme wirtschaftlich nicht realisierbar. Gängige Praxis ist die Quecksilberabscheidung mit dem Flugstaub und die Beimischung des Flugstaubes zum fertigen Endprodukt.

Umfangreiche Erfahrungen mit dem Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken liegen in der Schweiz vor. Dort kommt nach aktuellem Kenntnisstand nur getrockneter Klärschlamm zum Einsatz. Auch aus Belgien, Niederlanden und Japan liegen Erfahrungen mit dem Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken vor. In Deutschland ist der Klärschlammeinsatz in Zementwerken derzeit in mehreren Anlagen in der Erprobung, vereinzelt liegen bereits Genehmigungen vor.

#### **4.3.6 Neuere Verfahren zur Phosphorrückgewinnung**

##### **Hintergrund**

Ziel der Abwasserbehandlung ist unter anderem, den Phosphor aus dem Abwasser zu entnehmen, um die Eutrophierung der Gewässer zu reduzieren (Phosphorelimination). Dazu wird neben der Simultanfällung mit Eisen- und Aluminiumsalzen auch die biologische P-Elimination eingesetzt, die letztlich alle zu einer vermehrten Bindung des Phosphors im Klärschlamm führen.

Andererseits ist Phosphor ein begrenzter Rohstoff, der vor allem auch in der Landwirtschaft zur Düngung eingesetzt wird. Dazu wird seit langem neben Mineral- und Wirtschaftsdünger auch Klärschlamm eingesetzt. Aufgrund seiner Belastung mit Schwermetallen und organischen Spurenschadstoffen (Arzneimittelrückstände, etc.) zeichnet sich ab, dass Klärschlamm nach einer Übergangszeit nur noch in geringen Mengen landwirtschaftlich verwertet werden wird. Untersuchungen von Fricke und Bidlingmaier (2003) über das Phosphorpotenzial in deutschen organischen Siedlungsabfällen zeigen aber, dass insbesondere die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm sinnvoll ist, da in diesen das größte Phosphorpotenzial der betrachteten Reststoffe vorhanden ist (56.700 t P/a, siehe Abb. 4.3.1).

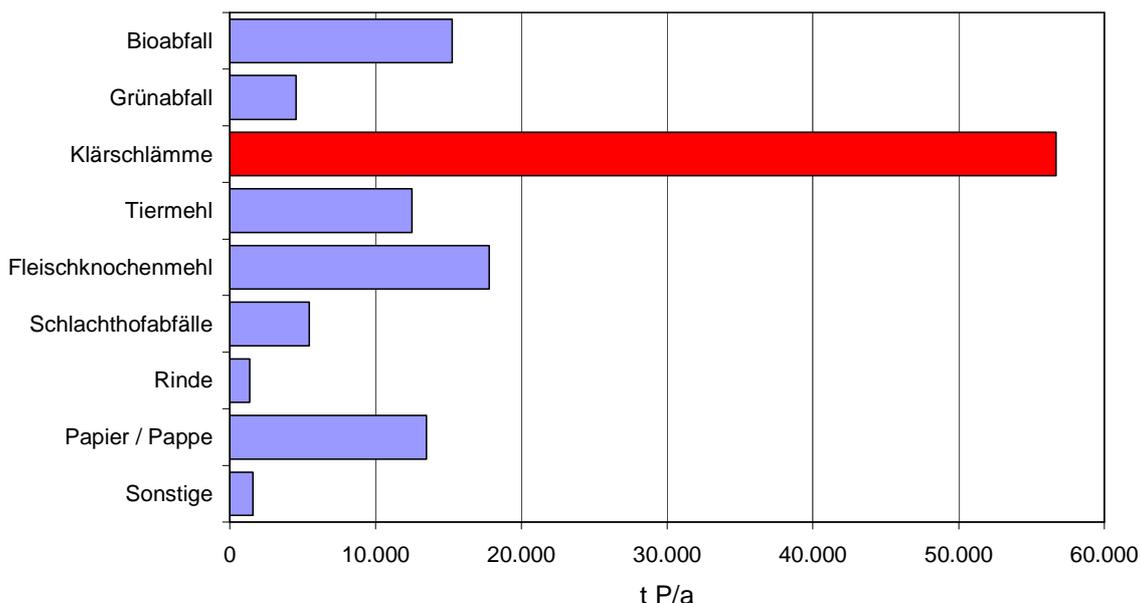


Abb. 4.3.1: Phosphorpotenzial der organischen Siedlungsabfälle in Deutschland (Fricke und Bidlingmaier, 2003)

### **Verfahren zur P-Rückgewinnung**

Ziel einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft sollte es also sein, auch zukünftig die im Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe, insbesondere Phosphor zu verwerten. Dazu werden derzeit Verfahren zur P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm oder direkt aus dem Abwasser entwickelt. Diese Verfahren werden mit den entsprechenden Randbedingungen im Anhang detailliert erläutert. Im wesentlichen werden folgende Wege diskutiert, die in Tabelle 4.3.5 gegenübergestellt werden :

- Phosphatfällung aus Schlammwasser (MAP/ Kalzium-Phosphat)
- Chemisch-thermischer Aufschluss von entwässertem Klärschlamm oder Klärschlammasche

Die bisherigen Untersuchungen zur technologischen und praktischen Anwendung der Phosphorrückgewinnung befinden sich jedoch noch in einem sehr frühen Stadium und sind in halb- oder großtechnischem Maßstab bisher nur an wenigen Stellen realisiert worden.

Zudem kommen alle bisher durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Ergebnis, dass die Rückgewinnungskosten je nach Verfahren noch beim 1,5 bis 10fachen des Weltmarktpreises für Rohphosphor liegen. Demnach ist nicht mit einer schnellen Marktdurchdringung dieser Verfahren zu rechnen.

Tab. 4.3.5: Verfahrensvergleich der P-Rückgewinnung

<u>Rückgewinnung aus der wässrigen Phase</u>	<u>Rückgewinnung aus entwässertem Klärschlamm</u>	<u>Rückgewinnung aus Klärschlammasche</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>aus Ablauf KA: wenig effizient; geringer P-Anteil bei P-Fällung</li> <li>aus Schlammwasser: Rückgewinnungspotenzial: ca. 42% der Kläranlagen-Zulaufkraft</li> </ul> Verfahren: <ul style="list-style-type: none"> <li>Abtrennung mittels Calciumphosphat</li> <li>Fällung / Kristallisation von MAP</li> <li>generell: vorhergehende Abtrennung gelöster Bestandteile (i.w. Schwermetalle) erforderlich</li> </ul> Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>wenig aufwändige Verfahrenstechnik</li> </ul> Nachteile <ul style="list-style-type: none"> <li>gute P-Verfügbarkeit bei Abtrennung mittels Calciumphosphat nur bei sauren Böden (pH &lt; 5,2)</li> </ul>	Voraussetzung: chemisch-thermischer Aufschluss  Rückgewinnungspotenzial: ca. 89% der Kläranlagen-Zulaufkraft Verfahrensschritte: <ol style="list-style-type: none"> <li>Überführung P in wässrige Phase (Zugabe von Säuren oder Laugen)</li> <li>Abtrennung unlöslicher Bestandteile (Organik, Sand)</li> <li>Abtrennung gelöster Bestandteile (i.w. Schwermetalle)</li> </ol> Vorteile <ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Rückgewinnungsgrad bei Säureaufschluss</li> </ul> Nachteile <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie- und Chemikalienbedarf</li> </ul>	Voraussetzung: Klärschlamm-Monoverbrennung  Rückgewinnungspotenzial: ca. 89 % der Kläranlagen-Zulaufkraft Verfahrensschritte: <ol style="list-style-type: none"> <li>Überführung P in wässrige Phase (Zugabe von Säuren oder Laugen)</li> <li>Abtrennung unlöslicher Bestandteile (Organik, Sand)</li> <li>Abtrennung gelöster Bestandteile (i.w. Schwermetalle)</li> </ol> Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>hoher Rückgewinnungsgrad bei Säureaufschluss</li> </ul> Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>aufwendige Eluation der Asche erforderlich</li> <li>bisher nur bei Bio-P-Schlamm anwendbar</li> <li>hoher Energie- und Chemikalienbedarf</li> </ul>

### Energieeffizienz

Im Gegensatz zu den anderen, hier beschriebenen neuen Techniken sind zur Beurteilung der Energieeffizienz von Phosphorrückgewinnung nicht nur der erforderliche Energieeinsatz, sondern auch die Energieeinsparungen relevant, die aus der Substitution von Phosphor aus Rohstofflagerstätten resultieren (ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten).

In Tabelle 4.3.6 wird dazu das Rückgewinnungspotenzial und die zugehörigen CO<sub>2</sub>-Äquivalente dargestellt.

Tab. 4.3.6: Einsparpotenzial bei der P-Rückgewinnung

Rückgewinnungspotenzial	aus der wässrigen Phase	aus Klärschlamm	aus Klärschlamm- asche
Potenzial	42 % von $P_{zu}$	89 % von $P_{zu}$	89 % von $P_{zu}$
rückgewinnbar	0,276 kg/(EW*a)	0,585 kg/(EW*a)	0,585 kg/(EW*a)
Gutschrift in CO <sub>2</sub> - Äquivalenten	0,47 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)	0,99 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)	0,99 kg CO <sub>2</sub> /(EW*a)
Gesamtpotenzial, Randbedingungen	angeschlossene EW an Anlagen mit Fau- lung: ca. 95 Mio.	angeschlossene EW: ca. 126 Mio.;	Monoverbrennungs- anlagen, Kapazität Bestand: 484.000 t TS/a; mit 20 kg TS/EW*a => 24,175 Mio. EW
Gesamtpotenzial	45.000 t CO <sub>2</sub> /a	125.000 t CO <sub>2</sub> /a	23.950 t CO <sub>2</sub> /a

Zum Vergleich bietet sich der Stromverbrauch für die gesamte Abwasserbehandlung von 4.400 GWh/a entsprechend 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten an. Das Einsparpotenzial beträgt demnach maximal 4 %, selbst wenn für die Rückgewinnung selbst **keine** zusätzliche Energie erforderlich wäre. Neben der Gutschrift sind aber auch die Verbrauchswerte der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung zu berücksichtigen:

- Strombedarf, Wärmebedarf, Betriebsmittelbedarf (Säuren, Laugen, etc.)

Derzeit liegen keine ausreichend belastbaren Daten für die Verbrauchswerte vor, da der Fokus der Untersuchungen noch auf der Optimierung der Verfahrenstechnik an sich und noch nicht auf der Ermittlung von realistischen Verbrauchswerten liegt. Außerdem unterscheiden sich die verschiedenen Ansätze ganz erheblich in den Energiekennwerten, ohne dass absehbar wäre, welche Ansätze künftig weiter verfolgt werden. Hier ist weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben, so dass auch auf die Angabe eines Zielwertes verzichtet werden muss. Als Prämisse für die weitere Entwicklung der Verfahren sollte gelten, dass die P-Rückgewinnung mindestens energieneutral unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Bereitstellung von P aus Rohstoffen erfolgt. Im Vergleich zur landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung ergibt sich allerdings eine klare Verschlechterung hinsichtlich der Energieeffizienz.

## 4.4. Neue Techniken der Energieumwandlung

### 4.4.1 Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzellen

#### Beschreibung der Brennstoffzellen

Brennstoffzellen erzeugen elektrischen Strom direkt aus der im Gas enthaltenen chemischen Reaktionsenergie. Damit vermeiden sie im Vergleich zu konventionellen Wärmekraftmaschinen den Umweg der thermischen und mechanischen Energiezustände und erzielen daher höhere elektrische Wirkungsgrade. Allerdings muss betont werden, dass beim elektrischen Wirkungsgrad unterschieden werden muss zwischen dem theoretisch erreichbaren Zellwirkungsgrad und dem realistischen Systemwirkungsgrad einer Faulgasverwertung mit Brennstoffzelle, der derzeit bei 40 bis 55 % liegt.

Brennstoffzellen gibt es in unterschiedlichen Varianten, die sich vor allem im Elektrolyt- und Katalysatormaterial und der Betriebstemperatur (80 bis 1000 °C) unterscheiden. Ein Überblick über die verschiedenen Arten von Brennstoffzellen und deren wichtigste Charakteristika findet sich im Anhang, in dem das Funktionsprinzip von Brennstoffzellen und deren Anwendung für die Klärgasverstromung ausführlich dargestellt ist. Nachfolgend sind die wichtigsten Punkte zusammengefasst.

Wegen der besonderen Eigenschaften von Klärgas (z.B. CO<sub>2</sub>-Gehalt, erforderliche Reformierung von CH<sub>4</sub> zur Bildung von H<sub>2</sub>) und der Randbedingungen in Kläranlagen (Abwärme-Nutzung, etc.) sind nicht alle Brennstoffzellen geeignet (z. B. Niedertemperaturbrennstoffzellen) Praktische Erfahrungen liegen vor für den Einsatz von

- phosphorsauren PAFC-Mitteltemperatursystemen, (seit Mai 2000 im Klärwerk Köln-Rodenkirchen erprobt) und
- Hochtemperaturbrennstoffzellen vom Typ MCFC (Schmelzkarbonatbrennstoffzelle, seit 2005 in Kläranlage Ahlen, NRW eingesetzt, Leistungsgrößen 250 und 300 kW<sub>el</sub> verfügbar).

Für den PAFC-Typ spricht neben der seriellen Verfügbarkeit der Zelle das günstige Temperaturniveau des Abwärmestroms, welcher direkt zur Versorgung des Klärwerks mit thermischer Energie genutzt werden kann. Reinigungseinrichtungen zur

Entfernung von CO<sub>2</sub> aus dem Brenngas entfallen. Ungünstig ist dagegen das zur wirtschaftlichen Reformierung des Klärgases mindestens notwendige Temperaturniveau von etwa 400-600 °C, das weit oberhalb der Betriebstemperatur von 200 °C liegt, wodurch ein zusätzlicher Wärmekreislauf erforderlich wird. Ein großer Nachteil der PAFC ist der für stationäre Brennstoffzellen relativ geringe elektrische Gesamtwirkungsgrad von höchstens 40 %.

Bei der MCFC ist CO<sub>2</sub> sogar essentielle Komponente des Zellstoffwechsels, so dass eine entsprechende Reinigungsstufe ebenfalls nicht erforderlich ist. Wegen der hohen Betriebstemperaturen (MCFC: ca. 650 °C) ist die interne Reformierung des Klärgases möglich. Ungünstig ist das für eine Nutzung innerhalb der Kläranlage zu hohe Temperaturniveau der Abluft. Dagegen können für den elektrischen Gesamtwirkungsgrad im Klärgasbetrieb Werte zwischen 40 und 55 % erwartet werden.

### **Vergleich der Brennstoffzellen mit BHKWs**

Brennstoffzellen unterscheiden sich von BHKWs vor allem durch

- deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrad von 40 bis 55 %,
- nahezu konstanten Wirkungsgrad bei 40 bis 100 % Nennleistung,
- bessere Emissionswerte in der Abluft,
- erforderliche Energiezufuhr für Anfahrprozess (Stand-by-Betrieb ungünstig),
- höhere Anforderungen an Gasqualität,
- höhere sicherheitstechnische Anforderungen (Präsenz von Wasserstoff!).

Entscheidend dürften aber für den weiteren Einsatz in Kläranlagen die spezifischen Investitionskosten für Brennstoffzellen (in €/kW) sein, die auf absehbare Zeit noch bei einem vielfachen von denen konventioneller BHKWs liegen. Hinzu kommt vor allem bei kleineren Anlagen, dass der Zugewinn an Strom mit einem entsprechenden Verlust an verfügbarer Wärme erkauft wird, der über längere Strecken im Jahr zu einem erhöhten Bedarf an Heizöl / Erdgas führt.

Angesichts der zusätzlichen Risiken im Betrieb ist daher ihre Wirtschaftlichkeit ohne besondere Fördermaßnahmen nicht gegeben. Außerdem zeigen neuere Entwicklungen bei Dieselmotoren für BHKWs, dass eine Steigerung des Wirkungsgrades auf

40 % auch bei Leistungsklassen von 200 bis 300 kW bereits möglich ist (s. Fallbeispiel Kap. 7 und Kap 4.4.2). Dadurch verringert sich der Vorteil von Brennstoffzellen weiter.

#### 4.4.2 Neue Trends bei sonstigen Verstromungsanlagen

##### Überblick

Seit kurzer Zeit werden auch für die Faulgasverstromung technische Alternativen zu den üblichen Gas-Otto- oder Dieselmotoren angeboten. Vor allem für kleinere Anlagen (Leistungsklasse 10 bis 100 kW) werden Stirlingmotoren und Mikroturbinen angeboten, die sich vor allem durch einen geringeren Wartungsaufwand auszeichnen. Dadurch weisen diese Aggregate trotz höherer Anschaffungskosten für kleinere Kläranlagen betriebliche und Kostenvorteile auf. Diese werden unten kurz beschrieben. Eine ausführlichere Darstellung der Technik ist im Anhang beigefügt.

Am oberen Ende des Größenspektrums werden für Kläranlagen ab etwa 1 Million EW die konventionellen Kraftwerkstechniken wie Gas- und Dampfturbinen (GuD-Technik) interessant, zumal im Zusammenspiel mit der Klärschlammverbrennung weiteres Optimierungspotenzial besteht. Z. B. kann bei einer Mitverbrennung von Reststoffen wie Rechengut die damit gewonnene Energie in den GuD-Prozess eingeschleust werden. Diese Technik wird z.B. im Klärwerk Hamburg Köhlbrandhöft erfolgreich mit sehr hohem Wirkungsgrad eingesetzt (Exegetischer Wirkungsgrad > 40 %, elektrische Leistung > 5 MW).

Der früher noch häufiger eingesetzte Direktantrieb von Gebläsen mit Faulgasbetriebenen Motoren ist kaum noch verbreitet und wird hier nicht betrachtet.

Interessant sind dagegen neuere Entwicklungen bei der Motorentechnik. Exemplarisch sollen zwei Beispiele für Wirkungsgradsteigerungen genannt werden:

1. MAN B&W Diesel hat einen neuen Gas-Otto-Motor mit einem neuen Einspritz-Verfahren, dem so genannten Performance Gas Injection, PGI entwickelt, das ohne Zündkerzen auskommt. Die Neuentwicklung ermöglicht Wirkungsgrade von über 46 % bei niedrigen  $\text{NO}_x$ -Emissionen von unter  $250 \text{ mg/m}_N^3$ .
2. GE Jenbacher konnte durch den Einsatz eines Turboladers und der so genannten Miller-Steuerzeiten für die Taktung eines Magergemischmotors eine

höhere Komprimierung (CR: 16,3) erreichen und damit den elektrischen Wirkungsgrad bei einer elektrischen Leistung von 330 kW auf 39 % steigern. Diese Maschine wird auf der ARA Strass bereits unter Betriebsbedingungen eingesetzt.

### **Mikroturbinen**

Seit einigen Jahren werden auf dem europäischen Markt Mikro-Gasturbinen angeboten, welche im Gegensatz zu den herkömmlichen Gasturbinen kleinere Leistungsbe- reiche mit einer elektrischen Leistung von 30 bis ca. 300 kW abdecken. In Deutsch- land werden bisher vor allem Mikroturbinen der Firma Capstone Turbine Corp. ein- gesetzt mit einer elektrischen Leistung von 30 kW bzw. 60 kW.

In Gasturbinen wird die aus der Umgebung angesaugte Luft im Verdichter kompri- miert und anschließend einer Brennkammer zugeführt, in der nach Vermischung mit dem Brenngas die Verbrennungsreaktion stattfindet. Das hierbei entstehende Rauchgas wird in der Turbine entspannt. Die Turbine treibt einerseits den Verdichter und andererseits den für die Stromerzeugung notwendigen Generator an.

Die Hauptbauteile von Gasturbinen sind Verdichter, Brennkammer und Turbine. Bei den Mikroturbinen kommt als zusätzliches Bauteil der Rekuperator hinzu, der über eine Vorerwärmung der Verbrennungsluft eine deutliche Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades ermöglicht (von ca. 15 % auf knapp 30%). Die elektronische Fre- quenzumformung garantiert praktisch gleich bleibende Wirkungsgrade bei unter- schiedlichen Lastzuständen. Mikroturbinen benötigen aber ein Vordruck im Faulgas von 3-4 bar. Der Stromverbrauch des erforderlichen Gas-Kompressors beträgt bei kleinen Mikroturbinen bis zu 10% der Stromerzeugung, bei größeren sinkt dieser An- teil auf etwa 5-8%.

In Bezug auf den thermischen Wirkungsgrad ist zu berücksichtigen, dass die Abwär- me bei einer Mikroturbine auf einem höheren Temperaturniveau anfällt als bei BHKWs mit Kolbenmotoren. Je nach Ausführung der Anlage kann die Menge der abgegebenen Prozesswärme bei Bedarf auf Kosten des elektrischen Wirkungsgra- des erhöht werden, indem der Rekuperator weggeschaltet wird. Dies ermöglicht eine sehr gute Anpassung an variablem Wärmebedarf. Diese Flexibilität in Bezug auf die

Anpassung an den vorhandenen Wärmebedarf kann in bestimmten Branchen für den Einsatz einer Mikroturbine sprechen.

Weltweit gesehen liegt das wichtigste Einsatzgebiet zur Zeit noch bei der Deponiegas-Verstromung, weil die Mikroturbinen auch bei einem relativ niedrigen Methangehalt von unter 40% noch einwandfrei funktionieren (mehrere Tausend Anlagen in den USA im Einsatz). Dagegen haben Mikroturbinen in anderen Anwendungsbereichen bisher noch keinen wirklichen Durchbruch erzielt.

Der Einsatz von Mikroturbinen ist zur Zeit noch dadurch gebremst, dass die spezifischen Investitionskosten mit ca. 2.000 bis 3.000 €/kW (ohne Peripherie) noch deutlich höher liegen als bei konventionellen Blockheizkraftwerken gleicher Größe (ca. 1.500 €/kW). Es ist jedoch zu erwarten, dass diese Kosten in den nächsten Jahren noch deutlich sinken werden, und dass die Mikroturbinen dann auf Grund der einfachen und robusten Konstruktion und den im Vergleich zu Kolbenmotoren deutlich niedrigeren Wartungskosten zunehmend neue Anwendungsgebiete erschließen werden.

Durch die Verwendung von Luftlagern kann auch bei Mikroturbinen der kleinsten Baugrößen auf den Einsatz von Schmierstoffen vollständig verzichtet werden. Die meisten Hersteller geben Wartungsintervalle von ca. 8.000 Betriebsstunden für Luftfilter, Brennstofffilter sowie für die Thermoelemente im Turbinenabgas an. Dies entspricht einem kompletten Betriebsjahr bei Einsatz rund um die Uhr. Für Zündung und Brennstoffeinspritzung werden sogar 16.000 Stunden Wartungsintervall angegeben. Im Vergleich hierzu sind die Wartungsintervalle für BHKWs mit Kolbenmotoren deutlich kürzer. Die Kosten für Vollwartungsverträge, welche von den BHKW-Anbietern selber oder von spezialisierten Wartungsfirmen angeboten werden unterscheiden sich dementsprechend: In Deutschland sind bei den kleineren Baugrößen bis 100 kW bei Kolbenmotoren 2-3 ct/kWh marktüblich, bei der Firma Capstone Turbine Corp liegen die Wartungskosten bei 1 ct/kWh.

Weitere Vorteile sind

- höhere Gesamtlebensdauer
- niedriger NO<sub>x</sub> Emission
- leise, keine niederfrequenten Schallemissionen, hohe Laufruhe

## **Bewertung**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Mikroturbinen im Grunde nur dort sinnvoll eingesetzt werden können, wo ihre Vorteile im Vergleich zu konventionellen BHKWs eine wichtige Rolle spielen, also die Verwertbarkeit von schlechteren Gasqualitäten, der bessere Wirkungsgrad im Teillastbetrieb sowie die Flexibilität bei der Anpassung an den Wärmebedarf. Diese Vorteile spielen in der Abwasserentsorgung jedoch nur eine sehr untergeordnete Rolle. Hier können Mikroturbinen zukünftig nur dann einen höheren Marktanteil erreichen, wenn die niedrigeren Wartungskosten und zukünftige sinkende Investitionskosten in Kombination mit einer höheren Lebensdauer den deutlich niedrigeren Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung kompensieren können. Aus energetischer Sicht sind sie nicht interessant.

## **Stirlingmotoren**

Beim Stirlingmotor wird Wärmeenergie direkt in mechanische Arbeit umgesetzt. Diese Wärmeenergie wird dem Arbeitsgas (z.B. Helium) von außen über einen Wärmetauscher zugeführt. Das Arbeitsgas wird zwischen zwei Zylindern hin- und her geschoben, wobei es bei niedriger Temperatur komprimiert wird und bei hoher Temperatur expandiert. Es findet also nicht wie beim Benzin- oder Dieselmotor eine "innere" Verbrennung von Kraftstoffen statt, sondern es können beliebige Wärmequellen eingesetzt werden z.B. Solarenergie, Wärme aus der Verbrennung von Deponiegas und eben auch von Klärgas.

Bisher werden Stirlingmotoren nur von wenigen Herstellern in Serie gefertigt. Die elektrische Leistung dieser Serienmodule liegt zwischen 1 und 10 kW, da die Module i. w. für den Einsatz in Haushalten oder kleineren Wohnkomplexen gedacht sind.

Für die Anwendung mit Klärgas ist uns nur ein Hersteller bekannt (Fa. Solo), elektrische Leistung 2 bis 9 kW<sub>el</sub>, einstellbar. Die Serienfertigung eines Stirlingmotors für Biogas mit einer elektrischen Leistung von 50 kW ist zwischenzeitlich eingestellt.

Der Stirlingmotor weist im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren oder Dieselmotoren schlechtere elektrische Wirkungsgrade auf. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 23 % bei kleinen Modulen.

Als Vorteile der Stirlingmotoren sind aufzuführen:

- Durch die geschlossene Bauweise (Verbrennungsrückstände können nicht in das Motorinnere gelangen) sind die Wartungsintervalle mit über 5.000 Stunden sehr lang, damit reduzieren sich die Betriebskosten.
- Die Schadstoffemissionen von Stirling-Brennern entsprechen den Werten moderner Gasbrennwert-Technik und liegen deutlich unter denjenigen üblicher Gas-Ottomotoren im Magerbetrieb.

### **ORC-Anlagen**

Durch Installation einer ORC-(**O**rganic-**R**ankine-**C**ycle)-Anlage kann ein Teil der Abwärme aus einem BHKW zur weitergehenden Stromerzeugung genutzt werden. Dabei wird die Abwärme aus dem Abgaswärmetauscher (ca. 40 % der gesamten nutzbaren Abwärme) für die ORC-Anlage ausgekoppelt. Auf diese Weise kann der Wärmeüberschuss im Sommer genutzt werden.

#### Funktionsprinzip von ORC-Anlagen:

Mittels der aus dem Abgasstrom ausgekoppelten Abwärme wird in einem Dampferzeuger ein Druckgas erzeugt. Im Dampferzeuger wird dabei die Vorwärmung des Kreislaufmediums, dessen vollständige Verdampfung und Überhitzung realisiert. Das erzeugte Druckgas wird in einer Entspannungsmaschine wieder entspannt und in eine Drehbewegung umgewandelt. Diese Drehbewegung kann entweder für den direkten Antrieb von Arbeitsmaschinen oder eines Generators genutzt werden. Der entspannte Dampf wird anschließend in einem Kondensator verflüssigt. Diese Flüssigkeit wird mittels einer Speisewasserpumpe in den Verdampfer zurückgepumpt.

Der elektrische Wirkungsgrad von ORC-Anlagen hängt von der Temperatur der Wärmequelle sowie des Rückkühlmediums ab. Verglichen mit der direkten Energieerzeugung aus Klärgas ist er vergleichsweise gering (ca. 10 bis 20 %, bezogen auf die zur Verfügung stehende Wärme). Allerdings erhöht er den elektrischen Gesamtwirkungsgrad der BHKW-Anlage um überschlägig 5 %. Der thermische Wirkungsgrad liegt dann jedoch nur noch bei ca. 39 %.

ORC-Anlagen wurden bisher eingesetzt in Holzfeuerungsanlagen und Biogasanlagen, aber auch in Zementwerken. Auf Kläranlagen sind ORC-Anlagen bislang nicht zum Einsatz gekommen.

### **Zusammenfassende Bewertung**

Die Verwertung von Faulgas über Mikroturbinen oder Stirlingmotoren bietet zwar im Vergleich zu konventionellen BHKWs Vorteile hinsichtlich Wartungskosten, weist aber schlechtere Wirkungsgrade auf (~ 23 % für Stirlingmotoren, ~ 25 % für Mikroturbine). Beide Typen werden als Serienprodukte nur mit sehr kleinen Leistungen (< 50 kW) hergestellt, die für einen Großteil der Kläranlagen nicht relevant sind.

Bei sehr großen Anlagen der Megawattklasse können durch Einsatz der GuD-Technik anstelle der konventionellen BHKWs deutlich höhere Wirkungsgrade bis über 40 % erzielt werden.

Bei Kläranlagen der GK 5 könnte auch der Einsatz von ORC-Anlagen in Verbindung mit konventionellen BHKWs interessant sein, vor allem wenn durch Kofermentation über längere Zeiträume ein Wärmeüberschuss bei der Faulgasverstromung entsteht.

#### **4.4.3 Einsatz von energieeffizienten Antrieben**

In Kläranlagen wird der Stromverbrauch fast nur durch Elektromotoren verursacht, deren Wirkungsgrade vor allem bei geringer Nennleistung erhebliche Streubreiten aufweisen. Bereits 1992 wurde in den USA durch den Energy Conservation Policy Act, EPACT, die Einführung von Motoren mit einem Mindestwirkungsgrad gesetzlich festgeschrieben (sog. EPACT-Motoren). Die Generaldirektion Energie der europäischen Kommission hat dann Ende der Neunziger Jahre mit dem Sektorkomitee für elektrische Antriebsenergie CEMEP als Industrieverband eine freiwillige Vereinbarung über die Kennzeichnung und Markteinführung energieeffizienter Motoren getroffen, die für zwei- und vierpolige Drehstrommotoren der Leistungsklasse 1 bis 100 kW gilt. Dazu wurde eine Klassifizierung aller Motoren in die drei Effizienzklassen EFF 1 (sehr gut) bis EFF 3 (bisheriger Standard) gemäß ihres elektrischen Wirkungsgrades vorgenommen (s. Abb. 4.4.1). Die Industrie hat sich außerdem verpflichtet, bis 2003 mindestens 50 % der Motoren der EFF 3-Klasse vom Markt zu nehmen.

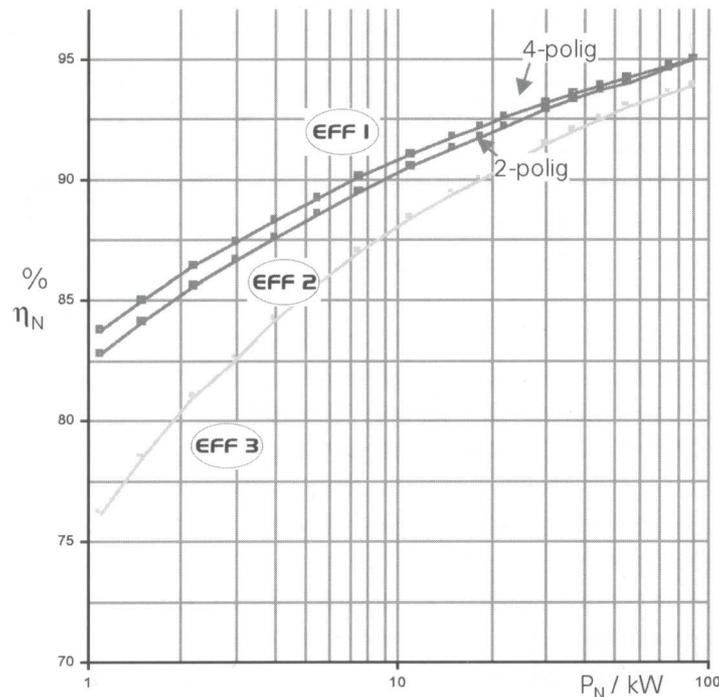


Abb. 4.4.1 Wirkungsgradkennzeichnung von Drehstrommotoren (ZVEI,1999)

Bei den auf Kläranlagen häufigen Baugrößen unter 50 kW sind die Wirkungsgradunterschiede besonders ausgeprägt und können leicht bis zu 5 %-Punkte betragen. Der bessere Wirkungsgrad macht sich nicht nur bei der Stromeinsparung bemerkbar, sondern führt auch zu einer geringeren Erwärmung (die Umwandlungsverluste werden um ca. 40 % verringert) und damit zu einer höheren Lebensdauer der Aggregate ohne dass die Funktion in irgendeiner Weise eingeschränkt wäre.

Betriebswirtschaftlich gesehen, machen die Energiekosten rund 95 % der Lebenszykluskosten eines Motors aus, so dass sich ein ca. 10 % höherer Kaufpreis von EFF 1-Motoren vor allem bei hohen Laufleistungen (>5.000 h/a) innerhalb weniger Monate amortisiert hat. Das Einsparpotenzial von rund 3 bis 5 % des gesamten Stromverbrauches ist damit sogar hoch rentabel.

Aber trotz durchgängiger Verfügbarkeit bei namhaften Motorenherstellern (z.B. Siemens, Schoch) ist der Einsatz der energieeffizienten EFF 1-Motoren bis heute nur bei sehr wenigen Lieferanten von Pumpen und Gebläsen Standard. Grund dafür ist die sehr kurzsichtige Betrachtung der reinen Investitionskosten bei Ausschreibungen, die regelmäßig dazu führt, dass Preisvorteile durch minderwertige Motoren genutzt werden. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass selbst bei einer expliziten Forde-

rung von EFF 1-Standard in Ausschreibungen die Umsetzung schwierig bis unmöglich war, da preiswerte Standardpumpen nur teilweise und nach mehrmaligem Nachfragen sowie mit erheblichen Verzögerungen bei der Lieferzeit mit EFF 1-Motoren ausgerüstet werden konnten. Hier wäre eine gesetzliche Regelung oder eine Verbändevereinbarung über den standardmäßigen Einsatz von EFF-1-Motoren sinnvoll.

## 4.5. Szenarien für ausgewählte Trends der Abwasserbehandlung

### 4.5.1 Bewertung der Relevanz neuer Techniken und Trends

Im Hinblick auf den Energieverbrauch muss man unterscheiden zwischen

- der Einführung oder zunehmenden Verbreitung neuer (additiver) Techniken und Verfahrensschritte zur Verbesserung der Reinigungsleistung die tendenziell zu einem Mehrverbrauch an Energie führen und
- Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bzw. zur vermehrten Energieerzeugung.

Zu Ersteren gehören vor allem

- die zunehmende Filtration und Hygienisierung des Kläranlagenablaufs
- die Einführung der Biomembrananlagen,
- die Abluftbehandlung,
- die weitergehende Klärschlammbehandlung mit Trocknung und thermischer Verwertung, sowie
- die verstärkte Nährstoffrückgewinnung

Die Auswirkungen der stark diskutierten Verfahren zur P-Rückgewinnung auf den Stromverbrauch lassen sich derzeit noch nicht seriös abschätzen, da sowohl über den – stark unterschiedlichen - Stromverbrauch der einzelnen Verfahren als auch über deren künftigen Verbreitungsgrad nur spekuliert werden kann. Auf die Erstellung von Szenarien für diesen Punkt wurde daher verzichtet.

Der mögliche Mehrverbrauch für alle Kläranlagen in Deutschland wird im Kap. 4.5.2 für die übrigen Techniken in Szenarien quantifiziert. Grundlage dafür sind die im Kapitel 3.3 hergeleiteten Daten zum Kläranlagenbestand und den derzeitigen Verbrauchswerten, sowie die Bewertung der neuen Techniken in den Abschnitten 4.2 und 4.3.

Für die weitergehende Klärschlammbehandlung und -entsorgung wird wegen der genannten methodischen Schwierigkeiten lediglich der zusätzliche Stromverbrauch für eine Trocknung des Klärschlammes auf Kläranlagen bundesweit hochgerechnet.

Im Kap. 4.5.3 wird aber die spezifische Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz verschiedener Behandlungspfade unter Berücksichtigung der erforderlichen Transporte und externen Gutschriften gegenübergestellt, wobei bewusst Systemgrenzen neu definiert wurden. Daraus werden zum einen Empfehlungen für eine energieeffiziente Entsorgung abgeleitet und zum anderen in einer Vergleichsrechnung der Unterschied bei der Energieeffizienz (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) für ein günstiges und ein ungünstiges Szenario ermittelt.

Im Kap. 4.5.4 werden dann die Auswirkungen von Maßnahmen zur Energieoptimierung vorgestellt, die zum einen die Stromeinsparung, aber auch die verbesserte Faulgasverwertung betreffen und es wird deren Auswirkung auf die Energiebilanz bundesweit quantifiziert. Entsprechend der in Kap 3.4 herausgearbeiteten Schwerpunkte betreffen die Maßnahmen zur Stromeinsparungen vor allem

- die Effizienz der Belüftung,
- die Konzeption und Betriebsweise von Pumpwerken, sowie
- eine Abschätzung der Zielerreichung mit dem Zielwert 18 kWh/(EW.a)

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Eigenerzeugung von Energie betreffen vor allem

- die Erhöhung des Anteils der Faulgasverstromung,
- die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades von BHKWs,
- die Erhöhung des Faulgasanfalls (z.B. durch Kofermentation oder Klärschlammdeintegration),
- sowie einen erhöhten Anteil der Anlagen mit Faulung zur Klärschlammstabilisierung in GK 4

Bei allen Szenarien wird unterstellt, dass sich die Zahl der Kläranlagen und die Zahl der angeschlossenen Einwohnerwerte nicht verändert. Tatsächlich ist in den letzten Jahren sowohl die Zahl der Kläranlagen als auch die Zahl angeschlossener Einwohner leicht rückläufig: Im DWA-Leistungsvergleich wurde für 2005 eine Ausbaupazität von 149 Mio. EW genannt i. V. zu 157 Mio. EW in 2001. Dies ist vor allem bedingt durch Schließung kleiner Kläranlagen (Anschluss der Ortsteile an größere Kläranlagen) und einen Rückgang der industriellen Schmutzfracht bei etwa stabiler Bevölkerungszahl.

Allerdings wirkt sich dieser leichte Rückgang (noch) nicht signifikant auf die Struktur der Abwasserentsorgung aus, da die für die Energiebilanz vor allem relevanten Kläranlagen in GK 4 und 5 kaum von den Veränderungen betroffen sind. Auch der Anschluss der bisher noch nicht an die öffentliche Kanalisation angeschlossenen Einwohner (ca. 3 bis 5 Mio. EW) bzw. die Nachrüstung der entsprechenden Hausanschlüsse mit Hauskläranlagen wird sich in der Energiebilanz nicht signifikant niederschlagen. Es könnte allerdings regional (z. B. in den neuen Bundesländer) in den nächsten Jahren zu einer deutlichen Verringerung der Schmutzfrachten durch Bevölkerungsrückgang und/oder Strukturwechsel in der Industrie kommen.

Diese Veränderungen bleiben in den nachfolgenden Betrachtungen unberücksichtigt, da sie keinen wesentlichen Einfluss auf die Schlussfolgerungen aus den Szenarien haben.

Unabhängig von der Frage der anfallenden Schmutzfrachten werden zunehmend neue Formen der Abwasserentsorgung diskutiert:

- Trennung von Grau- und Schwarz- bzw. Gelbwasser ggf. mit Einführung von Vakuumsystemen zum Abwassertransport (anstelle der Schwemmkanalisation)
- verstärkte Regenwassernutzung und Grauwasseraufbereitung bis hin zum sogenannten abwasserlosen Haus (ecosan-Techniken)
- Vermehrter Einsatz des Trennsystems in der Kanalisation
- Vermehrter Einsatz der Anaerobtechnik zur Abwasserreinigung

All diesen neuen technischen Optionen ist gemeinsam, dass ihre flächendeckende Umsetzung einen außerordentlich hohen Aufwand an Investitionen nicht nur von öffentlicher Seite, sondern auch von Privathaushalten bedingen würde, der in absehbarer Zeit (10 bis 20 Jahren) nicht realistisch ist. Diese neuen Möglichkeiten können sich daher frühestens in einigen Jahrzehnten signifikant bemerkbar machen und werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Empfehlungen aus dieser Studie sind aber auch dann sinnvoll, wenn sich mittel- bis langfristig diese Techniken ganz oder teilweise durchsetzen sollten.

### 4.5.2 Szenarien für neue, energieintensive Techniken

Zur Abschätzung des Auswirkungen der Neuen Techniken und Trends auf die Energiebilanz von Kläranlagen werden verschiedene Szenarien zusammengestellt.

Die Szenarien basieren einerseits auf den oben hergeleiteten Energiekennwerten für die neuen Verfahren und andererseits auf einer Abschätzung ihres künftigen Verbreitungsgrades. Diese Annahmen sind zwangsläufig subjektiv und dienen vor allem der Identifizierung energierelevanter Verfahren sowie zur größenordnungsmäßigen Abschätzung der möglichen Folgen neuer Techniken für die Energiebilanz.

Die Szenarien beinhalten daher jeweils eine minimale, „realistische“ und maximale Abschätzung. Die Max-Variante ist dabei eher eine theoretische Option, die bei Mehrverbräuchen sozusagen den worst case darstellt. Das realistische Szenario enthält die aus unserer Sicht wahrscheinlichste Version, unter Berücksichtigung der politischen und ökonomischen Randbedingungen sowie der technischen Entwicklung. Diese Randbedingungen werden in den einzelnen Szenarien kurz beschrieben und leiten sich ab aus den Ergebnissen der vorigen Kapitel.

Die Min-Variante soll die Effekte darstellen, die schon bei sehr geringer Ausbreitung neuer Techniken auftreten können. Um die Abschätzung transparent zu machen, sind nachfolgend die wichtigsten Annahmen zusammengestellt wobei sich die Zahlenangaben im Format (min. / real. / max.) jeweils auf die drei Varianten jedes Szenarios beziehen. Die Berechnungsgrundlagen für die Szenarien sind im Anhang zusammengestellt. Die Auswirkungen auf den Stromverbrauch sind jeweils in Übersichtsgaphiken zusammengefasst.

#### **M 1: Biomembrananlagen**

##### Annahmen:

- Einsatz künftig in Einzelfällen zur Leistungssteigerung bei Platzmangel bzw. zur Vermeidung von Neubauten sowie zur Hygienisierung des Ablaufes und zum vermehrten Feststoffrückhalt; derzeit ist nach Einrichtung mehrerer Pilotanlagen eine gewisse Stagnation zu beobachten; eine flächige Verbreitung ist aufgrund der hohen Investitions- und Betriebskosten und den beobachte-

ten Betriebsproblemen (z. B. Verzopfung) nicht zu erwarten. Es wird von einer nur geringen Umsetzung für wenige Sonderfälle in allen Größenklassen ausgegangen (1 / 3 / 10 % der EW).

- Stromverbrauch zunächst bezogen auf  $\text{m}^3$  Abwassermenge für die gesamte Membrananlage, von denen der Hauptanteil auf die Belüftung der Membran zurückgeht: Der **Zielwert von 0,7 kWh/m<sup>3</sup>** ergibt sich aus der theoretischen Herleitung des Belüftungsbedarfs nach Krause (2005); die realistische Variante mit 0,9 kWh/m<sup>3</sup> entspricht optimierten Betriebswerten. Der max-Wert von 1,5 kWh/m<sup>3</sup> ergibt sich aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen in Großanlagen.
- Unter Annahme eines spezifischen Anfalls von 250 l/EW.d ergeben sich Jahresverbräuche in kWh/(EW.a), von denen der Anteil der Belüftung in konventionellen Anlagen (mit 10 kWh/(EW.a)) abgezogen wird. Daraus ergibt sich der angesetzte Mehrverbrauch (54 / 72 / 127 kWh/(EW.a)).

### **M 2: Klärschlamm-trocknung**

In der letzten Zeit wird vermehrt die Klärschlamm-trocknung propagiert, um die Transportaufwendungen und somit auch die Transportemissionen gering zu halten. Auf der anderen Seite wird dadurch aber der Strom- und Wärmebedarf auf den Kläranlagen drastisch vergrößert (s. Kap 4.5.4). In diesem Szenario wird zunächst nur der zusätzliche Strombedarf betrachtet, der bei einem Ausbau der Klärschlamm-trocknung auf Kläranlagen induziert würde

#### Annahmen:

- Neubau von Trocknungsanlagen für weitere 20 / 30 / 70 % EW für alle GK (Anlagen konzentriert in GK 4 und 5)
- Stromverbrauch 3 / 4 / 6 kWh/(EW.a)

### **M 3: Membranfiltration im Ablauf**

Die Membranfiltration im Ablauf wird – auch in Konkurrenz zu einer Sandfiltration - zunehmend als zusätzliche Reinigungsstufe diskutiert. Ihr Einsatz dient vor allem der

Hygienisierung des KA-Ablaufes (z. B. vor Badegewässern) und zum vermehrten Feststoffrückhalt.

Annahmen:

- wegen relativ hoher Investitions- und Betriebskosten i. V. zu anderen technischen Alternativen wird von einer nur geringen Umsetzung für wenige Sonderfälle in allen Größenklassen ausgegangen: (3 / 5 / 10 % der EW in GK 1-5).
- Stromverbrauch bezogen auf m<sup>3</sup> Jahresabwassermenge: **Zielwert 0,1 kWh/m<sup>3</sup> (= Min.-wert)**; real. 0,15 kWh/m<sup>3</sup>, max. 0,2 kWh/m<sup>3</sup> aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen (entsprechend 9,1/13,7/18,2 kWh/(EW.a)).

**M 4: Verstärkte Sandfiltration im Ablauf**

Die Sandfiltration betrifft im Bestand 21,5 Mio. EW und wird fast nur in GK 4 (20 % von 21,5 Mio.) und 5 (78 % von 21,5 Mio.) eingesetzt. Anlass war meist die Einhaltung verschärfter Grenzwerte für die P-Elimination sowie ein weitergehender Feststoffrückhalt. Nach einer starken Zunahme der Sandfilter in den Neunziger Jahren gibt es in letzter Zeit kaum noch Neubauten.

Allerdings werden Sandfilter inzwischen auch zur nachgeschalteten Denitrifikation eingesetzt und gewinnen angesichts einer Verschärfung der Grenzwerte für N<sub>ges</sub> in GK 5 neue Bedeutung. Auch der Einsatz von Aktivkohle zur Entnahme von Medikamentenrückständen oder anderen Micropollutants wird verstärkt diskutiert, was mit einer Aktivkohle-Filtration im Ablauf mit ähnlichem Energieverbrauch bewerkstelligt werden könnte.

Andererseits ist es heute aufgrund der gewonnenen Betriebserfahrung möglich, Sandfilter auch energieeffizienter zu konzipieren und zu betreiben. Im folgenden Szenario wird daher zunächst eine weitere Ausbreitung der Sandfilter mit energieeffizienten Anlagen und dann in einem zweiten Szenario (E 4) in Kap. 4.5.4 die Auswirkung einer Energieoptimierung im Bestand untersucht.

Annahmen:

- Erhöhung des Anteils der Anlagen mit Sandfilter von 21,5 auf 25/30 / 40 Mio. EW.
- Spezifische Erhöhung des Stromverbrauchs durch Sandfilter: 3 kWh/(EW.a)

**M 5: Hygienisierung mit UV**Annahmen:

- Einsatz zur Hygienisierung des Ablaufs. Der alternativ denkbare Einsatz von Ozon dürfte wegen des rund 10fach höheren Energieeinsatzes auf Einzelfälle begrenzt sein und wird nicht separat betrachtet.
- Einsatz nur im Rahmen der Anforderungen durch die neue EU-Badegewässerrichtlinie, da keine flächendeckenden Anforderungen an Hygiene im Ablauf geplant; daher Einsatz in allen GK nur in Einzelfällen (3 / 5 / 10 % EW).
- Stromverbrauch bezogen auf m<sup>3</sup> Jahresabwassermenge: **Zielwert 0,025 kWh/m<sup>3</sup>**; real. 0,035 kWh/m<sup>3</sup>, max. 0,05 kWh/m<sup>3</sup> aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen (entsprechend 2,3/3,2/4,6 kWh/(EW.a)).

**M 6: Abluftbehandlung**Annahmen:

- Einsatz verstärkt bei KA nahe an Wohngebieten
- Da zunehmend Anforderungen an die Emissionsminderung gestellt werden, wird von zunehmendem Anteil betroffener KA ausgegangen (Anteil an KA der GK 2 – 5: 10 / 20 / 30 %)
- Stromverbrauch bezogen auf 1.000 m<sup>3</sup>/h erforderlichen Luftwechsel, abhängig von Art der Behandlung (Wäscher, Kamin, Biofilter)
- Zielwerte sind schwer zu ermitteln, da abhängig von zahlreichen örtlichen Faktoren (Raumgröße, Abwasserqualität, klimatische Faktoren etc.).

- Der „Mehrverbrauch“ dieses Szenarios stellt den gesamten Stromverbrauch der Abluftbehandlung inklusive Bestand dar, da keine verlässlichen Zahlen über den derzeitigen Stromverbrauch vorliegen.
- Abschätzung von Min./Max.-Werten unter folgenden Annahmen: 2 kWh pro 1.000 m<sup>3</sup>/h Luftwechsel inkl. Gebläse und erforderlicher Luftwechsel für GK 4/5 (2.000 – 6.000 m<sup>3</sup>/h), bzw. GK 2/3 (1.000 bis 3.000 m<sup>3</sup>/h). Daraus ergeben sich Jahresverbräuche pro Kläranlage von 15, 30 und 100 MWh/a.

Die **Ergebnisse der Szenarien M 1 bis M 6** für neue, energieintensive Techniken sind in Abb. 4.5.1 zusammengestellt und werden im Kap. 4.5.5 kommentiert.

**Mehrverbräuche bei unterschiedlichen Szenarien**  
(Ist-Verbrauch 4.400 GWh/a)

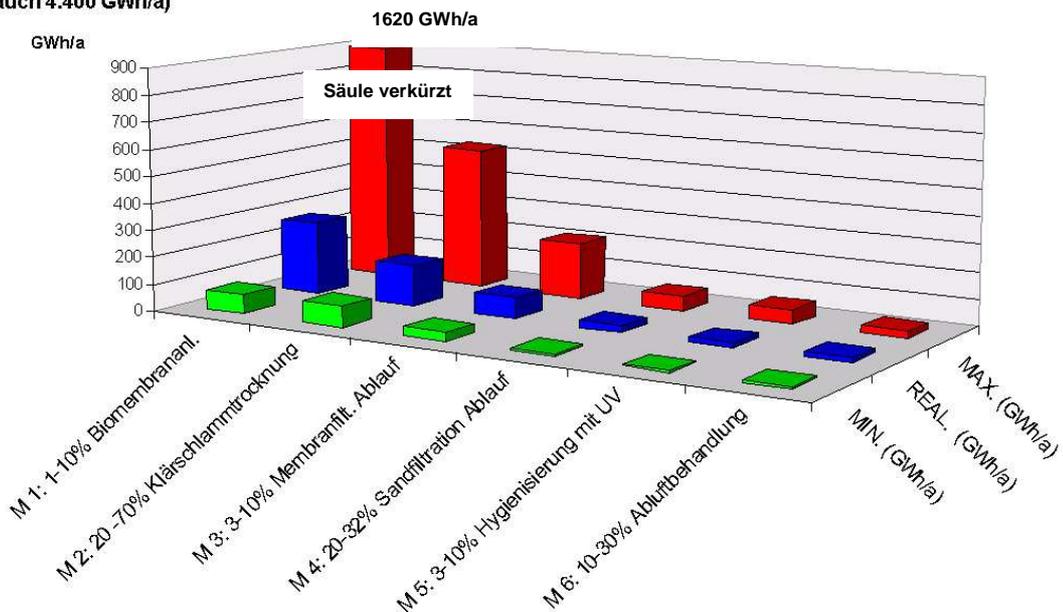


Abb. 4.5.1: Bundesweiter Energiemehrverbrauch für energieintensive Techniken

### 4.5.3 Vergleichende Energiebilanz der Klärschlammentsorgung

In der folgenden Tabelle 4.5.1 sind zunächst die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Alternativen zur thermischen Klärschlammentsorgung aufgelistet.

Tab. 4.5.1: Vorteile und Nachteile der thermischen Entsorgungsalternativen

	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Kohlekraftwerke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Entsorgungskapazitäten, ganzjährig =&gt; hohe Entsorgungssicherheit</li> <li>• Primärenergieeinsparung</li> <li>• sowohl entwässerter als auch getrockneter Klärschlamm einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Transportstrecken</li> <li>• Reststoffe müssen z. T. auf Deponien entsorgt werden</li> </ul>
Zementwerke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rohstoffliche <u>und</u> thermische Verwertung</li> <li>• keine Reststoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• saisonal Entsorgungseingpässe zu erwarten</li> <li>• stärkerer Einfluss konjunktureller Schwankungen</li> <li>• Industriezweig abhängig von Weltwirtschaftsentwicklung (s. Zementproduktion China)</li> </ul> => eingeschränkte Entsorgungssicherheit
Industrielle Verbrennungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dauerbetrieb möglich</li> <li>• Synergieeffekt durch Mitverbrennung von werkseigenem Schlamm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eingeschränkte Entsorgungssicherheit (Einfluss konjunktureller Schwankungen)</li> </ul>
Mono-Klärschlammverbrennungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Entsorgungssicherheit</li> <li>• bessere Auslastung bereits vorhandener Anlagentechnik</li> <li>• kommunale Zusammenarbeit</li> <li>• optimierte Rauchgasreinigung</li> <li>• P-Rückgewinnung aus Asche möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höhere Entsorgungskosten</li> <li>• Reststoffe müssen z.T. auf Deponien entsorgt werden</li> </ul>
Müllverbrennungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimale Rauchgasreinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Entsorgungskosten</li> <li>• Reststoffentsorgung erforderlich</li> </ul>

Die Klärschlamm Entsorgung kann aber hinsichtlich der Energieeffizienz nicht isoliert von vorhergehenden Verfahrensschritten bzw. den Transportentfernungen betrachtet werden. In der letzten Zeit wird vermehrt die Klärschlamm Trocknung propagiert, um die Transportaufwendungen und somit auch die Transportemissionen gering zu halten.

Um eine Vergleichbarkeit von Transportemissionen und Emissionen aus der Klärschlamm Trocknung und -verbrennung im Rahmen einer Betrachtung zur Energieeffizienz zu ermöglichen, wird in der Regel das Treibhauspotenzial, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, angeführt. Eine tiefer gehende Betrachtung unter Berücksichtigung von weiteren ökologisch relevanten Faktoren, wie etwa die Emission kanzerogener

Stoffe oder das Sommersmogpotenzial kann nicht Gegenstand dieser Studie sein. Hier ist das Instrument der Ökobilanz heranzuziehen.

Im folgenden wird die Herleitung der für den Klärschlamm Einsatz bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder Zementwerken herangezogenen CO<sub>2</sub>-Äquivalente kurz dargestellt:

- Stabilisierter Klärschlamm mit einem Glühverlust von 50 - 55 % besitzt einen Heizwert von ca. 11.000 kJ/kg.
- der Energiebedarf für die Verdampfung von 1 kg Wasser beträgt 2.638 kJ/kg H<sub>2</sub>O
- in diesem Zusammenhang vernachlässigbar ist der Energiebedarf für die Erwärmung der Schlamm-TS auf 100°C
- Im weiteren wird außerdem die Annahme getroffen, dass der Klärschlamm bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder auch in Zementwerken jeweils zu 50 % Stein- bzw. Braunkohle ersetzt, daher wird der Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren von Stein- und Braunkohle für den Klärschlamm zugrunde gelegt:  $(350 \text{ g/kWh} + 411,5 \text{ g/kWh}) / 2 = 380,5 \text{ g/kWh}$

Mit diesen Werten kann der untere Heizwert des Klärschlammes in Abhängigkeit vom Wassergehalt überschlägig ermittelt werden. Die Ergebnisse für Klärschlamm mit 28 % TS (mechanisch entwässert), 75 % TS (solar getrocknet) und 90 % TS (aus Hoch- oder Niedertemperaturtrocknung) sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 4.5.2: Herleitung CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Klärschlammverbrennung

	Steinkohle	Braunkohle	Klärschlamm		
			28 % TS	75 % TS	90 % TS
Heizwert	27.500 kJ/kg 7,65 kWh/kg	8.650 kJ/kg 2,4 kWh/kg	1.200 kJ/kg 0,3 kWh/kg	7.600 kJ/kg 2,1 kWh/kg	9.600 kJ/kg 2,7 kWh/kg
Emissionsfaktor CO <sub>2</sub>	350 g/kWh	411,5 g/kWh	Ansatz Mittelwert für CO <sub>2</sub> -Einsparung: 380 g/kWh		
Ansätze für CO <sub>2</sub> -Bilanz			114 g/kg	798 g/kg	1.026 g/kg

Basierend auf Angaben in GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme; Öko-Institut, 2002) werden außerdem für den Vergleich unterschiedlicher Verfahrensketten folgende Ansätze für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Transporten, aus Stromerzeugung sowie für Erdgas wie folgt zugrunde gelegt:

- Klärschlammtransport (entwässert/getrocknet), Lkw-D-Mix:  
129.647 g CO<sub>2</sub>/(1000 tkm)
- Strombereitstellung, Stromnetz-lokal-D: 682 g CO<sub>2</sub> / kWh
- Strombedarf thermische Trocknung: 100 kWh/t Wasserverdampfung
- Strombedarf solare Trocknung: 25 kWh/t Wasserverdampfung
- Wärme für Trocknung, Erdgas: 297,5 g CO<sub>2</sub> / kWh

Für einen Verfahrensvergleich wurden folgende Verfahrensketten ausgewählt:

Variante 1: Verbrennung von entwässertem Klärschlamm nahe an der Kläranlage

Variante 2: Verbrennung von entwässertem Klärschlamm in einem Kraftwerk in 550 km Entfernung

Variante 3: Trocknung des entwässerten Klärschlammes am Kraftwerksstandort in 550 km Entfernung mit dort bisher nicht genutzter Abwärme

Variante 4: Trocknung auf der Kläranlage mit Einsatz von Primärbrennstoffen, Verbrennung im Nahbereich der Kläranlage

Variante 5: Trocknung auf der Kläranlage mit Einsatz von Primärbrennstoffen, Verbrennung in Kraftwerk in 550 km Entfernung

Variante 6: Trocknung auf der Kläranlage mit ungenutzter Abwärme, Verbrennung in Kraftwerk in 550 km Entfernung

Variante 7: solare Trocknung auf der Kläranlage, Verbrennung nahe der Kläranlage

Variante 8: solare Trocknung auf der Kläranlage, Verbrennung in Kraftwerk in 550 km Entfernung

In der folgenden Grafik sind die Ergebnisse aus dem Verfahrensvergleich der unterschiedlichen Verfahrensketten dargestellt:

**Varianten der Klärschlamm Entsorgung**  
- mit / ohne Trocknung -

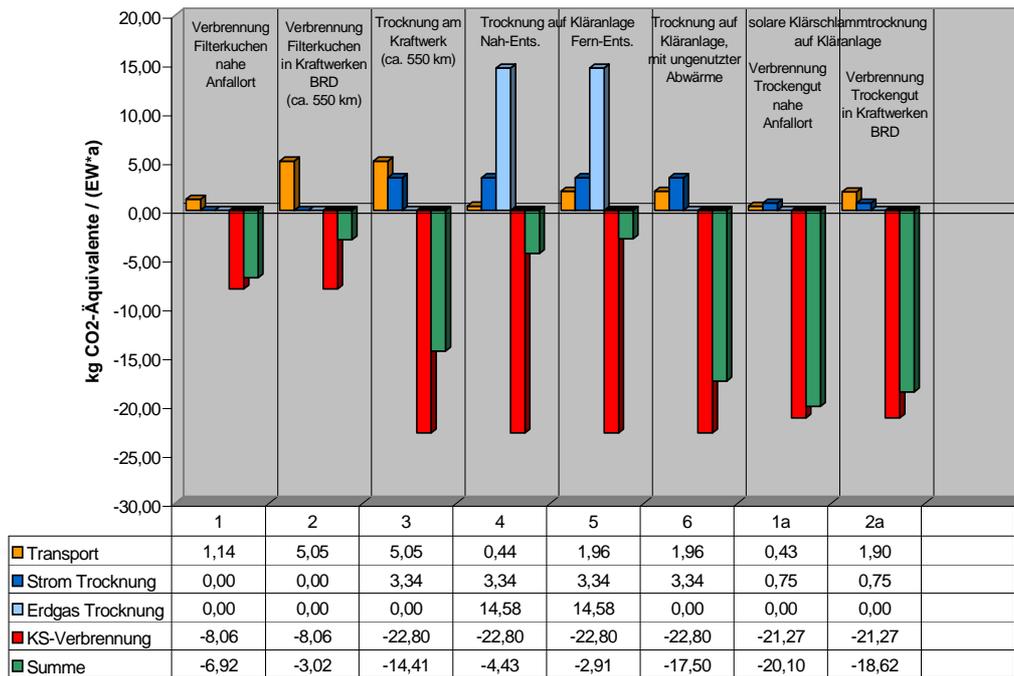


Abb. 4.5.2: CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Klärschlamm Entsorgungspfade

Aus der Grafik wird deutlich, dass

- die Transportentfernungen bei entwässertem Schlamm zwar einen höheren Einfluss auf die Gesamtbilanz der Verfahrenskette aufweisen als bei getrocknetem Schlamm, letztlich aber nicht maßgeblich sind.
- die Trocknung mit Primärbrennstoffen auf der Kläranlage selbst bei großen Entfernungen zum Ort der Entsorgung unter energetischen Gesichtspunkten nicht zu empfehlen ist (Varianten 4 und 5 i. V. zu 1 und 2)
- der Transport von entwässertem Klärschlamm zur Verbrennung auch bei großen Transportentfernungen eine energetisch günstige Variante darstellt, wenn am Standort der Verbrennungsanlage ungenutzte Abwärme zur Trocknung des Klärschlammes zur Verfügung steht (ist in der Regel bei Kraftwerken und Zementwerken der Fall)
- die Trocknung auf der Kläranlage mit ungenutzter Abwärme oder mit Hilfe der Sonneneinstrahlung die energieeffizienteste Variante ist.

Für die solare Trocknung ist aber auf die derzeit noch eingeschränkt verfügbaren Entsorgungsmöglichkeiten aufgrund der nicht definierten Produktqualität hinzuwei-

sen. Für die Klärschlammvererdung gilt, dass sie aufgrund der starken Volumensverringerung (teilweise Trocknung und TS-Abbau) im Prinzip einen Mittelweg zwischen der solaren Trocknung auf der Kläranlage (Variante 1a/2a) und der Trocknung am Kraftwerk (Variante 3) darstellt, aber wegen des Restgehaltes an Wasser und der anderen Struktur ebenfalls Einschränkungen bzgl. der Verwertbarkeit hinzunehmen sind.

Aus der obigen Abbildung ergeben sich klare Präferenzen für die Entsorgungswege:

1. Wenn möglich Trocknung auf der Kläranlage mit Sonnenenergie und/oder ungenutzter Abwärme und Verbrennung möglichst nahe am Kläranlagenstandort (Gutschrift ca. 19 kg CO<sub>2</sub>/EW.a)
2. Falls dies nicht möglich ist, Transport von entwässertem Klärschlamm zum nächsten Kraftwerk/Zementwerk mit Trocknung vor der Verbrennung, auch wenn dieses sehr weit entfernt ist.
3. Falls beide Möglichkeiten ausscheiden, direkte Verbrennung von entwässertem Schlamm.

### **Szenarien**

Um die Auswirkungen auf den Klimaschutz abzuschätzen werden die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für ein günstiges und ein ungünstiges Szenario berechnet. Dabei wird berücksichtigt, dass ein Großteil des Klärschlammes aus Ballungsgebieten stammt, die meist relativ nahe an Kraftwerken oder sonstigen Industrien mit Verbrennungskapazitäten liegen (z. B. Ruhrgebiet, Rhein-Main-Gebiet, etc.). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die mittleren Transportwege in der Regel nicht wesentlich über 100 km liegen dürften.

### **KS 1: Energetisch optimale Klärschlamm Entsorgung**

#### Annahmen:

- In Kläranlagen der GK 2 und 3 wird der Klärschlamm solar oder mit ungenutzter Abwärme z.B. von Biogasanlagen und Biomassekraftwerken getrocknet oder aber mittels Klärschlammvererdung auf ca. 50 % entwässert: **Gutschrift ca. 19 kg CO<sub>2</sub>/EW.a.**

- Die Variante 3 (Trocknung am Kraftwerk/Zementwerk) wird für 80 % der EW in GK 4 und 5 realisiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Großteil des Schlammes in der Nähe der Kläranlagen entsorgt werden kann (Ansatz 2 kg CO<sub>2</sub>/EW.a). Daraus resultiert eine **Gutschrift ca. 17,5 kg CO<sub>2</sub>/EW.a**.
- Für den Rest (20 % der EW in GK 4 und 5) wird Variante 1 unerstellt: **Gutschrift ca. 7 kg CO<sub>2</sub>/EW.a**

## **KS 2: Energetisch ungünstige Klärschlammentsorgung**

### Annahmen:

- Entwässerter Klärschlamm aus GK 2 und 3 wird in weit entfernten Kraftwerken ohne Trocknung verbrannt: **Gutschrift ca. 3 kg CO<sub>2</sub>/EW.a**
- In GK 4 und 5 wird der Klärschlamm unter Einsatz von fossilen Energieträgern getrocknet und im Kraftwerk verbrannt (Standort mit mittlerer Transportentfernung). Daraus resultiert eine **Gutschrift von ca. 4 kg CO<sub>2</sub>/EW.a**.

Die Ergebnisse dieser beiden Szenarien werden in Kap 4.5.5 bewertet.

### **4.5.4 Szenarien für Energieoptimierungen**

Zur Abschätzung des Einsparpotenzials durch Energieoptimierung werden verschiedene Szenarien für einzelne Ansatzpunkte oder Maßnahmenbündel zusammengestellt. Dabei können die einzelnen Einsparpotenziale nicht einfach addiert werden, da sie sich bei gleichzeitiger Umsetzung aller Maßnahmen im Absolutbetrag verringern: Wird der Stromverbrauch der Belüftung z. B. durch effiziente Belüfter halbiert, ist auch die zusätzlich mögliche Einsparung durch eine optimierte Regelung nur noch halb so groß.

Die Annahmen basieren einerseits auf üblichen Betriebswerten (wie in Kapitel 3 ausgeführt), andererseits auf den im Kapitel 6 definierten Zielwerten und einer Abschätzung des Zielerreichungsgrades. Die Annahmen über die Zielerreichung sind zwangsläufig subjektiv und dienen vor allem der Gewichtung der Einsparpotenziale untereinander sowie zur Abschätzung eines realistischen Potenzials an Energieeinsparung.

Die Szenarien beinhalten daher jeweils eine minimale und maximale Abschätzung des Potenzials. Die Max-Variante ist dabei eher eine theoretische oder zumindest sehr optimistische Option, die zur Abschätzung des maximal Erreichbaren bei Umsetzung aller technischen Möglichkeiten dient. Das realistische Szenario enthält die aus unserer Sicht technisch und ökonomisch machbare Version, wenn eine Energieoptimierung politisch gewollt ist. Die Min-Variante soll darstellen, was schon mit geringem Aufwand möglich ist. Um die Abschätzung transparent zu machen, sind nachfolgend die wichtigsten Annahmen zusammengestellt. Dabei werden zunächst die Möglichkeiten der Verringerung des Stromverbrauchs als „E-Szenarien“ und dann die Optimierung der Faulgaserzeugung und –verwertung als „F-Szenarien“ beschrieben.

### **E 1: Effizientere Pumpwerke**

Es gibt bei Abwasserpumpen einen Interessenskonflikt zwischen hohem Wirkungsgrad und Verstopfungsanfälligkeit. Daher wurden und werden für die Schlammkreisläufe (und bei kleineren Kläranlagen auch im Zulauf) häufig Freistromräder mit sehr geringem Wirkungsgrad (0,4 bis 0,5) eingesetzt. Der Wirkungsgrad von (Kreisel-) Pumpen sinkt außerdem im Betrieb durch Abrieb an den Laufrädern, und zwar tendenziell umso stärker, je höher der anfängliche Wirkungsgrad ist.

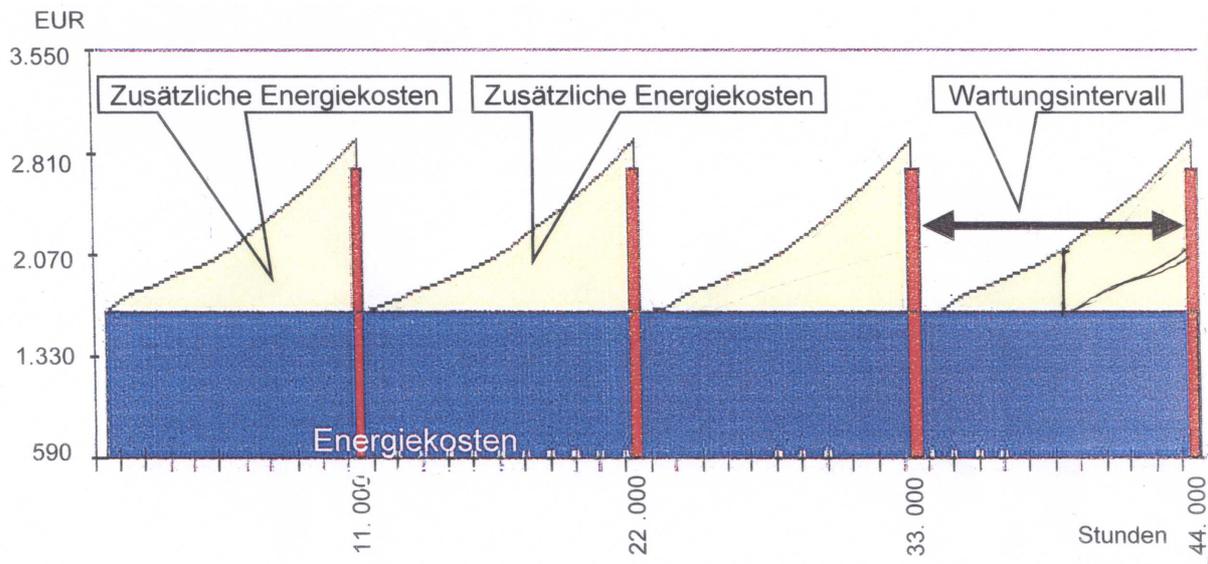


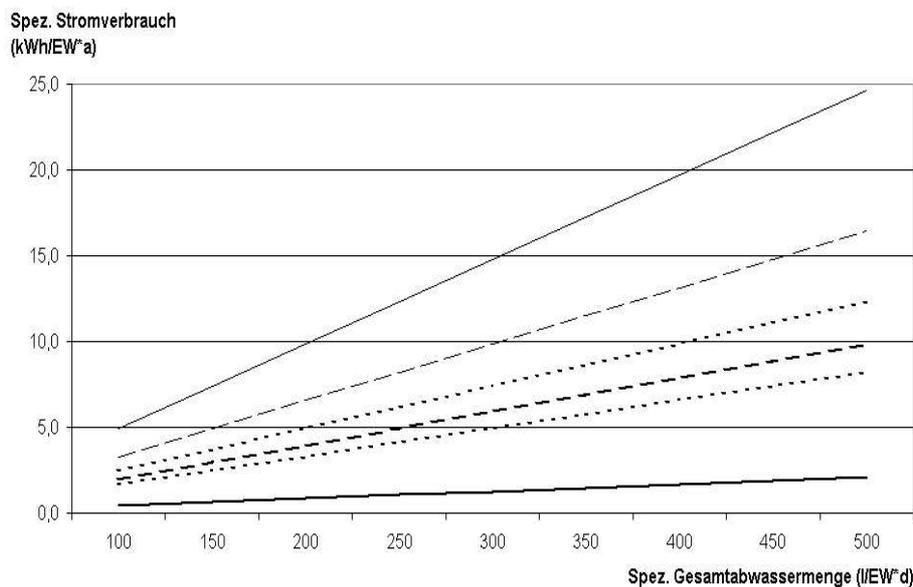
Abb. 4.5.3 Wirkungsgrad und Wartung von Pumpen (Werksangaben Fa. ABS)

In den vergangenen Jahren haben verschiedene Hersteller Pumpen mit höherem Wirkungsgrad (0,7 bis 0,8) bei gleichzeitig geringer Verstopfungsanfälligkeit auf den Markt gebracht, die auch zunehmend die Möglichkeit bieten, den Ringspalt am Lauf-

rad nachzustellen, um den Wirkungsgrad zu erhalten. Ein Austausch der Laufräder oder Pumpen kann daher zu einer Stromeinsparung ohne Veränderung der Betriebsweise führen (s. Abb. 4.5.3)

Denkbar ist auch eine Einsparung über die verbesserte Regelung der Pumpen und eine verringerte Förderhöhe. Die gesamte (kumulierte) Förderhöhe in einer Kläranlage ergibt sich als Produkt aus manometrischer Förderhöhe und jeweils eingestellter prozentualer Kreislaufführung (bezogen auf die Zulaufmenge): Wird z. B. bei der Denitrifikation eine hohe interne Rezirkulation von 500 % des Zulaufes mit nur einem Gegendruck von 0,25 bar gefahren, beträgt die kumulierte Förderhöhe für dieses Pumpwerk bereits  $5 \times 2,5 \text{ m} = 12,5 \text{ m}$ , d.h. jeder  $\text{m}^3$  Abwasser muss insgesamt 12,5 m gehoben werden. Ähnliches gilt für die Rücklaufschlammführung, die sehr effizient über eine Schlammspiegelmessung im Nachklärbecken geregelt werden kann. Daher können Einsparungen durch Einstau im Pumpensumpf oder Verringerung der Leitungsverluste aber auch eine Verringerung der Kreislaufführung erzielt werden (s. Abb. 4.5.4).

**Spezifischer Stromverbrauch von Pumpwerken in Abhängigkeit von kumulierten Förderhöhen (m) und Pumpenwirkungsgrad ( $\eta$ )**



**Abb. 4.5.4: Energieverbrauch von Pumpwerken in Funktion von  $h_{\text{kum}}$  + Wirkungsgrad**

Annahmen:

- Da die Kosten für den Austausch der Laufräder bzw. das Nachjustieren des Ringspaltes relativ gering sind, kann regelmäßig von einer hohen Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ausgegangen werden. Deshalb werden relativ hohe Umsetzungsraten von 20, 50 und 80 % der EW in allen GK angesetzt.
- Für das Einsparszenario wurde angenommen, dass eine Verbesserung des Systemwirkungsgrades von Pumpwerken (inkl. Motor und Getriebe) im Mittel um 10 %-Punkte (z.B. von 0,4 auf 0,5) erreicht wird und die kumulierte Förderhöhe (bezogen auf 250 l/EW.d) für die betroffenen Zulaufpumpwerke und internen Schlammkreisläufe bei 5 bis 10 m liegt. Daraus errechnet sich ein spezifisches Einsparpotenzial von 1 / 3 / 4 kWh/(EW.a) je nach Förderhöhe und Ausgangswirkungsgrad.

**E 2: Austausch der Belüfter und Optimierung der Belüfteranordnung**

Bei der Konzeption der Belüftung wirkt sich vor allem die flächige Anordnung der Belüfter drastisch aus und kann bis zu einer Halbierung des Stromverbrauchs i. V. zu einer linienförmigen Anordnung führen. Dies betrifft überwiegend kleine bis mittlere Anlagengrößen (GK 1 bis 3).

Die Auslastung der Belüfterelemente beeinflusst den Sauerstofftrag ebenfalls sehr stark. Bei geringer Beaufschlagung (z. B. 3 bis 5 m<sup>3</sup> Luft pro min und m Belüfterlänge) liegen die Erträge deutlich höher als bei Nennlast (~ 10 bis 12 m<sup>3</sup>/m.min). Da die Investitionskosten für zusätzliche Belüfterelemente relativ gering sind i. V. zu den Einsparungen bei den Stromkosten, sind auch diese Maßnahmen meist rentabel.

Selbst optimal konzipierte und bemessene Belüfterelemente verlieren im laufenden Betrieb stark an Effizienz, d. h. der Sauerstofftrag in kg O<sub>2</sub>/kWh sinkt z. T. auf weniger als die Hälfte. Nach Erhebungen des Instituts WAR (TU Darmstadt) und Erhebungen in Österreich (Frey in KA 3/2006) weisen ca. 30 bis 50 % der Anlagen aller GK einen starken Wirkungsgradverlust auf, der bis zu einer Verdoppelung des Strombedarfs gehen kann (s. dazu Fallbeispiele in Kap. 7).

Durch regelmäßige Reinigung und Austausch der Belüfterelemente bzw. Ersatz veralteter Belüftungssysteme kann bei gleicher Belastung und Regelung der Strombedarf stark gesenkt werden. Da die Kosten für die Reinigung oder einen Austausch der Belüfterelemente relativ gering sind, kann regelmäßig von einer hohen Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ausgegangen werden.

Annahmen:

- Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen werden in diesem Szenario relativ hohe Umsetzungsraten von 20, 50 und 80 % jeweils bezogen auf 40 % der EW (Anzahl der betroffenen Anlagen) angesetzt.
- Das Einsparpotenzial wird angesetzt mit 20 bis 50 % der mittleren spezifischen Belüftungsenergie von ~ 16 kWh/(EW.a), d. h. 3,2/ 5 / 8 kWh/(EW.a)

**E 3: Separate Prozesswasserbehandlung**

Die Rückbelastung durch die Prozesswässer aus der Schlammmentwässerung verursacht in der biologischen Stufe einen zusätzlichen Stromverbrauch in der Größenordnung von 15 bis 20 %. Durch eine getrennte (Vor-)Behandlung der Prozesswässer kann vor allem die Stickstoffelimination energieeffizienter umgesetzt werden und z. T. sogar als zusätzlichen Vorteil eine Nährstoffrückgewinnung ermöglichen (z.B. bei der MAP-Fällung oder Dampfstrippung).

Geht man davon aus, dass die Rückbelastung beim Ammonium etwa 0,5 kg/EW.a beträgt und der spezifische Stromverbrauch für die Stickstoffelimination im Hauptstrom bei rund 6 kWh/kg N liegt, ergeben sich deutliche Einsparungen, wenn bei der separaten Prozesswasserbehandlung der Stromverbrauch auf etwa 1,5 bis 2 kWh/kg N gedrückt werden kann (s. Kap. 4.2.5).

Annahmen:

- Da die getrennte Prozesswasserbehandlung nur für größere Anlagen sinnvoll ist, wird eine (zusätzliche) Umsetzung bei GK 4 für 5 / 10 / 30 % der EW und in GK 5 für 10/ 20/ 50 % der EW angenommen.

- Absenkung des mittleren spezifischen Stromverbrauchs für die Stickstoffelimination auf 1,5 / 2 / 3 kWh/kg N im Nebenstrom. Daraus errechnen sich Einsparpotenziale von 1,5 / 2 / 2,25 kWh/(EW.a)

#### **E 4: Energieoptimierung der Sandfiltration**

Aufgrund der gewonnenen Betriebserfahrung können Sandfilter inzwischen energieeffizienter konzipiert und betrieben werden:

- weniger bis gar keine Vorbelüftung,
- längere Spülzyklen,
- Vermeidung von Höhenverlusten bzw. Nutzung der Absturzhöhe durch Wasserkraftanlagen,
- Einsatz effizienterer Pumpen.

Im folgenden Szenario wird die Auswirkung einer Energieoptimierung im Bestand ohne weitere Ausbreitung der Sandfilter berechnet.

##### Annahmen:

- Beibehaltung der Anlagenkapazität von 21,5 Mio. EW
- Absenkung des mittleren spezifischen Stromverbrauch von derzeit 5 auf 4 / 3 / 2 kWh/(EW.a)

#### **E 5: Optimierung der Belüfterregelung**

Durch eine geschickte Regelung kann der Strombedarf der Belüftung weiter reduziert werden. Inzwischen haben fast alle Kläranlagen eine Sauerstoffmessung mit Vorgabe eines Sollwertes als Grundlage für die Regelung. Die Regelung kann zum einen verfeinert werden durch Umstellung auf eine Regelung nach der Ammoniumkonzentration im Ablauf der biologischen Stufe, was vor allem bei Kläranlagen der GK 1 bis 4 wegen des Aufwandes für die online-Messung selten der Fall ist. Inzwischen sind hier Sonden mit ionenselektiver Membran auf dem Markt, die sehr preiswert und ausreichend genau arbeiten. In Verbindung mit einer Belüfter-Regelung kann damit nicht nur Strom für die Nitrifikation eingespart, sondern auch die Denitrifikation verbessert werden.

Annahmen:

- Da dieses Potenzial vorwiegend auf kleineren Anlagen gegeben ist (größere Anlagen haben meist schon effiziente Regelungen) werden in diesem Szenario relativ geringe Umsetzungsraten von 5, 10 und 30 % der EW (Anzahl der betroffenen Anlagen) angesetzt.
- Das Einsparpotenzial ist in den unteren GK höher und wird angesetzt mit 5 bis 15 % der mittleren spezifischen Belüftungsenergie von ~ 16 kWh/(EW.a), d. h. 0,8/ 1,6 / 2,4 kWh/(EW.a)

**E 6: Fremdwasserreduzierung**

Die benötigte Pumpenergie auf Kläranlagen ist unabhängig von der erreichten Energieeffizienz auch an die spezifische Abwassermenge gekoppelt. Hohe Fremdwasseranteile verursachen auch bei gut konzipierten Pumpwerken einen höheren Einwohnerspezifischen Verbrauch. Bei einem Trinkwasserverbrauch von derzeit 125 l/EW.d und einem mittleren Abwasseranfall von 250 l/EW.d ist der Fremdwasseranteil auch dann beträchtlich, wenn man das mitbehandelte Regenwasser abzieht. Dies gilt insbesondere für kleinere Kläranlagen wo der mittlere Abwasseranfall leicht beim doppelten Wert liegen kann.

Gelingt es, durch Sanierungsmaßnahmen im Kanalnetz oder durch getrennte Ableitung von Hausdrainagen und Außengebietszuflüssen den Fremdwasseranteil zu reduzieren, kann entsprechend Pumpenergie eingespart werden, die mit diesem Szenario abgeschätzt wird.

Annahmen:

- Senkung des Fremdwasseranfalls um 10 / 20 / 30 % in allen GK
- Mittlerer Anteil Fremdwasser am gesamten Abwasser: 20 %
- Mittlerer Anteil der Pumpenergie 9 kWh/(EW.a)
- Daraus errechnen sich Einsparungen von 0,18 / 0,36 / 0,54 kWh/(EW.a)

**Maximale Umsetzung des Zielwerts 18 kWh/(EW.a) für Stromverbrauch**

Neben den Einsparungen bei großen Verbrauchern haben die Feinanalysen immer wieder gezeigt, dass in jedem Einzelfall sehr unterschiedliche Ansatzpunkte für Einsparungen gefunden werden können, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt werden.

Anregungen für solche Maßnahmen sind z.B. in den einschlägigen Handbüchern („Energie in Kläranlagen“, „Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen“, „Energieeinsparung in Kläranlagen“) und in der Literatur zahlreich vorhanden. In diesem Szenario wird unabhängig von der Art der Maßnahme und des Ansatzpunktes die Zielerreichung bezogen auf den „optimalen“ Verbrauchswert von 18 kWh/(EW.a) untersucht.

Annahmen:

- Es werden alle technisch-wirtschaftlich machbaren Maßnahmen umgesetzt. Zur Abschätzung des theoretisch maximalen Potentials wird das Erreichen des Zielwertes von 18 kWh/(EW.a) (s. Kap. 6) für alle Anlagen (Max.-Wert) angesetzt, das natürlich aufgrund der Sachzwänge im Bestand nur teilweise erreicht werden kann.
- Für den Min.-Wert bzw. das realistische Szenario werden die Zielerreichungsgrade 10 bzw. 40 % des maximal möglichen Potentials angesetzt. Dies entspricht einer Energieeinsparung von minimal 5 %, real. 20 % und maximal 48 % bezogen auf den Ist-Zustand (durchschnittlich 35 kWh/(EW.a)).

Die **Ergebnisse der Szenarien zur Energieeffizienz E 1 bis E 6** sind in Abb. 4.5.5 zusammengestellt.

**Einsparung bei unterschiedlichen Szenarien  
(Ist-Verbrauch 4.400 GWh/a)**

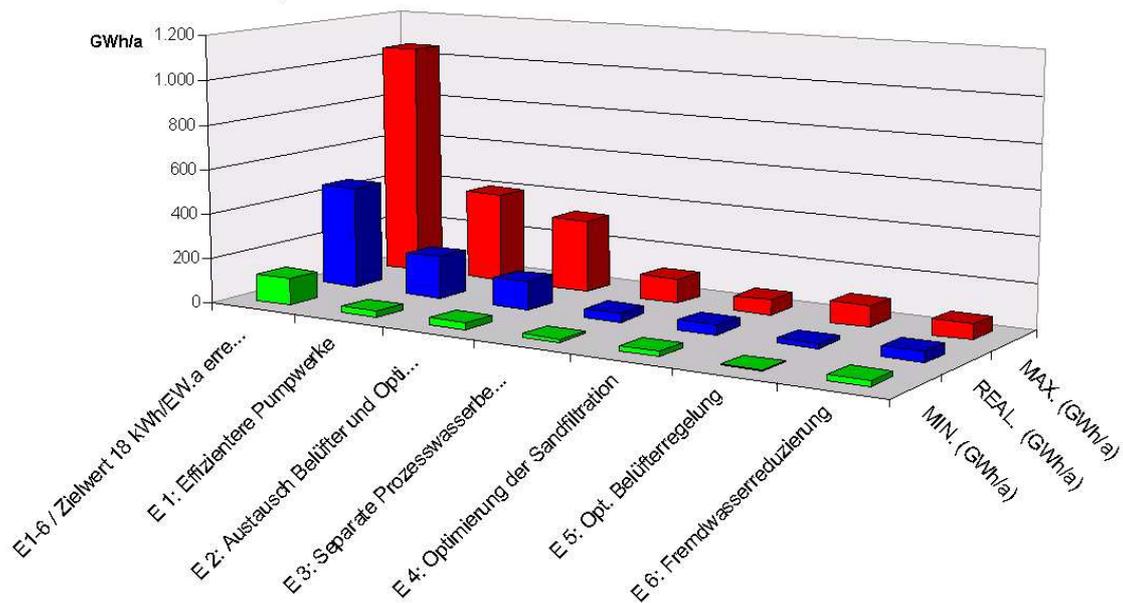


Abb. 4.5.5: Energieeinsparung bei unterschiedlichen Szenarien

Bei der Faulgaserzeugung und -verwertung sind folgenden Ansätze interessant:

### **F 1: Verstärkte Kofermentation / Erhöhung der Faulgasproduktion**

Im Kapitel 4.3.2 wurde dargestellt, dass aufgrund der Reservekapazitäten in Faultürmen ein großes Potenzial an zusätzlicher Gaserzeugung durch Kofermentation von externen Substraten gegeben ist. In Verbindung mit der Schaffung eines Marktes für vergärbare Substrate und ggf. einer gezielten Akquisition von Konzentraten aus dem gewerblichen Abwasser im Einzugsgebiet der Kläranlagen könnte dieses Potenzial soweit ausgeschöpft werden, dass die Faulgasproduktion im Mittel verdoppelt wird.

Die Faulgasproduktion kann aber auch durch optimierte Betriebsweise des Faulturms (z.B. Vergleichmäßigung der Schlammzugabe mit stabileren Temperaturen, bessere Umwälzung, stärkere Voreindickung mit höherer Aufenthaltszeit etc.) oder in Einzelfällen durch Desintegration gesteigert werden.

In diesem Szenario wird die Steigerung der Faulgasproduktion durch all diese Effekte, vor allem aber natürlich durch Kofermentation abgeschätzt. Die übrigen Parame-

ter bleiben unverändert. Auch ein Mehrverbrauch an Strom aufgrund einer eventuell gegebenen Rückbelastung, durch erhöhten Schlammanfall oder zusätzliche Aggregate Mischer, Pumpen etc.) wird in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

Annahmen:

- Der spezifische Faulgasanfall von derzeit 19.6 l/EW.d steigt auf 22 / 25 / 40 l/EW.d. (min/ real./ max-Variante).
- Die Kapazität der Anlagen mit Faulung (in angeschlossene EW) wird ebenso wie der mittlere Wirkungsgrad der BHKWs von 30 % beibehalten.

**F 2: Erhöhter Anteil von Faulgas zur Verstromung**

Im Kapitel 3 wurde dargestellt, dass bundesweit nur ca. 60 bis 70 % der Klärgasproduktion mit einem mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 30 % über BHKWs verstromt werden. Dies liegt zum einen daran, dass etwa ein Drittel der Kläranlagen noch kein BHKW besitzt, aber auch daran, dass selbst bei vorhandener BHKW-Kapazität das Faulgas im Winter teilweise nur zu Heizzwecken verwandt wird, um den Zukauf von Heizöl oder Erdgas zu vermeiden. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass durch systematischen Vorrang der Verstromung vor Heizzwecken und einen Zubau von BHKW-Kapazität der Anteil von Faulgas zur Verstromung erhöht werden kann, ohne dass weitere Parameter verändert werden.

Annahmen:

- Der Anteil der Nutzung von Faulgas zur Verstromung wird von derzeit 68 % auf 75 / 90 / 100 % erhöht (min/ real./ max-Variante).
- Die derzeitige Faulgasmenge mit 684 Mio. m<sup>3</sup>/a wird ebenso wie der mittlere Wirkungsgrad der BHKWs von 30 % beibehalten.

**F 3: Verbessertes elektrischer Wirkungsgrad der BHKWs**

Brennstoffzellen sind noch weit von der Marktreife und vor allem der Wirtschaftlichkeit entfernt. Außerdem liegen die Wirkungsgrade bisher nicht wesentlich über denen optimierter konventioneller BHKWs. Diese können bei größeren Anlagen (> 500 kW<sub>el</sub>) inzwischen bis zu 40 % erreichen (s. Fallbeispiel ARA Strass, Jenbacher, 2006).

Selbst für sehr kleine Anlagen im Bereich unter 100 kW sind bereits Wirkungsgrade von 33 bis 35 % möglich. In Verbindung mit der Einführung des ORC-Verfahrens (s. Kap. 4.4.2) könnte der elektrische Wirkungsgrad noch weiter gesteigert werden. Für die kleineren Anlagen (GK 4) sind die Möglichkeiten allerdings begrenzt. Außerdem muss im laufenden Betrieb mit einem geringeren Wirkungsgrad als bei Neuanlagen gerechnet werden. In diesem Szenario wird lediglich der Einfluss eines Ersatzes oder Aufrüstung von ineffizienten BHKWs durch moderne Anlagen konventioneller Bauart (Diesel- und Gas-Otto-Motoren) mit –teilweisem Einsatz von ORC-Anlagen dargestellt, ohne dass weitere Parameter verändert werden.

Annahmen:

- Der mittlere elektrische Wirkungsgrad von BHKWs in GK 4 steigt von 30 % auf 31 / 33 / 35 %.
- Der mittlere elektrische Wirkungsgrad von BHKWs in GK 5 steigt von 30 % auf 33 / 35 / 40 %.
- Die Faulgaserzeugung (19,6 l/EW.d) und der Anteil der Verstromung (68%) werden beibehalten.

**F 4: Mehr Kläranlagen mit Faulung (statt aerober Schlammstabilisierung, GK4)**

In GK 4 wird der Klärschlamm von rund 40 % der angeschlossenen Einwohner aerob stabilisiert. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ergaben aber, dass bei sparsamer Bauweise (z.B. in Anlehnung an die Biogasanlagen) auch schon bei Anlagen für 10.000 bis 20.000 EW eine Faulung wirtschaftlich sein kann. Den politischen Willen vorausgesetzt, wäre also eine sukzessive Umstellung bzw. Ergänzung der Stabilisierungsanlagen auf Schlammfaulung denkbar. Dies könnte auch – wie in Einzelfällen praktiziert – durch Mitbehandlung des Rohschlammes in anderen Kläranlagen geschehen. In diesem Szenario wird die Mehrerzeugung an Faulgas und erzeugtem Strom durch diese Umstellung abgeschätzt, wobei anteilig auch Mitfaulung von Schlamm aus der GK 1 bis 3 unterstellt wird.

Annahmen:

- Der Anteil der Kläranlagen mit Faulung in GK 4 wird von derzeit 60 % der EW auf 70 / 80 / 95 % erhöht.
- Die derzeitige Faulgasmenge von 19,6 l/EW.d) wird ebenso wie der mittlere Wirkungsgrad der BHKWs beibehalten.

## **F 2 und 3: Steigerung der Stromerzeugung im Bestand durch mehr Verstromung mit effizienten BHKWs**

### Annahmen:

- Der Anteil der Nutzung von Faulgas zur Verstromung wird von derzeit 68 % auf 75 / 90 / 100 % erhöht (min/ real./ max-Variante).
- Der mittlere elektrische Wirkungsgrad von BHKWs in GK 4 steigt von 30 % auf 31 / 33 / 35 % und in GK 5 auf 33 / 35 / 40 %.
- Die derzeitige Faulgasmenge mit 684 Mio. m<sup>3</sup>/a bleibt.

## **F 1 bis 3 bzw. 4: Umsetzung aller Möglichkeiten**

Prinzipiell sind die in F 1 bis F 4 beschriebenen Szenarien kombinierbar. Die Kombination ist insofern sogar wahrscheinlicher, als sich Investitionen in neue, größere und effizientere BHKWs eher lohnen, wenn dafür noch zusätzliches Substrat zur Verfügung steht (Schlämme aus Kläranlagen mit aerober Stabilisierung oder externe Abfällen und Konzentrate). Dadurch fällt auch mehr Abwärme an, die eine Nutzung von Faulgas in Heizkesseln überflüssig macht.

Die in F 1 erwähnten, eventuell gleichzeitig anfallenden Mehrverbräuche an Strom werden zumindest teilweise dadurch kompensiert, dass z.B. an anderer Stelle weniger Strom für die aerobe Schlammstabilisierung und dessen Entwässerung oder die Behandlung und Entsorgung der verwerteten Abfälle erforderlich ist. Dies gilt insbesondere für Konzentrate (z.B. aus der Lebensmittelindustrie), die aus dem Abwasserpfad entnommen werden. Daher wird in diesem Szenario unterstellt, dass sich diese Effekte ausgleichen.

### Annahmen:

- Der Anteil der Nutzung von Faulgas zur Verstromung wird von derzeit 68 % auf 75 / 90 / 100 % erhöht (min/ real./ max-Variante).
- Der mittlere elektrische Wirkungsgrad von BHKWs in GK 4 steigt von 30 % auf 31 / 33 / 35 % und in GK 5 auf 33 / 35 / 40 %.

- Die spezifische Faulgasanfall von derzeit 19.6 l/EW.d steigt auf 22 / 25 / 40 l/EW.d. (min/ real./ max-Variante).
- Der Anteil der Kläranlagen mit Faulung in GK 4 wird von derzeit 60 % der EW auf 70 / 80 / 95 % erhöht (min/ real./ max-Variante).

Die **Ergebnisse der Szenarien F1 bis F 4** sind in Abb. 4.5.6 dargestellt und in Kap. 4.5.5 kommentiert.

#### Mehrproduktion durch Faulgasverstromung

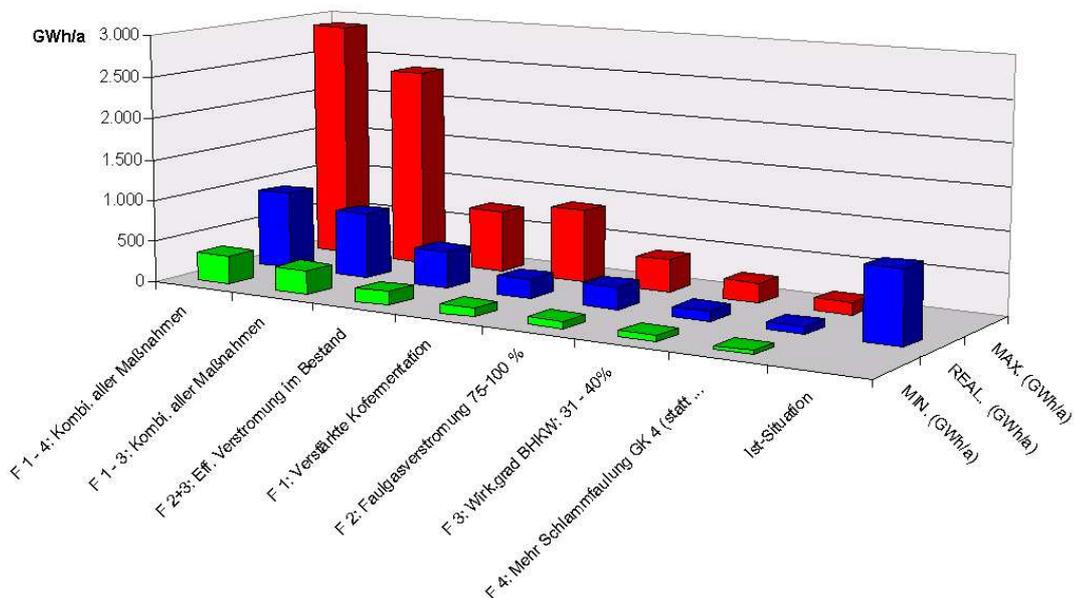


Abb. 4.5.6: Verstromung von Faulgas bei unterschiedlichen Szenarien

### 4.5.5 Bewertung der Szenarien

#### Mehrverbrauch durch neue Techniken

Die Übersichtsgaphik 4.5.1 zeichnet ein eindeutiges Bild über die Energierrelevanz der neuen Techniken. Das Biomembranverfahren (MBR-Verfahren) würde selbst bei vergleichsweise seltener Anwendung (10% der EW) zu einem 36 % höheren Ge-

samtstromverbrauch führen. Eine **flächendeckende Einführung entspräche** sogar einer **Verdreifachung des Strombedarfs** deutscher Kläranlagen.

Selbst die wesentlich stromsparendere Variante der Membranfiltration im Ablauf würde bei ähnlichem Verbreitungsgrad (3 - 10 %) noch zu einem Anstieg des Stromverbrauchs um 2 bis 5 % Prozentpunkte führen. Sie ist aber in jedem Fall aus energetischer Sicht gegenüber MBR-Anlagen zu bevorzugen.

Der Strombedarf einer Klärschlamm-trocknung auf den Kläranlagen wird dagegen nur relevant, wenn diese systematisch (für bis zu 70 % aller EW) eingeführt würde.

Alle anderen Szenarien haben kaum Einfluss auf den Gesamtstromverbrauch. Dies gilt zumindest in der unterstellten Form auch für die Abluftbehandlung, wobei hier in der Praxis große Unterschiede in den gewählten Konzeptionen und deren Stromverbräuchen anzutreffen sind. Daher gelten die getroffenen Annahmen nur, wenn bei der Abluftbehandlung die im Kap. 4.2.3 genannten Aspekte berücksichtigt werden.

### **Klärschlamm-trocknung**

Bei der Klärschlamm-trocknung kann nicht allein der Strombedarf gewertet werden. Maßgeblich für die Energiebilanz ist vor allem die Erhöhung des Heizwertes durch Trocknung vor der Verbrennung sowie die Art der Bereitstellung der Wärme für die Trocknung.

Bei einer Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente unter Berücksichtigung der externen Gutschriften aus einer Klärschlamm-verbrennung wird deutlich, dass selbst bei einer energetisch ungünstigen Konzeption der Schlamm-trocknung noch eine Gutschrift in einer Größenordnung von 500.000 t CO<sub>2</sub>/a zu erwarten ist, wenn der gesamte Klärschlamm thermisch verwertet wird. Wird die Trocknung energetisch günstig, d. h. unter Nutzung von industrieller oder sonstiger Abwärme umgesetzt, dann ist sogar eine Gutschrift über knapp 2 Mio. t CO<sub>2</sub>/a möglich.

Aus diesem Grund ist bei der **Klärschlamm-trocknung** grundsätzlich eine Trocknung am Ort der Verbrennung vorzuziehen, da dort in der Regel Abwärme in größerem Maß zur Verfügung steht. Insbesondere bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

ergeben sich i. d. R. günstigere Lösungen, da auch die Kohle vor der Verbrennung getrocknet werden muss. Die Energieeinsparung für den Transport von getrocknetem statt nur entwässertem Schlamm ist dagegen fast vernachlässigbar, wenn die Entfernungen unter 500 km gehalten werden.

Sofern die Trocknung dennoch auf der Kläranlage stattfinden soll, sind das gewählte Verfahren und die Nutzung von (industrieller) Abwärme oder Solarenergie die wesentlichen Einflussfaktoren. Da bei der Wahl von Standort und Verfahren der Klärschlamm-trocknung aber zahlreiche andere Faktoren maßgeblich sind, die sich nur begrenzt beeinflussen lassen (s. Kap. 5), erscheint die Vorgabe einfacher Kennwerte für die Klärschlamm-trocknung nicht zweckmäßig.

### **Stromeinsparung**

Im Bereich der Stromeinsparung ergibt sich eine eklatante Kluft zwischen dem theoretischen Einsparpotenzial von 2.130 GWh/a bei Erreichen der Zielmarke von 18 kWh/(EW.a) für alle Anlagen einerseits und der Summe der möglichen Einsparungen bei den Hauptverbrauchern andererseits. Im Einzelfall sind zwar deutliche Stromeinsparungen zu realisieren (s. Fallbeispiele). Aber selbst bei sehr optimistischen Annahmen für die erzielbaren Einsparungen bei der Belüftung insgesamt (Halbierung Stromverbrauch bei 30 % der Anlagen) oder Pumpwerken (z.B. 45 % Einsparung für 80 % der EW) erreicht das jeweilige bundesweite Einsparpotenzial von 300 bis 400 GWh/a nicht einmal 10 % des aktuellen Gesamtstromverbrauches. Realistisch sind im Mittel sogar nur 3 bis 5 %.

Damit belegen die Szenarien auch die Erfahrung aus den Feinanalysen, dass eine signifikante Stromeinsparung meist über eine Vielzahl von Optimierungen an den unterschiedlichsten Aggregaten zu erreichen ist und dies von Fall zu Fall unterschiedlich ist. Es müssen dabei auch Ansatzpunkte berücksichtigt werden, die zunächst nicht unbedingt nahe liegend sind, wie eine separate Prozesswasserbehandlung, geänderte Betriebsweise der Sandfilter oder eine Reduzierung des Fremdwasseranfalls.

Viel einfacher stellt sich die Situation bei der Steigerung der **Faulgasverstromung** dar, wo sich aus den Szenarien folgende Schlussfolgerungen ergeben:

- Eine verstärkte Umstellung auf Schlammfäulung in GK 4 hat selbst dann keine große Auswirkung auf die Gesamtbilanz, wenn 95 % der Anlagen dieser Größe mit Faulturm ausgerüstet würden. Trotz der erheblichen Investitionen, die notwendig wären, um diese zusätzliche Kapazität für über 20 Mio. EW neu einzurichten (ca. 1 Milliarde €), hat dieses Szenario das geringste Einsparpotenzial (max. + 16 % bei der Faulgaserzeugung). Eine Umstellung auf Schlammfäulung ist also i. d. R. nur im Zuge von ohnehin fälligen Umbauten und Erweiterungen oder bei Mitbehandlung im Faulturm einer benachbarten KA sinnvoll.
- Die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades der BHKWs auf den aktuellen Stand der Technik ist vor allem interessant in Verbindung mit einer Erhöhung des Anteils der Faulgasverstromung. Wenn also auf Kläranlagen ohne BHKWs der neueste Stand eingeführt würde und ansonsten eine Nachrüstung mit effizienteren Aggregaten innerhalb weniger Jahre erfolgt, ist bei einer vollständigen Faulgasverstromung fast eine **Verdoppelung der Eigenerzeugung möglich, ohne dass mehr Faulgas erzeugt** wird.

Für das bisher ungenutzte Faulgas wäre theoretisch eine zusätzliche BHKW-Kapazität von maximal etwa 60 MW erforderlich, von der mindestens ein Drittel bereits als ungenutzte Kapazitätsreserve vorhanden sein dürfte. Den erforderlichen Neuinvestitionen von geschätzt 100 Millionen € stünden bis zu 75 Mio. €/a an Stromeinsparungen gegenüber (bei 10 ct/kWh).

- Die verstärkte Kofermentation bzw. die Steigerung der Faulgasausbeute im allgemeinen bietet als Einzelmaßnahme das mit Abstand höchste Potenzial. Vor allem in Verbindung mit einer vollständigen Verstromung mit effizienten BHKWs (was ja bei Neueinrichtung der Kofermentation plausibel ist), wäre hier **maximal eine Vervierfachung der erzeugten Strommenge möglich**. Für zusätzliche 300 bis 350 MW BHKW-Kapazität wären weniger als 500 Mio. € Investition erforderlich im Vergleich zu etwa 240 Mio. € Stromeinsparung. Hinzu kommen allerdings ggf. weitere Ausgaben für zusätzliche Einrichtungen zur Aufbereitung und Entwässerung des Substrates.

Gleichzeitig sind hier auch die größten Unsicherheiten über die Diskrepanz zwischen max. Potenzial und realistischer Machbarkeit. Diese Diskrepanz ergibt sich weniger aus dem technisch oder betriebswirtschaftlich machbaren, sondern aus genehmigungsrechtlichen Fragen und der Zurückhaltung der Betreiber von Kläranlagen, in diesen Markt einzutreten. Aber selbst unter der Annahme, dass der Faulgasanfall im Mittel nur auf 25 l/EW.d (+ 27 %) gesteigert und zu 90 % mit einem Wirkungsgrad von 35 % verstromt wird, ist mit zusätzlich 750 GWh/a fast **eine Verdoppelung der Eigenerzeugung an Strom realistisch**. Zahlreiche Kläranlagen haben diese Marke bereits erreicht oder sogar weit überschritten (z.B. Klärwerksverbund Hamburg-Köhlbrandhöft: 1,8 + 0,3 Mio. EW, Faulgasanfall 31 l/EW.d; 100 % Nutzung in GuD-Anlage mit exergetischem Wirkungsgrad von 42 %, siehe Kap. 7.1)

## **5. Wechselwirkungen zwischen Energieoptimierung und Kläranlagenbetrieb**

### **5.1. Art und Bedeutung der Wechselwirkungen**

Da Energieoptimierung nicht primäres Ziel der Abwasserbehandlung ist, müssen die Auswirkungen von Energiesparmaßnahmen auf den Kläranlagenbetrieb regelmäßig geprüft werden. Dies ist auch eine Grundvoraussetzung für die Akzeptanz und Nachhaltigkeit der Energieoptimierung in Kläranlagen. Außerdem ist bei einer gesamtökologischen, d. h. sektorübergreifenden Betrachtung nach IVU-Richtlinie die Verschiebung von umweltschädigenden Einflüssen zwischen den Sektoren Wasser, Boden und Luft zu vermeiden.

Das kann im Einzelfall bedeuten, dass energiesparende Maßnahmen aus übergeordneten Gesichtspunkten nicht zu empfehlen sind. Umgekehrt können Verfahren, die betriebliche oder wirtschaftliche Vorteile bei der Abwasser- oder Klärschlammbehandlung aufweisen, aus energetischen Gründen ungünstig sind. Nachfolgend werden deshalb die Wechselwirkungen wichtiger Ansatzpunkte der Energieeinsparung mit dem Kläranlagenbetrieb und den übrigen Bereichen der IVU-Richtlinie untersucht.

Um die Vielzahl möglicher Wechselwirkungen zu strukturieren, werden zunächst Bereiche im Kläranlagenbetrieb definiert, auf die sich Energiesparmaßnahmen auswirken können und eine grundsätzliche Bewertung und Gewichtung dieser Bereiche vorgenommen. Im Kapitel 5.2 werden dann ausgewählte Wechselwirkungen für die wichtigsten Ansatzpunkte zur Energieeffizienz näher beschrieben. Für die Neuen Techniken wurden die Querverbindungen bereits im Kapitel 4 beschrieben und deshalb hier nicht wiederholt.

### **Einflussbereiche der Energieoptimierung auf Kläranlagen**

#### **1. Reinigungsleistung**

Eine gute Reinigungsleistung ist zunächst einmal das maßgebliche Ziel der Abwasserbehandlung und somit wesentlichstes Kriterium für alle Maßnahmen auf Kläranlagen. Es ist darüber hinaus ein besonders empfindlicher Bereich, weil sowohl das Betriebspersonal als auch die politisch Verantwortlichen an den Ergeb-

nissen in diesem Bereich gemessen und ggf. sogar strafrechtlich dafür zur Rechenschaft gezogen werden. Alle Energiesparmaßnahmen, die eine Verschlechterung der Reinigungsleistung zur Folge haben, sind daher von vornherein ausgeschlossen.

Allerdings zeigt die Erfahrung, dass Energieoptimierung meist dann im Einklang mit einer guten Reinigungsleistung steht, wenn sie eine verfahrenstechnische Optimierung darstellt (Beseitigung versteckter Mängel und ungünstiger Betriebsweisen) und/oder auf einer verbesserten Qualität der eingesetzten Materialien und Aggregate basiert (z.B. Belüftermaterial, energiesparende Motoren). Auch im Bereich der Stickstoffelimination gehen Maßnahmen zur Energieeinsparung (z.B. bei der Belüftung) häufig überein mit einer Verbesserung der Ablaufwerte.

## **2. Betriebsstabilität**

In der Regel können Energiesparmaßnahmen nur in Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal umgesetzt werden. Für den Betreiber ist aber die Betriebsstabilität der Anlage nicht zuletzt im Hinblick auf die Anforderungen an die Reinigungsleistung ein sehr wichtiges Kriterium. Da oft bestimmte Betriebsweisen empirisch aus mühsamer Erfahrung mit vielen Versuchen entstanden sind und sich nicht unbedingt rational begründen oder nachvollziehen lassen, werden Änderungen der Betriebsweise besonders an sensiblen Anlagenteilen (z.B. Faulturm und Belüftung) vom Betreiber mit großer Skepsis betrachtet.

Eine „nur“ energetisch begründete Änderung der Regelkreise, der Umwälzung oder Belüftung etc., wird häufig abgelehnt, weil entweder schon negative Betriebserfahrungen damit vorliegen oder befürchtet werden. Problematisch ist dabei, dass negative Folgeerscheinungen von Eingriffen oft erst Monate oder Jahre später auftreten oder sich nur schleichend bemerkbar machen. Sie können dann auch nicht immer eindeutig einer Maßnahme zugeordnet werden. Typisch dafür sind z. B.

- Änderungen bei der Belüfterregelung, die sich auf die Absetzbarkeit des Belebtschlammes auswirken (Bläh- und Schwimmschlamm-Bildung)
- Verschleißerscheinungen bei Lagern durch häufige Schaltspiele
- Verstopfungsanfälligkeit von Pumpen bei geänderter Drehzahl

Hier ist meist eine Phase der Vertrauensbildung und die Durchführung von Pilotversuchen (eventuell an einzelnen Straßen) erforderlich und sinnvoll. Außerdem ist ohne eine Bereitschaft des Betriebspersonals zu Versuchen (die ja Mehrarbeit bedeuten) Energieeinsparung kaum möglich. Mit zunehmender Personalknappheit ist die Kapazität des Betriebspersonals aber gebunden durch die Bewältigung des täglichen Betriebes und die Beseitigung von Störfällen, die natürlich immer Vorrang haben vor einer Energieoptimierung.

Umgekehrt ist aber die Bereitschaft zu einer Energieoptimierung sehr groß, wenn die Aussicht besteht, dass vorhandene Probleme wie störanfällige Pumpen, überschäumende Faultürme oder schlechte Reinigungsleistung damit beseitigt werden. Kurz gesagt, haben Energiesparmaßnahmen dann große Aussicht auf Erfolg, wenn sie den Betrieb einfacher und stabiler machen, was häufig der Fall ist.

### **3. Kosten**

Bei den Kosten muss zunächst unterschieden werden zwischen der Energieoptimierung im laufenden Betrieb und dem Neubau bzw. wesentlichen Umbau von Kläranlagen, wo Energieeinsparung in die Entscheidungsfindung für die Wahl einer Verfahrenstechnik oder eine Bauweise eingehen kann. Im ersteren Fall sind Energiekosten zwar einer der wenigen Kostenblöcke, die sich noch beeinflussen lassen. Sie sind aber im Vergleich zu den Kapital- und sonstigen Fixkosten nur von untergeordneter Bedeutung, so dass der Spielraum für zusätzliche Investitionen gering ist. Häufig sind Energiesparmaßnahmen zwar kostendeckend, aber nicht so rentabel, dass dadurch eine merkliche Gebührensenkung möglich wäre. Außerdem müssen die erforderlichen Investitionen oft erst in politischen Gremien bewilligt werden, die den potenziellen Einsparungen oft skeptisch gegenüber stehen.

Werden Maßnahmen wie z. B. Kofermentation oder der Einsatz von BHKWs nicht ordnungspolitisch verlangt oder durch politische Willenserklärung der Betreiber gefördert, haben sie daher kaum Chancen auf Umsetzung.

Umgekehrt erfordern Energiesparmaßnahmen konzeptioneller Art oft erhebliche Investitionen in die Anlagentechnik (z.B. Umstellung auf Faulung, Änderung der Belüftungsart), denen keine entsprechenden Einsparungen gegenüberstehen. Daher können diese Veränderungen nur in Zusammenhang mit ohnehin notwendigen Umbauten oder Ersatzinvestitionen realisiert werden (so genannte „abhängige Maßnahmen“). In dem Maße, wie Neu- oder Umbauten selten werden, verringert sich das mögliche Einsparpotenzial.

Hinzu kommt, dass Energiekosten quasi als unabänderliche Sachkosten betrachtet werden, die nicht zu rechtfertigen sind. Allenfalls bei signifikanten Strompreiserhöhungen (wie in den letzten Jahren) wird die Möglichkeit zur Stromeinsparung wieder diskutiert. Eigeninitiative und zusätzliche Anstrengungen des Betriebspersonals zur Energieeinsparung werden allerdings selten honoriert.

In der Summe bedeutet dies, dass Kostenüberlegungen eher begrenzend wirken auf die Energieeinsparung, weil eher die anfänglichen Mehrkosten als die möglicherweise langfristig erzielbaren Einsparungen gesehen werden. Dagegen werden Energiesparmaßnahmen regelmäßig dann interessant, wenn damit gleichzeitig Einsparungen in anderen Bereichen erzielt werden können, z.B. bei den Ersatzinvestitionen für stillgelegte Anlagenteile, bei Wartungs- und Chemikalienkosten oder der Klärschlamm Entsorgung.

#### **4. Menge und Beschaffenheit von Klärschlamm**

Viele Energiesparmaßnahmen betreffen unmittelbar die Menge oder Beschaffenheit des Klärschlammes, weil dieser durch seinen organischen Anteil ein wichtiger Energieträger ist und seine Behandlung viel Energie verbraucht. Neben den bereits o. g. Problemen der Absetzbarkeit und Entwässerbarkeit des Schlammes spielen hier besonders die Anforderungen der Klärschlamm-Entsorger an die Konsistenz des Schlammes und damit verbundene Entsorgungskosten eine wichtige Rolle. Wechselwirkungen ergeben sich durch

- Art der Schlammstabilisierung (aerob oder anaerob)
- Art und Umfang der Entwässerung und Trocknung
- Größe der Vorklärung (Primärschlammanfall)
- Klärschlamm desintegration

## 5. Nährstoff-Rückgewinnung

Energiesparmaßnahmen wirken sich selten auf die Nährstoffrückgewinnung aus. Wichtige Ausnahme ist allerdings die getrennte Prozesswasserbehandlung, die maßgeblichen Einfluss auf die Möglichkeiten der Stickstoff- und Phosphorrückgewinnung hat.

## 6. Arbeitsschutz

Der Arbeitsschutz ist selten ein Argument gegen Energieeinsparung. Allerdings besteht eine gewisse Skepsis gegen die Einführung der Schlammfäulung auf kleineren Kläranlagen, weil man die sicherheitstechnischen Risiken der Faulgas-erzeugung und -verwertung fürchtet.

## 7. Klimagase

Der Einfluss von Energiesparmaßnahmen auf die Klimagase ist meist per se positiv, da die Einsparung von CO<sub>2</sub> ja ein Hauptgrund dafür ist. Allerdings kann es bei der anaeroben Schlammstabilisierung in Ausnahmefällen zu einer verstärkten Emission von Methan kommen (z.B. aus Schlammeindickern oder Schlammwässerung), die im Extremfall die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen überkompensieren kann. Die Faulschlammmentgasung durch Unterdruck sowie die Abdeckung von Schlammspeichern mit Gasrückführung in den Speicher ist in Kläranlagen nicht üblich.

Schwieriger ist die Bewertung der Klärschlammverwertung, da sehr unterschiedliche Bereiche tangiert werden (Energiebedarf für Trocknung, CO<sub>2</sub>-Gutschriften aus Verbrennung, Ersatz von Mineraldünger, Emissionen aus Transport). Die entsprechenden Zusammenhänge wurden bereits im Kap. 4.5.3 über die CO<sub>2</sub>-Bilanz dargestellt.

Ein dritter wichtiger Bereich ist die Emission von stark klimarelevantem Distickstoffmonoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O), das bei bestimmten Milieubedingungen während der Nitrifikation und Denitrifikation im Belebungsbecken freigesetzt wird. Da die Zusammenhänge noch unklar sind und keine eindeutige Wechselwirkung zwi-

schen Energieeffizienz bei der Belüftung und Umfang der N<sub>2</sub>O-Emission besteht, wird dieser Einfluss nicht betrachtet.

## 8. Einsatz gefährlicher Stoffe

Bei den wesentlichen Ansatzpunkten der Energieoptimierung ist kaum ein Einfluss auf den Einsatz gefährlicher Stoffe zu erkennen, da sie weniger die Dosierung von Chemikalien, sondern eher die Konzeption und Betriebsweise von Aggregaten betreffen. Einzige Ausnahme ist künftig möglicherweise die Rückgewinnung von Phosphor aus Prozesswasser und Klärschlamm(asche), bei der teilweise Säuren und Laugen eingesetzt und Schwermetalle remobilisiert werden.

## 5.2. Beschreibung wichtiger Zusammenhänge

Für die wichtigsten Ansatzpunkte zur Energieeinsparung (s. Kap. 3.4 und 4.5) werden nachfolgend die Wechselwirkungen zu den o. g. Bereichen beschrieben und in Tabelle 5.2.1 qualitativ bewertet:

Tab. 5.2.1: Matrix der Wechselwirkungen

	Reinigungsleistung	Betriebsstabilität	Kosten	Klärschlamm	N/P-Rückgewinnung	Arbeitsschutz	Klimagase	Gefährliche Stoffe
Belüftung	+	+/-	+	o	o	o	+	o
Pumpwerke	+/-	+/-	+	o	o	o	+	o
Voreindickung ÜS	+	+	+	+	+	o	+	o
verringerte Faulturm- umwälzung	o	-	o	o	o	o	+	o
Kofermentation	-	-	+	-	+/-	-	+	o
Fremdwasser- reduzierung	+	+	+	+/-	o	o	+	o

### Belüftung

Die Wahl des Belüftungssystems (Oberflächenbelüftung, Tropfkörper, Druckluftbelüftung) bestimmt ganz maßgeblich den Energieverbrauch von Kläranlagen. Die Grundsatzentscheidung wird aber bereits beim Bau der Kläranlage getroffen und

später selten revidiert, da dies mit erheblichen Kosten verbunden wäre. Daher spielen in der Praxis eher Optimierungen im vorhandenen System eine Rolle:

- Qualität + Anordnung der Belüfterelemente
- Gebläseregelung (z. B. über NH<sub>4</sub>)

Wechselwirkungen ergeben sich hier vor allem auf die Betriebsstabilität und die Reinigungsleistung. Grundsätzlich wirken sich alle Einsparmaßnahmen positiv auf die übrigen Bereiche aus, die auf eine Verbesserung der Effizienz der Belüfterelemente abzielen, da sie die Leistungsfähigkeit und Betriebsstabilität erhöhen. Dies gilt in aller Regel auch für die Kosten, da die Mehrkosten für effizientere Systeme oder der frühzeitige Austausch verschlissener Belüfter wegen der hohen Einsparpotenziale meist rentabel sind. Auch die „Überdimensionierung“ der Belüfter im Hinblick auf eine energetisch günstige, niedrige Beaufschlagung mit Druckluft lohnt sich fast immer.

Kritischer ist dagegen die Regelung der Belüftung. Zwar können niedrige Sauerstoffgehalte mit entsprechend geringerem Energieverbrauch auch Vorteile bei der Reinigungsleistung bringen (verstärkte simultane Dentrifikation); oft ist aber bei sehr niedrigen Sollwerten ein höheres Risiko für Bläh- und Schwimmschlamm Bildung gegeben, so dass die Betriebsstabilität gefährdet ist.

Der Einsatz von online-Messungen für Ammonium und die Regelung des Sauerstoffeintrages über die Ammoniumkonzentration hat sich aber auch im Hinblick auf eine bessere Einhaltung der Grenzwerte bei Stoßbelastungen bewährt. Vor allem bei Stabilisierungsanlagen haben sich auch unter bestimmten Umständen Belüftungsregler bewährt, die mit Nitrat- oder Redox-Messungen arbeiten.

### **Pumpwerke**

Bei Pumpwerken werden zwar auch wichtige Einflussfaktoren wie Förderhöhe und Pumpentyp beim Bau bereits weitgehend festgelegt. Aber auch hier sind Optimierungen im laufenden Betrieb und bei Ersatzinvestitionen möglich und oft wichtige Ansatzpunkte:

- Austausch des Laufrades und Nachstellen des Ringspaltes bei Kreiselpumpen
- Verringerung von Förderhöhe, Druckverlusten und Kreislaufführung

Grundsätzlich besteht hier ein Interessenskonflikt zwischen Energieeffizienz und Betriebsstabilität, da energetisch optimale Pumpen- und Laufradtypen meist verstopfungsanfälliger sind. Inzwischen sind aber Pumpentypen auf dem Markt, die diesen Interessenskonflikt zumindest minimieren (s. Abb. 5.2.1). Die hier angegebenen Wirkungsgrade beziehen sich allerdings nur auf den optimalen Betriebspunkt im Neuzustand und können im laufenden Betrieb nicht immer erreicht werden.

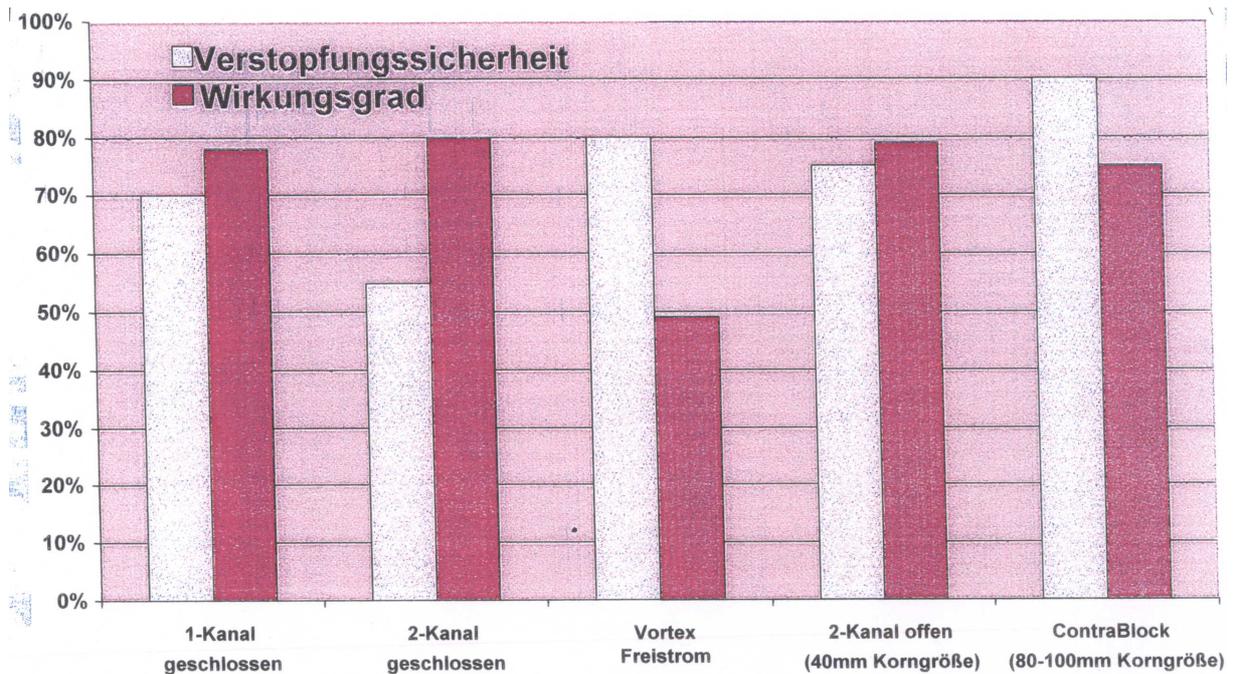


Abb. 5.2.1: Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Verstopfungsanfälligkeit (Werksveröffentlichung Fa. ABS)

Problematisch ist bei der Auswahl der Pumpen, dass bei der Ausschreibung und Vergabe praktisch nur die Anschaffungskosten bewertet werden, während die Gesamtkosten ganz überwiegend (zu 90 bis 95 %) von den Betriebskosten (Energie und Wartung) bestimmt werden. Damit werden etwas teurere Pumpen mit besserem Laufrad oder energieeffizientem Motor regelmäßig benachteiligt. Gleiches gilt für die Bemessung von Rohrleitungen und Armaturen, wo Einsparungen durch kleine Querschnitte später zu erhöhten Druckverlusten führen. Einen Ausweg bietet das Einspar-Contracting, bei dem die zusätzlichen Invest-Kosten vom Contractor übernommen und durch die erzielte Stromeinsparung finanziert werden.

Ein weiterer Konflikt ergibt sich bei der Pumpenregelung: Frequenzgeregelter Kreiselpumpen und Exzentrerschneckenpumpen neigen bei niedriger Drehzahl zu Verstopfung. Damit

werden energieeffiziente Pumpenregelungen häufig zu einem Betriebsrisiko, wenn der Betriebspunkt ungünstig gewählt wurde. In diesen Fällen müssen die Pumpen kleiner ausgelegt oder besser abgestuft werden.

Auf der anderen Seite ergibt sich ein Gleichklang der Interessen für eine regelmäßige Überprüfung des Wirkungsgrades von Pumpen, denn eine Einbuße beim Wirkungsgrad bedeutet nicht nur Energieverlust, sondern meist auch eine Minderung der Förderleistung bis hin zum Versagen eines Pumpwerkes (Überflutung des Pumpensumpfes oder Überhitzung des Motors). Da der Verschleiß von Pumpen gerade im Zulauf oder bei Schlammkreisläufen ein systematisch auftretendes Phänomen darstellt, das kaum überwacht wird, kann man davon ausgehen, dass die meisten Pumpen mit erheblichen Wirkungsgradverlusten arbeiten. Dieser wird in der Regel erst registriert, wenn die Pumpleistung nicht mehr ausreicht.

Daher ist die regelmäßige Überwachung und Dokumentation von Förderleistung und Gegendruck bei betrieblich wichtigen Pumpen nicht nur eine Hilfe zur Energieeinsparung, sondern sichert auch die Betriebsstabilität und Kosteneinsparungen bei der Instandhaltung.

Für den Stromverbrauch von Pumpen ist vor allem die Fördermenge und Förderhöhe maßgeblich. Ersteres kann bei den internen Kreisläufen durch eine veränderte Regelung der Kreislaufführung entscheidend beeinflusst werden, was sich aber positiv oder negativ auf die Reinigungsleistung auswirken kann: Bei der Denitrifikation wirkt sich eine verringerte Kreislaufführung im Prinzip negativ auf die Stickstoffelimination aus. Eine sehr hohe Kreislaufführung kann aber durch Verschleppung von Sauerstoff in die DN-Zone, starke Verdünnung des Abwassers und Verkürzung der Aufenthaltszeiten kontraproduktiv sein. Auch hier gilt der Grundsatz, dass eine Energieoptimierung in erster Linie eine verfahrenstechnische Optimierung sein sollte.

### **Rührwerke**

Bei Rührwerken gibt es einen systematischen Interessenskonflikt zwischen der Minimierung der eingetragenen Energie und der meist gewünschten intensiven Durchmischung. Befürchtungen des Betriebspersonals betreffen vor allem mögliche

Schlamm- und Sandablagerungen auf der Beckensohle sowie Schäden an den Lagern der Rührwerke bei intermittierendem Betrieb.

In welchem Umfang Ablagerungen bei geringerer Sohlgeschwindigkeit akzeptiert werden können und welche Leistungsdichte sich daraus ergibt, lässt sich nur annähernd quantifizieren. Unabhängig von diesem Interessenskonflikt kann auch hier durch Auswahl effizienter Rührwerke (d.h. teurere Langsamläufer mit großem Propellerdurchmesser) und eine strömungstechnisch optimierte Anordnung im Becken erheblich Energie gespart werden. Da diese Aggregate in der Regel kontinuierlich oder zumindest mit hoher Betriebstundenzahl betrieben werden, gilt auch hier, dass sich erhöhte Investitionen schnell amortisieren.

### **Schlammfäulung und Faulgasverwertung**

Das Ziel der Schlammfäulung ist primär nicht die Faulgaserzeugung sondern die (Geruchs-)Stabilisierung der Schlammes und die Verringerung der zu entsorgenden Schlammmenge (TS-Abbau und bessere Entwässerbarkeit). In zweiter Linie spielt auch die Vermeidung von Rückbelastungen durch das Prozesswasser eine Rolle.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich aus den Ansätzen zur Energieeinsparung positive und negative Wechselwirkungen für den Kläranlagenbetrieb:

- Ein erhöhter **Grad der Voreindickung für Überschussschlamm** wirkt sich trotz erhöhter Stromkosten energetisch positiv aus, weil der Wärmebedarf für die Aufheizung im Faulturm deutlich verringert wird. Dies ist vor allem wichtig im Hinblick auf die geringere Wärmemenge, die bei effizienter Faulgasverstromung noch zur Verfügung steht. Gleichzeitig verringert sich dadurch die Rückbelastung mit Prozesswasser aus der Faulschlammwässerung und es werden zusätzliche Kapazitäten durch längere Aufenthaltszeiten im Faulturm geschaffen. Insofern ergeben sich hier positive Wechselwirkungen.
- Beim **Faulturm** ist aus betrieblicher Sicht grundsätzlich eine starke Umwälzung vorteilhaft, weil sie die Betriebsstabilität der Fäulung und den Abbaugrad erhöht sowie Ablagerungen und Schaumbildung vermeidet. Aus energetischer Sicht ist eine schwierige Abwägung zwischen Energieaufwand für die Umwäl-

zung und dem resultierenden Energiegewinn durch höhere Faulgaserzeugung zu treffen. Zeitgetaktete Abschaltungen von Rührwerken wären hilfreich, erhöhen aber den Verschleiß der Lager. Hier muss durch Versuche ein Optimum gefunden werden. Faulgaseinpressung zur Umwälzung ist energetisch günstiger als Rührwerke.

- Die **Kofermentation** stellt für den Kläranlagenbetrieb per se eine Belastung dar, die nur durch zusätzliche Einnahmen bzw. den ökologischen Nutzen gerechtfertigt werden. Neben den betrieblichen Risiken durch Störungen im Faulturmbetrieb ergibt sich dieser zusätzliche Aufwand vor allem durch die Logistik der Substrataufbereitung, Speicherung und Einbringung in den Faulturm sowie die anschließende Entwässerung des Gärrestes. Letzterer kann bei optimalem Substrat (z.B. Fette) nahezu vernachlässigbar sein. Bei stark stickstoffhaltigen Substraten oder schlechter Abbaubarkeit werden jedoch die Rückbelastung der Kläranlage mit Prozessabwasser und die erhöhten Entsorgungskosten zum limitierenden Faktor.

Unter Umständen sind hier interessante Kombinationslösungen möglich, wenn z.B. die vermehrte Rückbelastung mit Nährstoffen aus der Kofermentation (oder KS-Desintegration) über eine Prozesswasserbehandlung (z.B. MAP-Fällung oder Ammoniak-Strippping) aufgefangen wird. In jedem Fall kann eine verstärkte Faulgasproduktion auch die Verstromung über leistungsstärkere und effizientere BHKWs ermöglichen und gleichzeitig die Wärmebilanz in Winterbetrieb ausgleichen.

### **Externe Faktoren**

Energieoptimierung im Sinne einer Systemoptimierung kann unter Umständen auch zu Effekten an ganz unerwarteter Stelle führen bzw. Maßnahmen außerhalb der Kläranlage induzieren. Ein Beispiel für letzteres ist die Fremdwasserreduzierung.

In Abb. 5.2.2 ist der Jahresgang der Abwassermenge und der Faulgaserzeugung einer Kläranlage dargestellt. Aufgrund von Überflutung eines Schachteinlaufes in das Kanalnetz bei erhöhtem Wasserspiegel im Fluss und entsprechend hohen Zuflüssen zur Kläranlage, kam es zu einer regelrechten Ausspülung der Schmutzfracht über

den Regenüberlauf. In der Folge sank nicht nur die Schlammbelastung in der biologischen Stufe und damit der Überschussschlammanfall, sondern auch der Primärschlammanfall in der Vorklärung. Damit brach zwangsläufig auch die Faulgasproduktion über Wochen ein. Die durchgeführte Fremdwasserreduzierung (hier durch Abdichtung des Schachtdeckels) führte dann nicht nur zu deutlichen Einsparungen bei der Pumpenergie sondern auch zur Sicherung der Faulgasproduktion und natürlich zu weniger Gewässerbelastung. Dieses Extrembeispiel lässt sich in abgeschwächter Form häufiger beobachten.

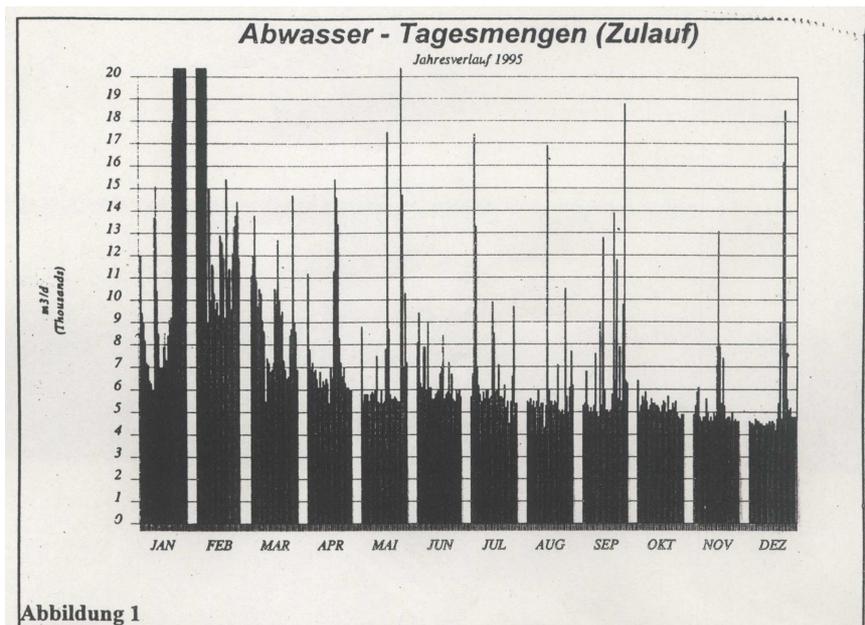


Abbildung 1

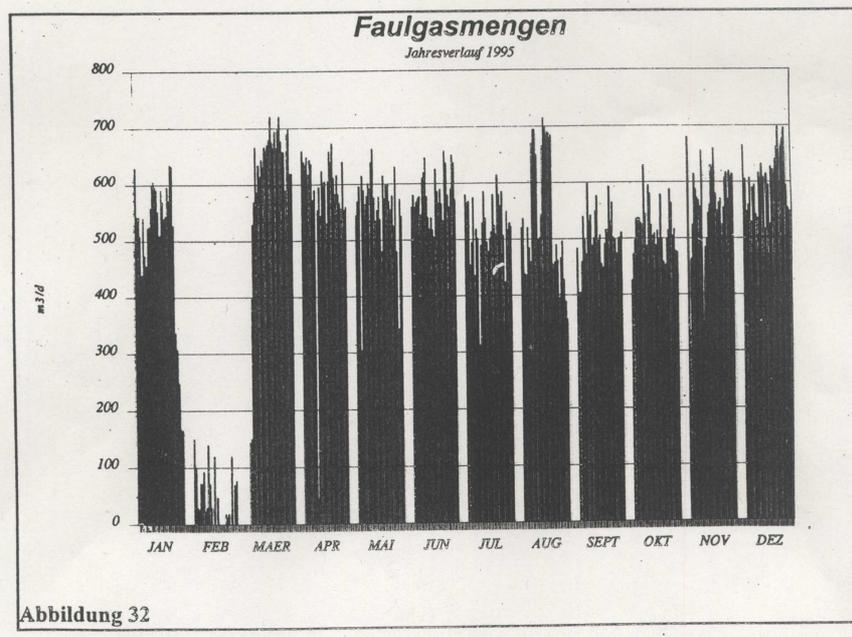


Abbildung 32

Abb. 5.2.2: Zusammenhang zwischen Fremdwasserzufluss und Faulgaserzeugung (Abwassermengen und Faulgasmengen in m<sup>3</sup>/d)

## 6. Definition des Standes der Technik

### 6.1. Methodik zur Festlegung des Standes der Technik

Angesichts der Vielfalt der realisierten Anlagen- und Verfahrenstechniken und der sehr unterschiedlichen Randbedingungen erscheint es zunächst schwierig, einen einheitlichen Stand der Technik hinsichtlich Energieeffizienz festzulegen. Für eine Eingrenzung der Aufgabe sind folgende Punkte zu klären:

1. Wahl geeigneter Kriterien und Bezugsgrößen für Energieeffizienz
2. Frage der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Verfahren, Anlagenkonzeptionen und Größenklassen zur Abwasserbehandlung
3. Begrenzung der Regelungsdichte / Auswahl wesentlicher Verfahrensschritte
4. Berücksichtigung wichtiger (äußerer) Randbedingungen wie Topographie, Anforderungen an Reinigungsleistung etc.
5. Methodik zur Festlegung eines Optimums bzw. von Referenzwerten zur Charakterisierung der bestmöglichen Energieeffizienz
6. Berücksichtigung der technischen Neuentwicklungen im Bestand

Diese Punkte werden nachfolgend kurz erläutert und daraus ein Vorschlag für die gesetzliche Regelung im Abschnitt 6.2 abgeleitet.

#### 6.1.1 Geeignete Kriterien und Bezugsgrößen für Energieeffizienz

In der Fachliteratur über Energieeinsparung in Kläranlagen werden eine Vielzahl von Parametern und Kenngrößen verwendet. Zum einen werden die unterschiedlichen Energieträger (Strom in kWh, Wärme in kJ, Faulgas in m<sup>3</sup>, etc.) oder deren CO<sub>2</sub>-Äquivalente betrachtet. Zum anderen wird der Energieverbrauch oder -anfall auf unterschiedliche Bezugsgrößen und Zeiträume bezogen z. B. auf

- Ausbaugröße der Kläranlage in Einwohnerwerten EW (Nach diesem Parameter werden die Größenklassen der Abwasserverordnung eingeteilt)
- Mittlere Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage oder der biologischen Stufe in  $EW_{BSB5}$

- Behandeltes Schmutz-, Regen-, Gesamtabwasser in m<sup>3</sup>/a oder l/d
- Behandelte Schlammengen in m<sup>3</sup> oder als Trockenmasse (kg TR)

Hinzu kommen weitere verfahrensspezifische Kenngrößen wie

- Eigenversorgungsgrad Strom in %
- Eigenversorgungsgrad Wärme in %
- Spezifische Leistungsdichte von Rührwerken in W pro m<sup>3</sup> Beckenvolumen
- Grad der Faulgasnutzung oder -verstromung
- Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerke in kWh pro m<sup>3</sup> und m Förderhöhe
- Sauerstofftrag der Belüftung in kg O<sub>2</sub>/kWh
- Strombedarf pro Gesamtsauerstoffverbrauch in kWh/GSV
- Elektrische und thermische Wirkungsgrade

Da die Umrechnungsfaktoren stark differieren können und nicht immer angegeben sind (z.B. von Abwassermenge auf Einwohnerwerte), wird ein Vergleich zwischen den Parametern manchmal schwierig. Andererseits haben sich inzwischen durch die einschlägigen Handbücher bestimmte Kenngrößen durchgesetzt, die auch einen gewissen Bekanntheitsgrad beim Betriebspersonal haben.

Für die Definition eines Standes der Technik hinsichtlich der Energieeffizienz wurden bei der Auswahl der Parameter und Kenngrößen Wert gelegt auf folgende Kriterien:

1. Gute Verfügbarkeit von Vergleichsdaten in der Literatur
2. Geringer Aufwand bei der Ermittlung auf der Kläranlage
3. Einfache Anwendbarkeit für das Betriebspersonal
4. Ausreichende Genauigkeit der üblichen Messverfahren
5. Hohe Aussagekraft für die Energieeffizienz der relevanten Prozesse
6. Gewährleistung einer guten Vergleichbarkeit verschiedener Technologien
7. Möglichst geringe Anzahl von Messgrößen und Kriterien

Aufgrund dieser Überlegungen wurde zunächst **als Bezugsgröße**, soweit irgend möglich, immer die mittlere Belastung der Kläranlage im Zulauf, ausgedrückt als **angeschlossene Einwohnerwerte**, verwandt. Dabei ist zunächst sekundär, ob diese Belastung auf Basis der CSB-, BSB<sub>5</sub>- oder sonstiger Schmutzfrachten ermittelt wurde, da hier ohnehin eine Plausibilitätskontrolle mit verschiedenen Berechnungsmodi

durchgeführt werden sollte (s. Kap. 2.3). Sie ist auch für den sonstigen Anlagenbetrieb eine wichtige Größe und ist für die Bemessung und den Energieverbrauch der meisten Aggregate ausschlaggebend. Soweit nicht anders erwähnt, wird die Einheit EW in diesem Bericht immer in dieser Bedeutung benutzt.

Die ebenfalls in der Literatur häufig genutzte Einheit „Ausbaugröße in EW“ ist zwar leichter zu ermitteln, hat aber den großen Nachteil, dass die Vergleichbarkeit kaum gewährleistet ist. Denn der Energieverbrauch korreliert in der Regel eher mit der behandelten Schmutzfracht als mit der Anlagengröße. Auf die Bezugsgröße Abwassermenge wurde in der Regel auch verzichtet, weil hohe EW-spezifische Abwassermengen (z.B. aufgrund von Fremdwasser) zu niedrigen und damit tendenziell zu ungerechtfertigt günstigen Energiekennwerten führen. Erst in zweiter Linie wird z.B. bei Pumpwerken die Fördermenge mit berücksichtigt.

Ein zweiter Grundsatz ist die Betrachtung von Jahresmittelwerten. Für den Energieverbrauch sind kurzzeitige Spitzenwerte irrelevant, auch wenn dies bei den Energiekosten durchaus eine Rolle spielen kann (Lastspitzenmanagement). Daher werden als Bezugsgröße in der Regel die Jahresmengen angegeben, so dass als Standardgröße der **Energieverbrauch pro angeschlossener Einwohnerwert und Jahr (kWh/(EW.a))** gewählt wurde. Dieser kann sich auf die ganze Kläranlage oder einzelne Anlagenteile beziehen. Da aber auf Kläranlagen bisher selten Stromzähler für interne Zwecke eingebaut und abgelesen werden, ist eine stärkere Differenzierung nach Aggregaten mit höherem Aufwand verbunden, obwohl sie wünschenswert wäre.

Als Summenparameter hat sich außerdem der **Eigenversorgungsgrad** mit Strom durchgesetzt, der auch leicht zu ermitteln ist und einen ersten Eindruck von der Gesamtenergiebilanz einer Kläranlage vermittelt.

Bei der Energieerzeugung ist zunächst der **Gasanfall** eine wichtige Bezugsgröße, für den in der Literatur üblicherweise die Einheit **I/EW.d** benutzt wird. Allerdings wird auch hier in der Regel von einem Jahresdurchschnitt ausgegangen. Die Faulgasmessung ist allerdings mit großen Ungenauigkeiten behaftet. Daher ist eine feine Differenzierung bei den Wirkungs- und Nutzungsgraden nicht praktikabel. Die im Handbuch Energie in Kläranlagen z. B. aufgeführte Unterscheidung beim Grad der

gesamten Faulgasnutzung im Bereich von 95 bis 99 % erscheint uns angesichts der Messungengenauigkeiten realitätsfern.

Auch beim Klärgasanfall erscheint uns die Bezugsgröße EW in der Regel sinnvoller als die oTR-Fracht bei der Beschickung der Faultürme, da letztere ebenfalls mit hohen Ungenauigkeiten in der Messung behaftet ist (i. d. R. schwankende TR-Gehalte und Glühverluste) und auf Kläranlagen nur selten bilanziert wird. Außerdem ist bei wechselnden Anteilen von Primär- und Überschussschlamm auch bei gleichem Glühverlust (= oTR-Gehalt) der Gasertrag pro kg oTR unterschiedlich, so dass nicht unbedingt eine Verbesserung in der Vergleichbarkeit erreicht wird. Ist ein hoher oder niedriger Schlammanfall Ursache für Abweichungen beim EW-spezifischen Gasanfall, so sollte dies ohnehin näher überprüft werden.

Der Kennwert „Liter Faulgas/kg zugeführter oTR“ ist allerdings hilfreich, um den Einfluss von externen Substraten bei einer Kofermentation zu berücksichtigen. Bei einer Feinanalyse sollte ggf. eine solche Berechnung angestellt werden.

Zur Bilanzierung der Wärmeenergie stehen auf Kläranlagen kaum Daten oder Messungen zur Verfügung. In der Regel ist lediglich der Bezug an externen Energieträgern (Heizöl, Erdgas etc.) dokumentiert, so dass dieser als erstes Kriterium in **kWh Primärenergie/EW.a** herangezogen wird. Als Zielwert kann aber ein Eigenversorgungsgrad Wärme von 100 % (also Energieautarkie bzgl. Wärme) vorgegeben werden.

Nur in einzelnen Ausnahmefällen werden zur Definition eines Standes der Technik bzw. zur Herstellung von Transparenz bzgl. Energieeffizienz Messgrößen eingeführt, die noch nicht systematisch auf Kläranlagen erhoben werden. Dies erschien uns zur Überwachung der größten Stromverbraucher sinnvoll.

Zum Einen wird dazu angeregt, Stromzähler für die größten Verbrauchergruppen (i. d. R. Gebläsestation und Pumpwerke) einzurichten und die Werte zu dokumentieren. Angesichts der geringen Kosten für Stromzähler erschien uns der Zugewinn an frühzeitiger Information über mögliche Störungen oder Verschleiß lohnend. Zum anderen sollte der Druckverlust der Belüftungseinrichtungen regelmäßig mit Manometern ü-

berwacht werden. Letzteres ist auch im Hinblick auf die Sicherstellung der Reinigungsleistung eine wichtige Hilfestellung, da sie ein späteres Versagen der Belüftung frühzeitig anzeigt.

### 6.1.2 Vergleichbarkeit verschiedener Verfahren und Größenklassen

Dem Praktiker ist sicherlich ein Standardsatz des Betriebspersonals vertraut: „Auf unserer Anlage ist alles ganz anders!“ In der Tat sind kaum zwei Kläranlagen identisch und auch die Abwasserqualität ist keine feste Größe. Um dennoch zu einer Vergleichbarkeit der Energieeffizienz zu kommen, muss geklärt werden, welche der Unterschiede überhaupt für den Energieverbrauch relevant sind und wo auf eine Differenzierung verzichtet werden kann.

Daher wurde bereits im Kapitel 3 erläutert, dass durch die Definition von wenigen Standardverfahren, nämlich im wesentlichen der Unterscheidung zwischen Tropfkörper und Belebungsanlagen mit Faulung oder aerober Schlammstabilisierung, eine ausreichende Aussagekraft für einen ersten Vergleich gegeben ist. Hinzu kommt natürlich, dass zum einen wichtige Annahmen (wie z.B. Abwassermenge/EW) und die Systemgrenzen festgelegt sind, wie im Kap 2.4 dargelegt. Sollten sich dann im Einzelfall starke Abweichungen aufgrund besonderer Randbedingungen ergeben, kann in einer Feinanalyse geklärt werden, inwieweit ein Mehr- oder Minderverbrauch darauf zurückzuführen ist und ob diese beeinflussbar sind.

Problematisch ist allerdings in einigen Fällen die Wahl zwischen **Verfahrens- oder Ziel-bezogenen Kennwerten**. So könnte man z. B. für das Ziel „biologische Abwasserbehandlung mit Nitrifikation“ einen zielbezogenen Kennwert (z.B. Stromverbrauch 7 kWh/(EW.a)) festlegen, der nur von (Tauch-)Tropfkörpern erreicht werden kann. Belebungsanlagen könnten diesen Zielwert aber nicht einhalten und würden systematisch sanktioniert, auch wenn sie aus anderen Gründen bewusst gewählt und energieeffizient konzipiert wurden.

Dies gilt auch für das verfahrenstechnische Ziel der Hygienisierung von Abwasser. Ein zielbezogener Kennwert wäre unabhängig vom angewandten Verfahren (z. B. UV-Bestrahlung, Ozonierung oder Membranfiltration) und müsste sich an der energiesparendsten Lösung (hier UV-Bestrahlung) orientieren. Dabei ergibt sich nicht nur

die Schwierigkeit, unterschiedliche Zielerreichung (z.B. bei der Abtötung von Viren) zu bewerten, sondern auch die Kombination mehrerer Ziele (z.B. Feststoffrückhalt durch Membranfilter, Oxidation von Medikamentenrückständen mit Ozon, etc.) zu berücksichtigen. Ein einheitlicher Zielwert kann dieser Problematik nicht gerecht werden und würde die Verfahrensauswahl in unzulässiger Weise begrenzen.

Da sich der Kläranlagenbetreiber aus übergeordneten Gesichtspunkten unabhängig von der Energieeffizienz für ein bestimmtes Verfahren entscheiden kann, müssen also für wichtige Verfahren im Bestand in jedem Fall verfahrensbezogene Kennwerte festgelegt werden. Auf eine separate Regelung des Energieverbrauches für (Tauch-) Tropfkörperanlagen wird aufgrund ihrer geringen Verbreitung bei größeren KA allerdings verzichtet. Außerdem wird die Energieeffizienz von Tropfkörpern vor allem durch das Beschickungspumpwerk bestimmt und kann über einen Kennwert für Pumpwerke im allgemeinen abgedeckt werden. Unabhängig davon können Empfehlungen für bestimmte Verfahren aus energetischer Sicht ausgesprochen werden, z.B. Priorität für nach geschaltete Membranfiltration, wenn Membranfiltration überhaupt eingesetzt werden sollen.

Ähnliches gilt für die Klärschlammverwertung. Eine Regelung über Kennwerte ist angesichts der Vielzahl an technischen Verfahren und Kombinationen kaum möglich, zumal auch die Systemgrenzen der Betrachtung schwierig festzulegen sind: Gutschriften für die vermiedenen Emissionen bei der Düngerherstellung für P und N oder für die Energiegewinnung bei der Verbrennung und unterschiedliche Transportwege je nach Entfernung der Kläranlage zur nächsten Kraftwerk/Zementwerk machen die Vergleichbarkeit über einfache Kennwerte schwierig.

Daher sollten lediglich wichtige Grundsätze über ordnungsrechtliche Vorgaben und Empfehlungen geregelt werden: So sollte z.B. die Klärschlamm-Trocknung mit ungenutzter Abwärme, also in der Regel nicht auf der Kläranlage, sondern am Ort der Verbrennung durchgeführt werden und die Transportentfernung für Klärschlamm gering gehalten werden.

### 6.1.3 Begrenzung der Regelungsdichte

Da die Energieeffizienz nicht das wichtigste Kriterium für die Abwasserbehandlung ist, sollten die entsprechenden Anforderungen in der Abwasserverordnung in einem überschaubaren Rahmen bleiben. Wesentlich ist bei dieser Betrachtung die Tatsache, dass für die bundesweite Energiebilanz nur die relativ wenigen, großen Kläranlagen wirklich relevant sind, die in der Regel auch sehr ähnliche verfahrenstechnische Konzeptionen aufweisen.

Aufgrund der geringen Bedeutung kleiner Kläranlagen (unter 5.000 EW) für die Gesamtenergiebilanz einerseits und der großen Anzahl existierender Anlagen in diesen Größenklassen andererseits wurde auf die Vorgabe von Standards für GK 1 und 2 verzichtet. Damit wird der Verwaltungsaufwand deutlich eingegrenzt. Es entfällt auch die Problematik der großen Streubreite der Energiekennwerte bei kleineren Anlagen aufgrund des starken Einflusses von Sonderaggregaten (Elektroheizung, Beleuchtung etc.). Umgekehrt kann man davon ausgehen, dass bei größeren Anlagen auch der Aufwand zur Ermittlung und Kontrolle der Kennzahlen, sowie ggf. für eine Feinanalyse eher gerechtfertigt ist. Die Ziel- und Toleranzwerte für GK 3 sind aber im Prinzip auf kleinere Anlagen übertragbar.

Im Abschnitt 3.4 wurden bereits die energierelevanten Verfahren und Anlagenteile aufgrund ihrer Häufigkeit, ihres spezifischen Energieverbrauchs und der wichtigen Ansatzpunkte für eine Energieoptimierung identifiziert. Daraus ergibt sich klar, dass vor allem die Belüftung und die Pumpwerke grundsätzlich wichtige Stromverbraucher darstellen. Diese sollten auch aus Gründen der Betriebsstabilität immer auf Energieeffizienz überprüft werden, so dass sich hier die Vorgabe spezifischer Zielwerte nicht nur aus energetischer Sicht lohnt.

Bei der gesetzlichen Regelung wird dem Rechnung getragen, indem neben dem pauschalen Zielwert für die Kläranlage auch spezifische Zielwerte für die Belüftung und die Pumpwerke angegeben werden. Letzterer bezieht sich auf die Fördermenge und Förderhöhe ( $\text{kWh/m}^3 \cdot \text{m}_{\text{man}}$ ).

Bei hohen Gesamtstromverbräuchen auf Kläranlagen sind aber auch häufig Sonderaggregate oder besondere Verfahrensschritte verantwortlich, die nicht alle mit Kenn-

werten geregelt werden sollten. Diese müssen dann im Rahmen einer Feinanalyse mit Vergleichswerten aus der Literatur bewertet werden und ggf. muss gezielt nach weiteren Ursachen für hohen Stromverbrauch geforscht werden.

#### **6.1.4 Äußere Randbedingungen**

Es ist nicht zu bestreiten, dass „äußere“ Faktoren wie Topographie, Fremdwasseranteil, Verschiebung des N:BSB-Verhältnisses durch Industrieabwasser oder Vorabbau im Kanalnetz, lagebedingte Anforderungen an die Geruchsbekämpfung etc. den spezifischen Energiebedarf im Einzelfall massiv beeinflussen können. Andererseits wird dieser Einfluss meist deutlich überschätzt und ist in den wenigsten Fällen so gravierend, dass eine starke Abweichung von den Zielwerten allein dadurch zu erklären ist. Umgekehrt muss auch in diesen Fällen untersucht werden, ob diese äußeren Randbedingungen nicht in gewissem Umfang beeinflussbar sind (z. B. Fremdwasserbekämpfung, Vorbehandlung Industrieabwasser etc.). Dies gilt insbesondere bei sehr niedrigem Auslastungsgrad der Kläranlagen, der vor allem in den neuen Bundesländern aber auch im übrigen Bundesgebiet manchmal zu ungünstigen Betriebszuständen und damit hohem spezifischem Energieverbrauch führt.

Prinzipiell wäre es denkbar, solche Abweichungen mit einem Zuschlag zu berücksichtigen. Andererseits kann und sollte z.B. der Auslastungsgrad zumindest bei größeren Anlagen durch Stilllegung oder Umnutzung von einzelnen Straßen und Anlagenteilen angepasst werden und dann sogar zu energetischen Vorteilen beim Betrieb führen (s. dazu auch Fallbeispiele, Kap.7).

Ähnliche Überlegungen gelten auch für Fremdwasser. Prinzipiell wird das Vermeiden von Fremdwassereintritten durch Kanalsanierung separat in der Eigenkontrollverordnung (über wiederkehrende Dichtigkeitsprüfungen und Befahrungen) geregelt. In einzelnen Bundesländern (z.B. Bayern) werden auch maximale Fremdwasseranteile im Abwasser vorgegeben oder/und bei der Berechnung der Abwasserabgabe berücksichtigt. Bei Fremdwassereinleitungen aus Hausdrainagen und Außengebietszuflüssen muss dagegen im Einzelfall die Auswirkung auf den Energiebedarf und die Zumutbarkeit von Abhilfemaßnahmen untersucht werden.

Grundsätzlich werden beim Vorschlag für die gesetzliche Regelung Standardannahmen z.B. für die Abwassermenge zugrunde gelegt und Randbedingungen für die Anwendung der Zielwerte definiert. Treten dann im Einzelfall starke Abweichungen von diesen zugrunde gelegten Annahmen auf, kann in einer Feinanalyse nachgewiesen werden, inwieweit dies unbeeinflussbar ist und einen Zuschlag zum Zielwert begründet.

Typischerweise sind Zuschläge für Kennwerte angemessen bei

- Stark erhöhtem spezifischem Abwasseranfall bzw. großer Förderhöhe im Zulauf (z.B. wegen tief liegender Kanalisation): Zuschlag in kWh/(EW.a) ab 300 l/EW.d und/oder > 5 m Förderhöhe; alternativ Vorgabe Stromverbrauch Pumpwerk in kWh/m<sup>3</sup>.m statt kWh/(EW.a))
- Stark verschobenem N/BSB-Verhältnis (> 0,3)

Zusätzliche Verfahrensstufen wie z.B. Sandfilter, Abluftbehandlung, Klärschlamm-trocknung, Membrananlagen werden ohnehin über vorgegebene Zuschläge berücksichtigt.

### 6.1.5 Festlegung der bestmöglichen Energieeffizienz

Für die Festlegung eines „Optimums“ oder Zielwertes sind grundsätzlich verschiedene Ansätze denkbar und in der Literatur auch beschrieben:

1. Ableitung von Kennwerten aus einer **Modellkläranlage** mit Standardbemessung und optimaler Konzeption entsprechend dem Verfahren in den Handbüchern „Energie in ARA“ bzw. „Energie in Kläranlagen“
2. **Zielwerte** für spezifischen Energieverbrauch, empirisch abgeleitet **aus Häufigkeitsverteilungen** im Bestand (z.B. LfU-Handbuch):
  - a. Median/Mittelwert als Mindeststandard (Toleranzwert)
  - b. 20%-Percentilwerte / untere Standardabweichung als Zielwert

In anderen Veröffentlichungen (z.B. Halbach, 1999) wird eine Zielfunktion für den spezifischen Energieverbrauch in Abhängigkeit der Kläranlagen definiert, die sich aus einer Regressionsanalyse von statistischen Untersuchungen zu Energiekosten von Kläranlagen ableiten.

3. **Best-Practice-Prinzip (benchmarking)**: Für einzelne Anlagenteile bzw. ganze Kläranlagen wird der beste bekannte Wert aus der Praxis als Ziel/Optimum definiert.
4. Für einzelne Verfahren werden **technische Standards** festgelegt (z.B. Belegungsdichte der Belüfter, Sauerstofftrag, Laufradtyp/Wirkungsgrad bei Pumpen).

Grundsätzlich kann man festhalten, dass die Definition eines „Optimums“ in jedem Fall problematisch ist angesichts der Fülle technischer Varianten und äußerer Randbedingungen. Ein und dasselbe verfahrenstechnische Konzept kann in einem Fall zu energetisch „optimalen“ Kennziffern führen, während es sich unter anderen Randbedingungen eher als ungünstig erweist. Es bietet sich daher an, von Zielwerten statt von „Optima“ zu reden, da das Optimum nicht eindeutig festgelegt werden kann. Das bedeutet, dass es weder eine mathematische Funktion noch einen genau festgelegten technischen Standard zur Bestimmung des Optimums geben kann.

Die letzten beiden Ansätze (Best-practice-Prinzip und technische Standards) erscheinen deshalb aus unserer Sicht für eine gesetzliche Vorgabe problematisch: Die jeweiligen betrieblichen Belange oder örtliche Randbedingungen können den Einsatz anderer technischer Standards zwingend erforderlich machen und besonders gelungene Einzellösungen sind nicht systematisch übertragbar. Dagegen können solche Angaben als Anregung im Rahmen von Handbüchern oder technischen Hintergrundpapieren durchaus hilfreich sein. In diesem Sinne sollen auch die Fallbeispiele im Kap. 7 verstanden werden.

Man kommt also nicht umhin, einen pragmatischen, d.h. empirischen Ansatz aus der statistischen Analyse von Energieverbräuchen zu wählen, der aber sehr wohl durch theoretische Überlegungen abgesichert bzw. modifiziert werden kann. Die Ableitung von Zielwerten allein aus Häufigkeitsverteilungen birgt nämlich das Risiko, dass der alte Stand der Technik fortgeschrieben wird. Dies gilt auch für Modellkläranlagen, wenn technisch veraltete Bemessungsansätze (z.B. für den Sauerstoffverbrauch) verwendet oder Verbesserungen beim Wirkungsgrad der Aggregate (z.B. für Belüfterelemente, neue Pumpentypen oder Zentrifugen etc.) nicht berücksichtigt werden.

Sinnvoll erscheint uns daher die Ableitung eines Optimums auf der Basis betriebsnaher, optimierter Bemessung (und Nachweis über dynamische Simulation) und bei Einsatz energieeffizienter Aggregate. Der Abgleich mit den praktisch erzielbaren Werten bzw. der Häufigkeitsverteilung spezifischer Energieverbräuche in der jeweiligen Größenklasse dient dann der Plausibilitätskontrolle und kann außerdem unvermeidbare Einbußen der Energieeffizienz im laufenden Betrieb mit erfassen (z.B. durch Verschleiß, Betriebsstörungen oder Teillastbetrieb). Außerdem können aus den Summenhäufigkeiten der spezifischen Energieverbräuche Toleranzwerte abgeleitet werden, die eine erste Eingrenzung der Anlagen mit potenziellem Handlungsbedarfs erlauben. Überschreitungen des Toleranzwertes (der etwa dem Median der Werte entspricht), bedeuten aber nicht zwangsläufig, dass eine Energieoptimierung dringend geboten oder wirtschaftlich machbar ist. Es wird lediglich erwartet, dass der Handlungsbedarf in diesen Fällen vorrangig über eine Feinanalyse untersucht wird. Dies kann selbstverständlich auch bei Einhaltung der Toleranzwerte sinnvoll sein zur Identifikation von Einsparpotenzial.

Diese Vorgehensweise könnte analog zu der Methodik im Bereich Kanalsanierung bzw. Fremdwasserreduzierung umgesetzt werden. Auch dort wird zunächst die Ist-Situation durch Kanalbefahrung in vorgeschriebenen Zeitabständen und jährlicher Ermittlung des Fremdwasseranteils festgestellt und mit Mindestanforderungen verglichen. Der Handlungsbedarf (kurz- bis mittelfristige Sanierungsmaßnahmen) ergibt sich dann im Einzelfall aus der Analyse der jeweiligen Ist-Situation.

In diesem Sinne wurden zum einen die empirisch aus statistischen Erhebungen ermittelten spezifischen Energiekennwerte aus dem LfU-Handbuch, aus der Broschüre „Energieeinsparung in Kläranlagen“ des Impulsprogramms Hessen und anderen Untersuchungen verglichen mit den theoretisch abgeleiteten Kennwerten aus dem NRW-Handbuch „Energie in Kläranlagen“. Zum anderen ergaben sich einige Korrekturen der dort genannten Kennwerte durch die neueren Entwicklungen der Abwassertechnik.

Im wesentlichen wurden für die spezifischen Energieverbräuche von Anlagenteilen die Vorschläge gemäß Musterberechnung für die Modellkläranlage aus dem Hand-

buch „Energie in Kläranlagen“ übernommen. Da die gewählten Kennwerte auch von kleineren Anlagen prinzipiell erreicht werden können, wurde bei den Zielwerten nicht nach Größenklassen differenziert. Folgende Korrekturen und Präzisierungen werden vorgeschlagen:

1. Für die Belüftung wird aufgrund der starken Verbesserungen beim Sauerstoff-ertrag der Belüfter in den letzten Jahren sowie der korrigierten Bemessungs-annahmen für den Sauerstoffverbrauch bei hohem Schlammalter ein niedrige-erer Kennwert angesetzt (10 statt 13,71 kWh/(EW.a), s. dazu auch Tabelle 6.1.1)

Tab. 6.1.1: Leistungstabelle unterschiedliche Belüftungssysteme 1989 - 2001

<b>Sauerstoffertrag <math>\alpha</math> OP (kg O<sub>2</sub>/kWh)</b>	<b>Richtwert- tabelle 1989</b>	<b>Richtwert- tabelle 2001</b>	<b>Richtwert- tabelle 2001</b>	<b>Leistungs- grenzen Belüftungs- systeme</b>
	<b>(CORNEL, P. et al. 2001, WAR 134)</b>			<b>(KAPP, H. 1995 )</b>
	<b>mittlere Werte</b>	<b>günstige Werte</b>	<b>mittlere Werte</b>	
<b>Druckbelüftungssysteme, Reinwasserbedingungen</b>				
Breitbandbelüftung	1,7			
Flächendeckende Elemente	2,4	4,5	3,4	
Flächendeck. Folienplatten	2,9	5,5	4,1	
Umwälzung und Belüftung	2,3	4,2	3,2	
<b>Druckbelüftungssysteme, Betriebsbedingungen</b>				
Breitband- / Linienbelüftung	1,0			1,5
Flächendeckende Elemente	1,4	2,7	2,0	2,5-3,9
Flächendeck. Folienplatten	1,8	3,2	2,5	
Umwälzung und Belüftung	1,4	2,5	2,0	
<b>Oberflächenbelüftungssysteme, Betriebsbedingungen</b>				
Kreisel in Mischbecken	1,2	1,5	1,2	1,0-2,0
Kreisel in Umlaufbecken	1,4	1,9	1,4	
Walzen in Umlaufbecken	1,2	1,5	1,2	

2. Der Stromverbrauch für die gesamte Kläranlage wird ohne Filtration und Abluftreinigung angegeben. Unter Berücksichtigung dieser Korrekturen leitet sich daraus ein Zielwert von 18 kWh/(EW.a) ab (davon ca. 13 kWh/(EW.a) für biol. Stufe, 2,5 kWh/(EW.a) für Schlammbehandlung und 2,5 kWh/(EW.a) für mechanische Stufe und Sonstiges). Diese Marke wird im DWA-Leistungsvergleich Baden-Württemberg für 2005 immerhin von knapp 10 % der Anlagen in GK 5 und in 3 bis 5 % der Anlagen in den übrigen Größenklassen erreicht oder unterschritten. Damit kann man davon ausgehen, dass dieser Wert nicht utopisch ist, sondern unter günstigen Bedingungen sogar unterschritten werden kann.
3. Der Stromverbrauch für Tropfkörper wird nur indirekt über Vorgaben zur Energieeffizienz von Pumpwerken erfasst. Dafür werden die heute möglichen Wirkungsgrade von neuen Laufradtypen mit ausreichender Verstopfungssicherheit für Rohabwasser angesetzt, die einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 0,7 (4 kWh/m<sup>3</sup>.m) ermöglichen. Aufgrund der erwähnten Wirkungsgradverluste im Betrieb wird als Toleranzwert aber ein Wirkungsgrad von 0,45 (6 kWh/m<sup>3</sup>.m) zugelassen.
4. Für den Faulgasanfall bestehen noch erhebliche Unsicherheiten und Widersprüche zwischen den in Umfragen ermittelten Werten einerseits und den theoretisch abgeleiteten Werten andererseits. Bei Umfragen werden als Mittelwerte regelmäßig 20 bis 25 l/EW.d ermittelt. Dieser Wert wurde auch von Loll in der ATV-Schriftenreihe 09 „Biogas, Verwertung und Aufbereitung“, 1997 als „über längere Betriebsperioden bei mittelgroßen und großen, verfahrenstechnisch optimal betriebenen Anlagen erreichbarer Wert“ angegeben. Für Großanlagen wurden sogar bis zu 33 l/EW.d als optimaler Wert angegeben (was auch im Fallbeispiel Hamburg erreicht wird).

Nach den theoretischen Betrachtungen von Kapp (Energiebilanzierung auf Kläranlagen, 1999) wären für die heute üblichen Anlagentypen mit 10 bis 15 Tagen Schlammalter und einer relativ kleinen Vorklärung höchstens 15 bis 20 l/EW.d an Klärgas zu erwarten. Diese Mengen werden auch vom DWA-Fachausschuss Biogas inzwischen als Richtwerte angegeben.

Dagegen hat Temper (Biogastage Marburg 2006) aus Labor- und halbtechnischen Versuchen für übliche Betriebsbedingungen in Faultürmen Gasmengen von rund 500 l/kg oTR<sub>zugeführt</sub> nachgewiesen. Bei einem Schlammfall von 75 bis 80 gTR/EW.d und einem Glühverlust von 65 bis 70 % ergibt sich daraus ein Gasanfall von 24 bis 28 l/EW.d. Damit werden die Umfragewerte auch theoretisch plausibel. Offensichtlich wurde bei früheren Ansätzen der Abbau-grad unterschätzt.

Auf der Basis der letztgenannten Literaturwerte, den Ergebnissen der verschiedenen Umfrageergebnisse und angesichts der Tatsache, dass der Klärgasanfall bei gleich bleibender Anzahl der Kläranlagen nach wie vor jährlich steigt, wird als Zielwert daher 30 l/EW.d festgelegt. Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten wird aber ein relativ niedriger Toleranzwert von 20 l/EW.d gewählt.

5. Für die Faulgasverwertung wurde ein Wirkungsgrad für die Stromerzeugung von 33 (GK 4) bis 38 % (GK 5) bezogen auf einen Heizwert des Faulgases von 6 kWh/m<sup>3</sup> angenommen. Daraus ergibt sich eine maximal mögliche Eigenenerzeugung von 21,7 bzw. 25 kWh/(EW.a), die selbst bei einer leichten Überschreitung des Zielwertes für den Stromverbrauch für einen Eigenversorgungsgrad beim Strom von 100 % ausreichend wäre. Die Energieautarkie im Jahresmittel bzgl. Strom wird daher ebenfalls als Zielwert gesetzt.

### **6.1.6 Berücksichtigung der technischen Neuentwicklungen**

In der Regel erscheint uns bei der vorgeschlagenen Methodik eine Differenzierung nach Bestand und Neubau weder sinnvoll noch erforderlich, zumal Neuanlagen nur noch selten gebaut werden dürften. Die Ermittlung der Ist-Situation und die Definition des Optimums sind in beiden Fällen gleich. Inwieweit im Bestand die neueren Entwicklungen hinsichtlich Energieeffizienz technisch machbar und wirtschaftlich zumutbar sind, kann bei Überschreiten der Toleranzgrenze ohnehin in einer Feinanalyse nachgewiesen werden. Häufig betreffen diese Maßnahmen aber Ersatzinvestitionen, die nach 5 bis 10 Jahren erforderlich werden (z.B. Austausch der Belüfterelemente oder der Pumpenlaufräder), so dass die energiebedingten Mehrkosten gering sind.

Aufgrund der gewählten Methodik zur Festlegung von Ziel- und Toleranzwerten ist eine flexible Anpassung an die technische Weiterentwicklung einfach möglich. Die Toleranzwerte können in dem Maße abgesenkt werden, wie neuere energieeffiziente Techniken auf dem Markt sind und im Bestand integriert werden.

Eine schnelle Veränderung der Ziel- und Toleranzwerte ist aber nicht zu erwarten, da keine dramatischen Verbesserungen oder Veränderungen der Abwassertechnik zu erkennen sind. Da Neu- und größere Umbauten selten geworden sind, können grundlegende Veränderungen bei der Technik nur langsam im Bestand umgesetzt werden.

Auch bei Neuanlagen kann nicht ohne weiteres der Zielwert als strikte Vorgabe gesetzt werden. Allerdings könnten bei Neubauten oder wesentlichen Erweiterungen folgende zusätzliche Anforderungen gestellt werden:

- Nachweis der Energieeffizienz über eine Feinanalyse in der Planungsphase und Umsetzung aller energiebedingten (abhängigen) Maßnahmen mit Kosten/Nutzen-Faktor bis 1
- Prüfung Tropfkörper als energiesparende Technik
- Anaerobe Schlammstabilisierung mit Vorklärung ab 10.000 EW soweit wirtschaftlich zumutbar

### **6.1.7 Wichtige Schlussfolgerungen**

Aus den o. g. Kriterien und methodischen Überlegungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die gesetzliche Regelung des Standes der Technik hinsichtlich Energieeffizienz:

#### **→ Transparenz herstellen**

Durch die Vielfalt der eingesetzten Verfahren und die begrenzte Vergleichbarkeit ist es von großer Bedeutung, zunächst eine Transparenz der Energieverbräuche auch innerhalb der Kläranlage herzustellen. Dadurch wird es möglich, die meist ähnlich konzipierten Hauptverbraucher (Belüftung, Pumpwerke etc.) mit spezifischen Zielwerten zu vergleichen und die Ursachen für überhöhte Energieverbräuche besser einzu-

grenzen. Außerdem schafft Transparenz bereits ein Problembewusstsein, das zu Einsparungen anregt. Diese Beobachtung lässt sich jedenfalls in anderen Bereichen machen (z.B. Wassereinsparung durch Einbau und Ablesung von Zählern).

### → Bedeutung von Ziel- und Toleranzwerten

Zur Einordnung der ermittelten Energiekennwerte müssen diese zunächst mit dem anzustrebenden Ziel verglichen werden. Der Toleranzwert erlaubt dann eine Abschätzung, ob der Grad der Zielerreichung auf der eigenen Anlage im Vergleich mit den übrigen Anlagen akzeptabel oder stark verbesserungswürdig ist, also eine Art benchmarking. Wichtig ist, dass weder der Ziel- noch der Toleranzwert den Charakter von Grenzwerten haben, deren Überschreitung zwangsläufig Sanktionen auslösen, sondern lediglich einer ersten Positionierung dienen. Der Handlungsbedarf ergibt sich dann unabhängig davon in einer Betrachtung des jeweiligen Einzelfalls und kann bei gleichen Kennwerten zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führen.

## 6.2. Vorschlag zur gesetzlichen Regelung der Energieeffizienz

Als methodischer Ansatz für Vorgaben in der Abwasserverordnung wird auf der Grundlage der Überlegungen im vorigen Kapitel ein Dreierschritt vorgeschlagen, bei dem i. d. R. Neubau und Bestand gleich gestellt sind:

1. **Transparenz sicherstellen:** Erfassung der Großverbraucher (Gebläse, Pumpwerke, Rührwerke; min. 70 % des Stromverbrauchs der Kläranlage) über separate Stromzähler und Ermittlung der unten genannten Einwohnerspezifischen Energiekenngrößen (Ist-Werte) im Rahmen der Eigenkontrolle.
2. **Vergleich der Ist-Werte mit „Ziel-“ und „Toleranz-Werten“** für die Energieeffizienz in der jeweiligen Größenklasse: **Zielwerte** bilden ein Optimum ab, das unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen nicht von allen Kläranlagen mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erreicht werden kann. Zusätzliche Verfahrensstufen gegenüber Standard (z.B. Sandfilter, Membrananlagen, Hygienisierung Ablauf) werden über Zuschläge bei den Zielwerten berücksichtigt. **Toleranzwerte** beschreiben den Stand der Energieeffizienz, der üblicher-

weise bei optimierter Betriebsweise von Kläranlagen mit vertretbarem Aufwand erreicht werden kann.

3. **Ermittlung des kurz- bis mittelfristigen Handlungsbedarfs:** Liegen die Ist-Werte innerhalb der Toleranzwerte oder sind (z. T. in GK 3) keine Toleranzwerte vorgegeben, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass kein großer Handlungsbedarf besteht, auch wenn eine weitere Optimierung möglich ist. Bei Überschreitung der Toleranzwerte muss im Einzelfall nachgewiesen werden, ob eine Verbesserung der Energieeffizienz mit vertretbarem Aufwand möglich ist oder besondere Randbedingungen zu ungünstigen Werten geführt haben. Der Nachweis erfolgt in der Regel durch eine Feinanalyse nach den Standards des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“. Erst wenn die zumutbaren Optimierungen nicht in angemessener Zeit umgesetzt werden, kommen Sanktionen in Frage.

#### **Festlegung Ziel-/Toleranzwerte:**

Gemäß den Überlegungen in den vorangegangenen Abschnitten werden für die Energieeffizienz in Kläranlagen sowohl Summenparameter für die gesamte Kläranlage als auch anlagenspezifische Parameter für wichtige Verbraucher vorgeschlagen. Die entsprechenden Ziel- und Toleranzwerte sollen zunächst nur auf Kläranlagen der Größenklassen 3 bis 5, in Teilbereichen sogar nur für GK 4 und 5 angewandt werden, um den Arbeits- und Verwaltungsaufwand zu begrenzen und die Verhältnismäßigkeit von Aufwand und möglichem Gewinn zu gewährleisten. Sie können aber auf freiwilliger Basis auch auf die übrigen Anlagen übertragen werden.

Der Toleranzbereich (und ggf. auch der Zielwert) kann in gewissen Zeitabständen angepasst oder von vornherein zeitlich gestaffelt werden (Übergangswerte).

Zu beachten ist, dass für die Zuordnung zu einer Größenklasse die Ausbaugröße (in kg BSB<sub>5</sub>/d oder EW) maßgeblich ist, während für die Berechnung der Kennwerte die tatsächliche anfallende Schmutzfracht (ebenfalls in EW) herangezogen wird.

Es werden Werte vorgegeben für:

1. **Stromverbrauch** in kWh/(EW.a) für Standardanlagen

Nur bei Anlagen mit Faulung :

2. **Eigenversorgungsgrad Strom** in %
3. **Externer Wärmebezug** in kWh/(EW.a)
4. **Klärgasanfall** in l/EW.d

Parameter für wichtige Verbrauchergruppen:

5. **Belüftung Belebungsbecken, GK 3 - 5:**
  - Stromverbrauch in kWh/(EW.a)
6. **Pumpwerke, GK 4 + 5 und alle Tropfkörper:** Stromverbrauch im Hauptstrom (Zulauf, Rücklaufschlamm, interne Kreisläufe) sowie in der Faulturmumwälzung in kWh/1.000 m<sup>3</sup>. m<sub>man</sub> (bzw. Wh/m<sup>3</sup>.m). Ausrüstung mit Manometer und Durchflussmessung.

Hinzu kommen Zuschläge für die besonderen Verfahrensstufen, die sich zum Zielwert für die gesamte Kläranlage addieren (bzw. vor Berechnung des Eigenversorgungsgrades abgezogen werden). Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 6.2.1 zusammengefasst.

Die Werte aus Tabelle 6.2.1 gelten unter folgenden Annahmen:

- Gesamtabwassermenge 91 m<sup>3</sup>/EW.a bzw. 250 l/EW.d
- Förderhöhe Zulaufpumpwerk ≤ 3 m
- N/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis im Zulauf < 0,2

### **Ermittlung des Handlungsbedarfs / Sanktionen:**

Wird die Toleranzgrenze überschritten, ist eine Feinanalyse innerhalb von zwei Jahren zu erstellen; Umsetzung der Sofortmaßnahmen mit Kosten-Nutzen-Faktor < 1 innerhalb von weiteren zwei Jahren, ggf. Zeitplan für Umsetzung weiterer, abhängiger Maßnahmen. Werden die Maßnahmen in den Folgejahren nicht umgesetzt, entfällt die Ermäßigung der Abwasserabgabe.

Werden Kennwerte Nr. 1 und 2 wegen zu hohem Abwasseranfall (Fremdwasser) überschritten, so ist in der Feinanalyse zu prüfen, ob der Fremdwasseranfall im Einzugsbereich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand verringert werden kann.

Tab. 6.2.1: Zielwerte und Toleranzbereich für Energieverbrauch

Kennwert Nr.	Anlage/ Anlagenteil	Parameter	Kennwert Einheit	Zielwert Toleranz- werte (Beispiele)		
				GK 3-5	GK 3	GK 4/5
1	Kläranlage insge- samt	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	18,0	35,0	30,0
2	Kläranlage mit Faulung	Eigenversorgungsgrad Strom	%	100,0	-	60,0
3	Kläranlage mit Faulung	externer Wärmebezug	kWh/(EW.a)	0,0	-	3,0
4	Faulung	Menge Faulgas <sup>1)</sup> (bei Normbedingung)	l/EW.d (Nm <sup>3</sup> /EW.a)	30,0 (11)	-	20,0 (7,3)
5	Belüftung Bele- bung	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	10,0	18,0	16,0
6	Pumpwerke	Stromverbrauch	Wh/m <sup>3</sup> .m	4,0	-	6,0
<b>Zuschläge</b>						
Zu 1 / 2	Flockungs- filtration / Sandfil- ter im Ablauf	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	2,0	-	4,0
Zu 1 / 2	Membranfiltration	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	9,0	14	14
Zu 1 / 2	Biomembrananlage anstelle biol. Stufe	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	82	130	120
Zu 1 / 2	Klärschlamm- trocknung	Stromverbrauch	kWh/(EW.a)	2	-	4
Zu 1 / 2	Abluftbehandlung	Stromverbrauch	kWh pro 1.000 m <sup>3</sup> /h	1	2,5	2

1) Die Menge an Faulgas aus der Kofermentation (Richtwert 500 l/kg oTR) darf voll auf die gesamte Faulgasmenge angerechnet werden.

#### Vorschläge bei Neu- oder Umbauten:

- 1) Klärschlamm-trocknung nur über solare Trocknung oder KS-Vererdung bzw. mit ungenutzter Abwärme (z. B. Abwärme aus Biogasanlagen, Kraftwerken oder Zementwerken)
- 2) Anaerobe Schlammstabilisierung mit Vorklämung, sofern Umstellung wirtschaftlich vertretbar
- 3) Einsatz von EFF1-Motoren bei Motoren-/Aggregatetausch obligatorisch (oder über EuP-Richtlinie s. unten)

### Zusätzliche Empfehlungen

Neben den o. g. Zielwerten und Vorgaben gibt es einige Ansatzpunkte für eine Energieoptimierung, die schlecht quantifizier- oder regelbar sind bzw. den Rahmen der Abwasserverordnung sprengen. Sie werden nachfolgend als zusätzliche Empfehlungen aufgeführt:

- Regelmäßige Fortbildung des Betriebspersonals über energieeffizienten Betrieb (z. B. im Rahmen der KA-Nachbarschaften)
- Bei Abluftbehandlung: möglichst engräumige Abdeckung geruchsbelasteter Bereiche zur Verringerung des erforderlichen Luftaustausches
- Ein großes Hemmnis für die Kofermentation ist die unterschiedliche Vergütung von Strom aus Klärgas (7,6 ct/kWh) und Biogas (insbesondere aus NawaRo bis zu 17,5 ct/kWh). Sinnvoll wäre eine Neuregelung analog zum neuen Stromvergütungsgesetz in der Schweiz, in dem Bio- und Klärgas gleichgestellt sind. Zumindest sollte dies für die den zusätzlichen Stromanteil gelten, der aus Kofermentation resultiert. Außerdem wäre eine bundesweit einheitliche und transparente Regelung für die rechtliche Bewertung der Kofermentation hinsichtlich der Mitbehandlung von Abfällen auf Kläranlagen und der seuchenhygienischen Anforderungen an die Vorbehandlung sehr hilfreich.
- Ordnungspolitische Regelung für den Transport von Klärschlamm: z.B. maximale Transportentfernung bei wirtschaftlicher Zumutbarkeit.

Die folgenden Punkte sollten über die **Eigenkontrollverordnungen** geregelt werden:

- Druckmessung in Druckluftleitung mit monatlicher Ablesung bei definierter mittlerer Gebläse-Auslastung, Vorgabe geeigneter Manometer und Druckverlust kleiner 60 mbar.
- GK 5: Bestimmung des Sauerstofftrags unter Betriebsbedingungen alle 5 Jahre
- Faulgasmengenmessungen sind im Rahmen der Hauptuntersuchung der Gasinstallation gemäß Betriebssicherheitsverordnung zu überprüfen: Max. Abweichung 10 % v. Messwert.

- Für die Ermittlung der durchschnittlichen Belastung der Kläranlage sollen wöchentlich gemessene 24 h-Mischproben zugrunde gelegt werden, so dass gemäß DWA A 198 mindestens 30 bis 40 Werte pro Jahr vorliegen.

Im Juli 2005 wurde vom Ministerrat die „EUP-Richtlinie“ verabschiedet („Energy Using Products; Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte“), auf deren Basis u. a. Normen für Elektromotoren bis 150 kW entwickelt werden sollen. In einer weiteren Richtlinie zur Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006) wird jedes Mitgliedsland verpflichtet, bis 01.07.2007 einen Aktionsplan vorzulegen, mit dem der jährliche Energieverbrauch bis 2016 um 9 % verringert werden soll. In diesem Zusammenhang könnte der EFF 1-Standard für Elektromotoren eingeführt werden.

## 7. Einsparpotenzial und betriebliche Realität

### 7.1. Energieautarkie auf Kläranlagen: Visionär oder utopisch?

#### 7.1.1 Grundsätzliche Überlegungen

Auf der Grundlage des Standes der Technik hinsichtlich Energieeffizienz gemäß Kap. 6.2 und der Analyse der Ist-Situation (Kap. 3) ist das theoretische Einsparpotenzial klar definiert und wurde in den Szenarien im Kap. 4.5 auch quantifiziert:

- Der Stromverbrauch aller Kläranlagen könnte von derzeit 4.400 auf theoretisch 2.300 bis 2.500 GWh/a fast halbiert werden (bei 18 -20 kWh/(EW.a) für alle Anlagen)
- Die Eigenstromerzeugung von derzeit 865 GWh/a könnte mit relativ geringem Aufwand verdoppelt und unter Ausschöpfung aller Möglichkeiten einschließlich Kofermentation auf rund 3.700 GWh/a mehr als vervierfacht werden.
- Energieautarkie bzgl. Strom und Wärme wäre damit – theoretisch – erreichbar und unter Berücksichtigung externer Substrate sogar eine Überschussproduktion an Strom möglich.

Die Frage ist allerdings, warum der Stromverbrauch der Kläranlagen in den letzten Jahren trotz zahlreicher Bemühungen und Förderprogramme nicht nennenswert zurückgegangen oder - wie in der Schweiz - sogar angestiegen ist und die Faulgasverstromung sich – trotz klarer Verbesserungen - immer noch auf relativ niedrigem Stand bewegt.

Einige der Gründe wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits angesprochen. Die Hemmnisse und limitierenden Faktoren für eine Energieoptimierung sollen aber in diesem Abschnitt einer systematischen Analyse unterzogen werden, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die weitere Umsetzung der Energiesparmaßnahmen abzuleiten.

Dazu werden zunächst einige Fallbeispiele für gelungene Einzelmaßnahmen und Gesamtoptimierungen vorgestellt, die zum einen belegen sollen, dass die genannten Zielwerte nicht nur utopische Theorie, sondern praktisch erzielbare benchmarks sind.

Auf der anderen Seite sollen anhand dieser Beispiele auch allgemeine Grundsätze über die Voraussetzungen für eine gelungene Energieoptimierung abgeleitet werden.

Eines wurde bereits bei der Suche nach Fallbeispielen deutlich: Es gibt viele Veröffentlichungen über zum Teil hohes Einspar-**Potenzial**, aber relativ wenig gut dokumentierte Berichte über die **tatsächlich erreichten** Einsparungen. Dies liegt wohl auch daran, dass die üblichen Einsparungen im Bereich weniger Prozentpunkte nur schwer aus den großen Schwankungsbreiten des Stromverbrauchs herausdestilliert werden können und meist von anderen Veränderungen im Betrieb überlagert werden.

### 7.1.2 Fallbeispiele für Energieoptimierung

#### Fallbeispiel Kläranlage Strass, Österreich

##### Basisdaten:

**Name:** Kläranlage Strass, Österreich

**Betreiber:** AIZ-Abwasserverband

**Mittlere Belastung:** Anstieg von 89.000 EW in 1996 auf 140.000 EW in 2005 (mit Anstieg von Stromverbrauch und Gasanfall im Betrachtungszeitraum)

**Anlagentyp:** A-B-Verfahren (Hochlast-/Schwachlastbelegung) mit Faulung

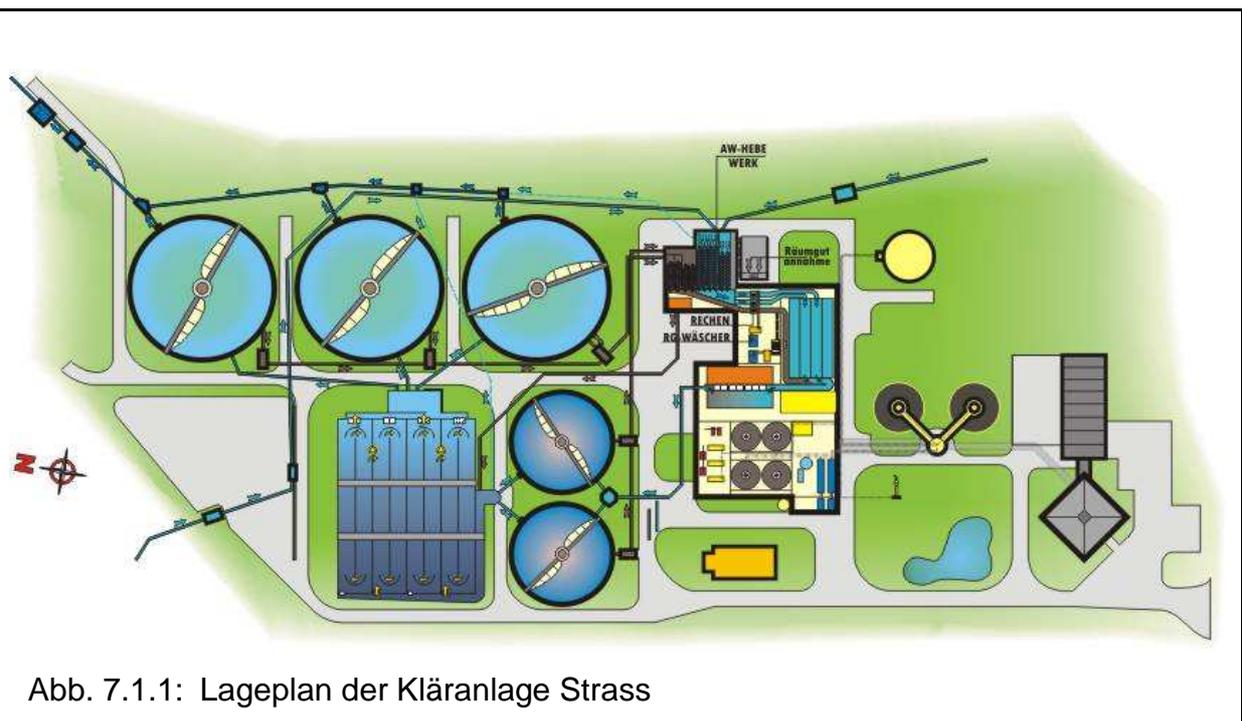


Abb. 7.1.1: Lageplan der Kläranlage Strass

### **Energieoptimierte Grundkonzeption der Anlage**

Wahl einer 2-stufigen biologischen ARA nach dem A-B-Verfahren, dadurch gute Anpassungsmöglichkeiten der Betriebsweisen an die stark schwankenden saisonalen Belastungsverhältnisse des Tourismus.

Wahl eines sehr energieeffizienten Belüftungssystems (Messner-Platten) mit hohen Sauerstoffertragswerten und der Möglichkeit des verstopfungsfreien Abschaltens.

Getrennte biologische Prozesswasserbehandlung mit SBR für das Filtrat aus der Schlammwässerung.

### **Spätere Maßnahmen zur Energieoptimierung**

1996: Regelung der Belüftung der B-Biologie über Online-Analyzer für  $\text{NH}_4\text{-N}$  bzw.  $\text{NO}_3\text{-N}$  mit einem oberen  $\text{O}_2$ -Grenzwert von 1,8-2,0 mg/l.

1996: Interne Rezirkulationspumpen in der B-Biologie für die direkte und effiziente Rückführung von  $\text{NO}_x\text{-N}$  in die Denitrifikationszonen.

1996 Kofermentation von anfänglich nur Fäkalschlämmen aus Hausklärgruben, - 2005 dann auch Fettabscheiderinhalte (ab 2000) und Pilzmycel aus chemischer Industrie. Der rechnerische zusätzliche Gasanfall beträgt etwa 260  $\text{m}^3/\text{d}$ , entsprechend unter 10 % des Gesamtanfalls.

2000 Optimierung der Überschussschlammwässerung mit Scheibeneindicker, der über 9 Monate energie- und verbrauchsoptimiert wurde.

2001 Neues BHKW (JMS 208 GS) mit einer Leistung von 340  $\text{kW}_{\text{el}}$  und einem elektrischen Wirkungsgrad von knapp 40 %. Die spezifische Gasausbeute stieg von 2,05  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$  (Mittel aus 1996-2000) auf 2,32  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ . Weitere motorische Optimierung der BHKWs in den Folgejahren

2001 Umstellung bei der Schlammwässerung von Kalk-Eisen- auf Polymerkonditionierung.

2001 bis 2004 - Auswechslung sämtlicher Belüfterfolien der Plattenbelüfter.

02/04 Umstellung bei der separaten Prozesswasserbehandlung im vorhandenen SBR auf das DEMON-Verfahren (Deammonifikation): Die aufgewendete Energie für den Ammonium-Abbau lag vorher im Bereich von 2,8 kWh/kg  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{abgeb.}}$  (B-Biologie = 7,5 kWh/kg  $\text{NH}_4\text{-N}_{\text{abgeb.}}$ ). Durch die Umstellung sank der Wert nochmals auf unter 1 kWh/kg N.

2004 Verkürzung des Schlammalters von 21 auf 14 Tage und Verringerung der Rücklaufschlammführung auf unter 100 %. Diese Maßnahme wurde erst möglich durch verbesserten Schwimmschlamm- und Fettabzug. Dadurch auch Anstieg der Faulgasproduktion.

2004 Austausch des Biofiltermaterials → geringerer Filterwiderstand bei der Abluftreinigung.

Die entsprechende Entwicklung von Stromverbrauch und Eigenerzeugung bis hin zur 2005 erreichten Energieautarkie zeigen die nachfolgenden Diagramme. Im langjährigen Vergleich ergeben sich folgende Veränderungen:

- Der spezifische Stromverbrauch sank von 32 kWh/(EW.a) (1992/95) auf nur noch 20,5 kWh/(EW.a) in 2005 (minus 36 %) inkl. Abluftbehandlung.
- Der Eigenversorgungsgrad stieg von 31 % in 1992 auf 108 %,
- Faulgasanfall von 13,6 in 1992 auf 26 l/EW.d in 2005 gesteigert, davon unter 10 % Aufgrund von Kofermentation

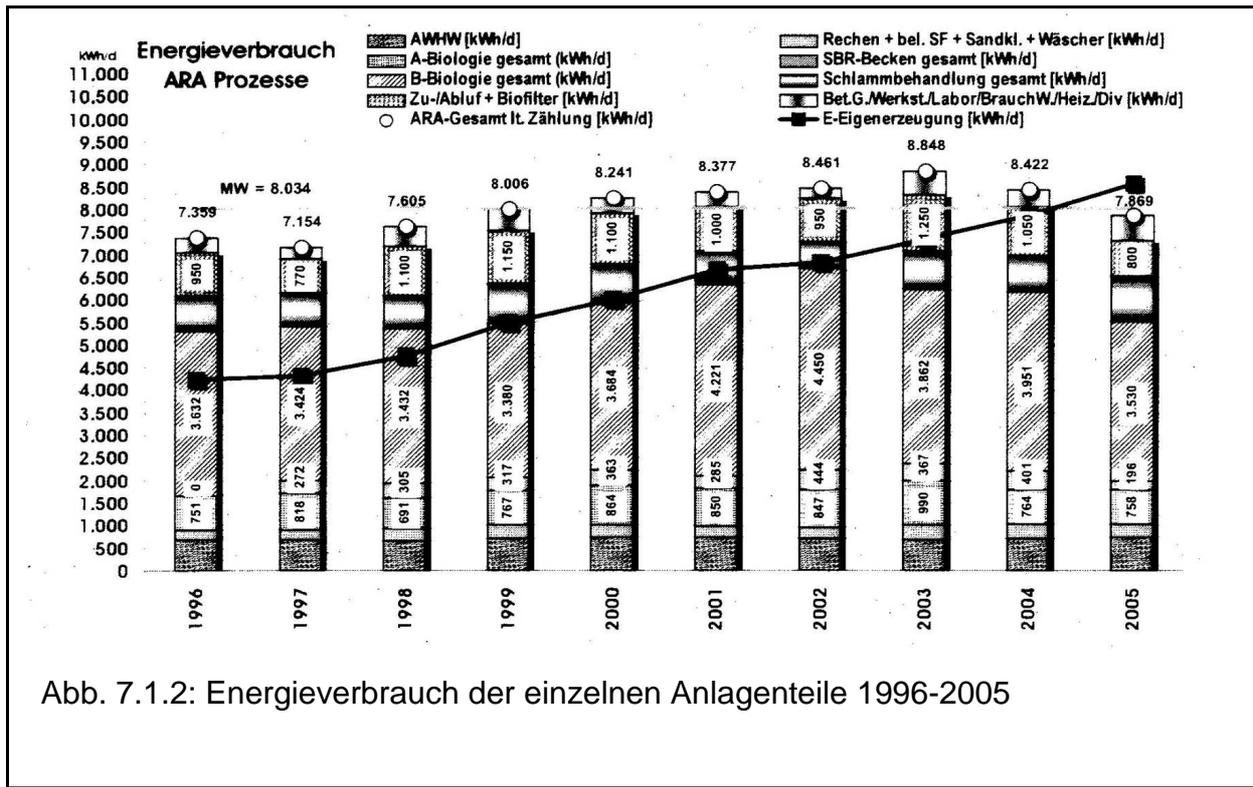


Abb. 7.1.2: Energieverbrauch der einzelnen Anlagenteile 1996-2005

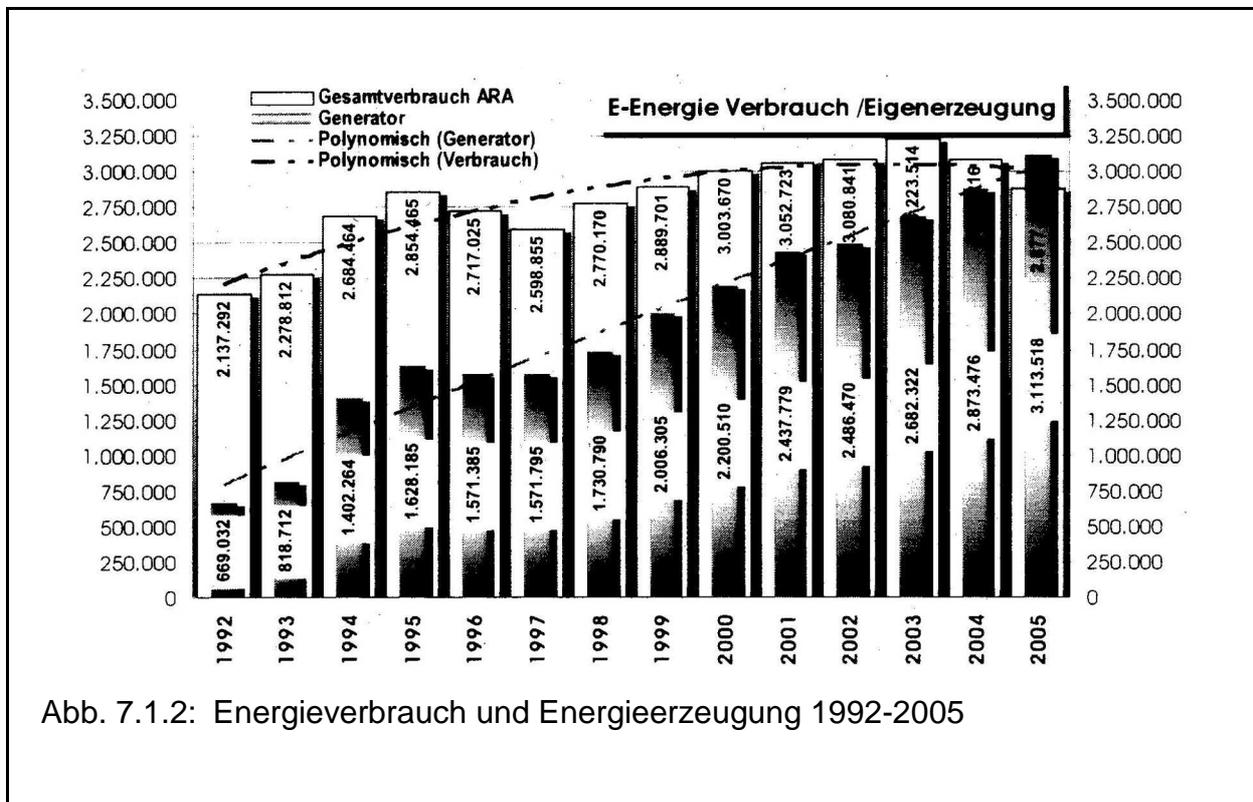


Abb. 7.1.2: Energieverbrauch und Energieerzeugung 1992-2005

**Fallbeispiel: Kläranlage Greifswald-Ladebow****Betreiber:** Stadtwerke Greifswald**Ausbaugröße:** 90.000 EW**Mittlere Belastung:** 75.000 EW**Anlagenbeschreibung:** Biologische Stufe als einstufiges Belebungsverfahren mit Nitrifikation, Denitrifikation und biologischer Phosphatelimination, Schlammstabilisierung über Faulturm, Faulgasverstromung über BHKW.**Maßnahmen zur Energieoptimierung**Sandfang:

Außerbetriebnahme erste Straße des Sandfanges. Belüftung des Sandfanges aus der Sammelleitung vom Turbogebläse für Belebungsbecken statt gesondertem Gebläse.

Rechen:

Neue Rechengutwaschpresse, nur noch 25 % der Rechengutmenge zu entsorgen, höherer Gasanfall durch mehr Kohlenstoffangebot für die Faulung.

Belebungsbecken:

Schlammalter immer nur so hoch eingestellt, dass Nitrifikation gesichert ist O<sub>2</sub>-Gehalt in Nitrifikationsbecken nur 1 - 1,5 mg/l. Sauerstoffeintrag mittels Turbogebläsen und feinblasiger Flächenbelüftung. Intervallbetrieb der Rührwerke in den DN-Zonen (3 Min. Betrieb, 12 Min. Pause).

Rücklaufschlamm:

RS-Verhältnis nur 50 - 60 %, Dadurch auch stärkere Voreindickung von Überschusschlamm mit Energieeinsparung bei der maschinellen Eindickung (Siebtrommel).

Separate Prozesswasserbehandlung:

Biologische Vorreinigung für Zentrat aus der Schlammbehandlung und Problemabwässern (z.B. Chemietoiletten aus der ganzen Tourismusregion) in umgenutzten Emscherbrunnen: Nitrifikation und Denitrifikation mit höherem Umsatzraten.

Schlammbehandlung:

Einsatz von Ultraschall zur Klärschlammdeintegration. Automatisierung der Ablasschieber bei den Voreindickern für Primärschlamm zur Vergleichmäßigung der Faulturmbeschickung. Intervallbetrieb der Rührwerke im Faulturm (je 1 Ekato-Rührwerk mit 4 kW für je einen Faulturm mit 1.800 m<sup>3</sup> Faulraumvolumen = 2,2 W/m<sup>3</sup>).

Gasverwertung:

Installation von 3 BHKW mit je 105 kW elektrischer Leistung davon 1 durchgehend zur Wärmeversorgung und 2 zur Senkung der Spitzenlast.

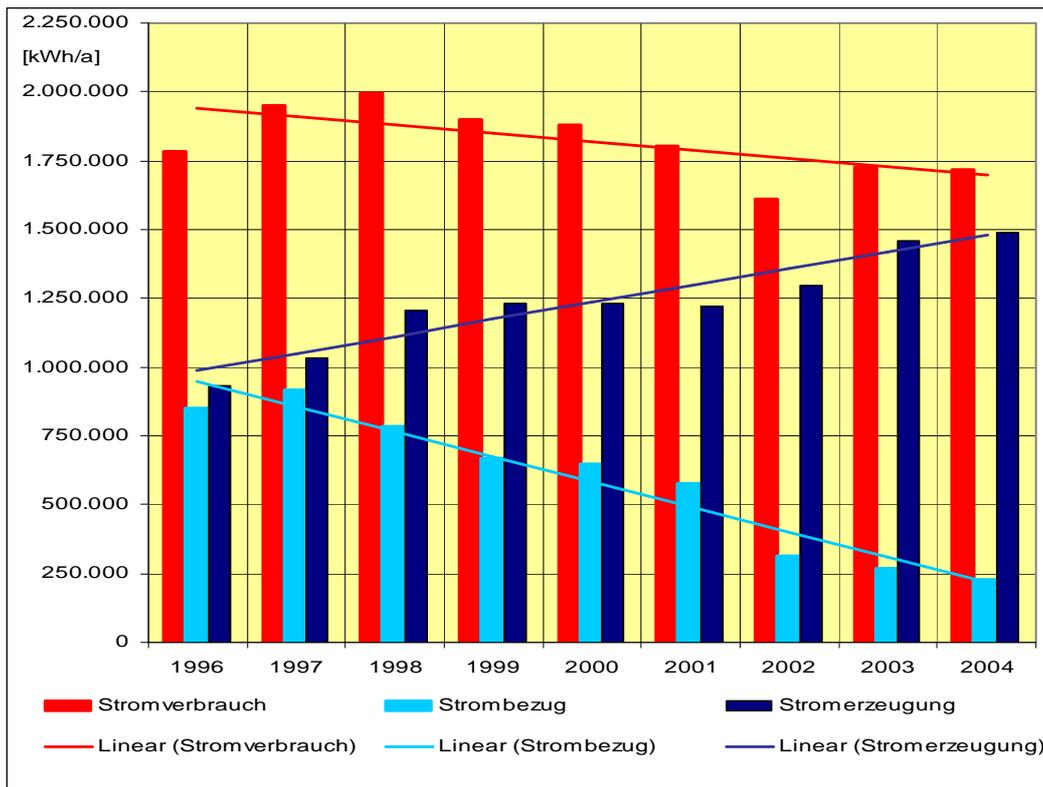


Abb. 7.1.3: Erzielte Einsparungen – Strombezug/Stromerzeugung von 1996 – 2004



Abb. 7.1.4: Ansicht der Kläranlage Greifswald

## Fallbeispiel: Kläranlage Balingen

### Basisdaten

**Betreiber:** Zweckverband Abwasserreinigung Balingen

**Ausbaugröße:** 125.000 EW

**Aktuelle Belastung:** 77-85.000 EW

**Beschreibung der Anlage:** Die Anlage besteht aus Rechen, Sandfang, Vorklärbecken, Regenüberlaufbecken, Belebungsbecken und zwei Nachklärbecken. Die Schlammbehandlung besteht aus Vor- und Nacheindicker sowie zwei Schlammfauktürmen. Im Zulauf ist keine Abwasserhebung erforderlich

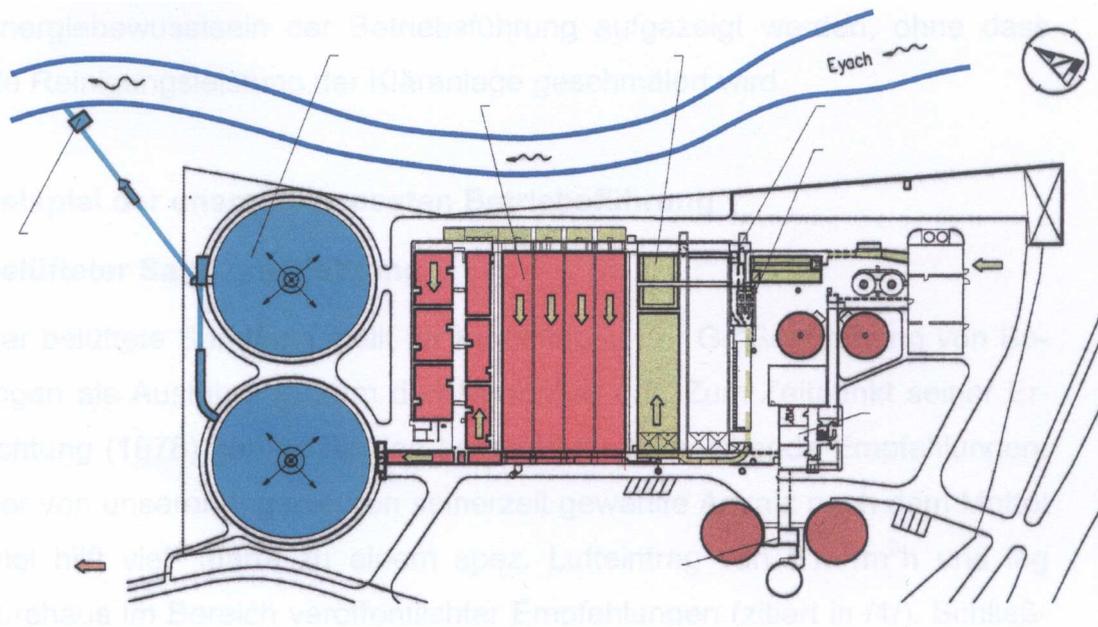


Abb. 7.1.5: Lageplan Kläranlage Balingen

### **Maßnahmen zur Energieoptimierung**

Reduzierung des Lufteintrages im Sandfang von 3 auf ca. 0,45-0,6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/h ohne Reduzierung der Reinigungsleistung durch Installation einer Sandwäsche.

Einrichtung eines Kaskadenbetriebes mit Unterteilung der Luftkreisläufe mit Membranbelüftern in der DN-Zone und keramischen Belüftern in der N-Zone.

Minimierung des Rücklaufschlammverhältnisses auf 0,7 Q<sub>m</sub>.

Installation von drei BHKWs mit einer thermischen Leistung von ca. 140 kW und einer elektrischen Leistung von 70 kW dar.

Installation einer solaren Klärschlamm-trocknung mit einer Spitzenleistung von bis zu 20 kW thermisch.

Vergasung von ca. 30-35% des anfallenden Klärschlammes als Pilotprojekt in einem Wirbelschichtvergaser.

Nutzung der Wasserspiegeldifferenz vom Nachklärbecken zum Vorfluter für den Betrieb einer Turbine mit einer Leistung von 18 kW und einem Wirkungsgrad von über 85%.

Installation einer Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 20 kW elektrisch.

### **Erzielte Ergebnisse:**

Spezifischer Stromverbrauch der biologischen Stufe einschließlich Nachklärung und Rücklaufschlammförderung 9,5 kWh/(EW.a)

Spezifischer Stromverbrauch insgesamt: 15 kWh/(EW.a) und damit Unterschreitung des Zielwertes!

Zusammen mit der Energie aus Klärschlammvergasung, Faulgas, Wasserkraft und Photovoltaik liegt der Eigenversorgung Strom bei ca. 75 %.

Nachfolgend werden einige Beispiele für Optimierungen in Teilbereichen vorgestellt:

### Fallbeispiel Kläranlage Iserlohn-Baarbachtal

#### Basisdaten

Name: Kläranlage Iserlohn-Baarbachtal

Betreiber: Ruhrverband Essen

Ausbaugröße: 115.000 EW

Umbau von 1999-2001: Neubau der biologischen Reinigungsstufe, Umbau der mechanischen Vorreinigung sowie der Schlammbehandlung



Abb. 7.1.6: Ansicht Kläranlage Baarbachtal

### Maßnahmen zur Energieoptimierung: Belüfteraustausch

Austausch im laufenden Betrieb der Belüftungselemente: Silikon statt EPDM  
 Kosten: ca. 35.000 €

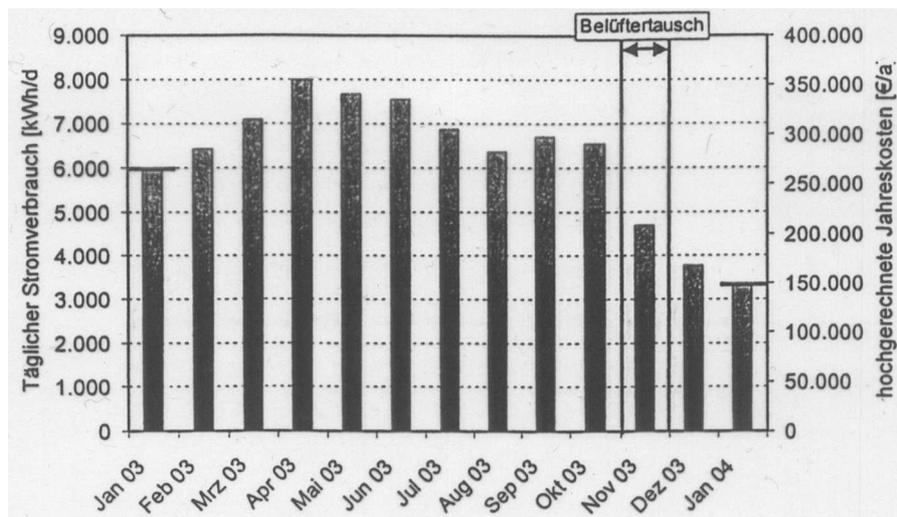


Abb. 7.1.7: Stromverbrauch vor/nach Belüfterumbau Januar 03 bis Januar 04

#### Erzielte Einsparungen:

Rückgang der Energiekosten von ca. 250.000 €/a auf 140.000 €/a (ca. 45%)

## Fallbeispiel: Kläranlage Felsberg

**Betreiber:** Stadt Felsberg

**Ausbaugröße:** 18.500 EW      **aktuelle Belastung:** 10.000 EW

**Besonderheiten:** Die Pumpen der Kläranlage hatten vor der Optimierung einen Anteil von knapp 60 % am gesamten Stromverbrauch (s. Abb. 7.1.8), weil der Fremdwasseranteil ca. 600 % und die Förderhöhe im Zulauf 12 m betrug. Dagegen verbrauchte die Belüftung nur 16 %. Der Tropfkörper ist für einen wählbaren Teilstrom zwischen Vorklärung und Belebungsbecken geschaltet.

### Maßnahmen:

Halbierung der Rücklaufschlammmenge (Jan. 2004)

Ersatz der Zulaufpumpen und der Beschickungspumpen für den Tropfkörper durch energieeffiziente Aggregate (größte Einsparmaßnahme, April 2004)

Verringerung der Sandfangbelüftung (Sommer 2004)

Halbierung der TK-Beschickung (Sept. 2004)

Verringerung der Fremdwassermenge durch Kanalsanierung um ca. 20% (Okt. 2004)

Austausch der Belüfterschläuche (September 2005)

Erhöhung der Einschaltpunkte im Pumpensumpf für Zulauf und Tropfkörper (2005)

Bau eines BHKWs (Nov. 05, kont. Betrieb ab März 2006)

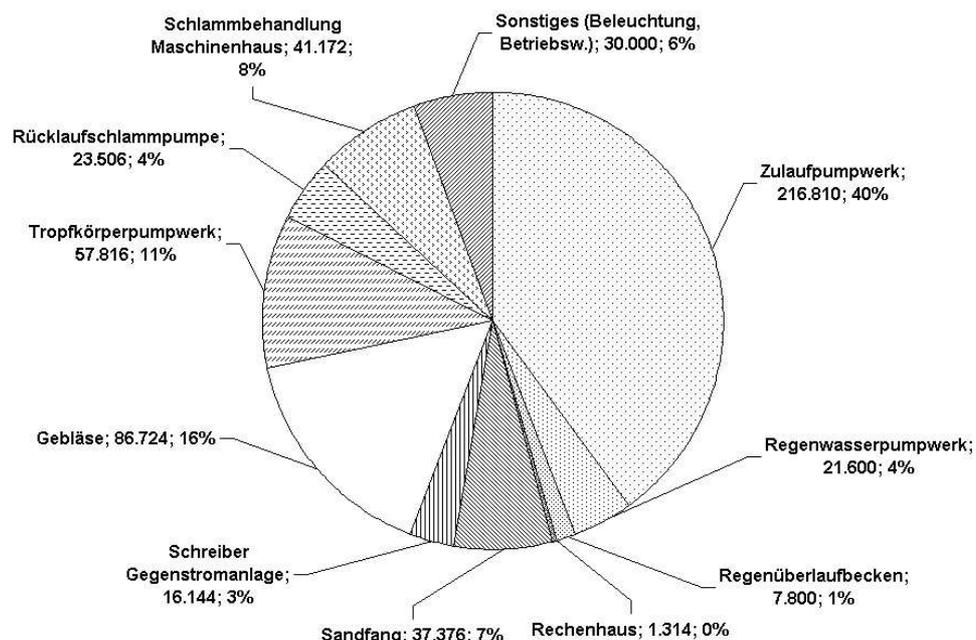
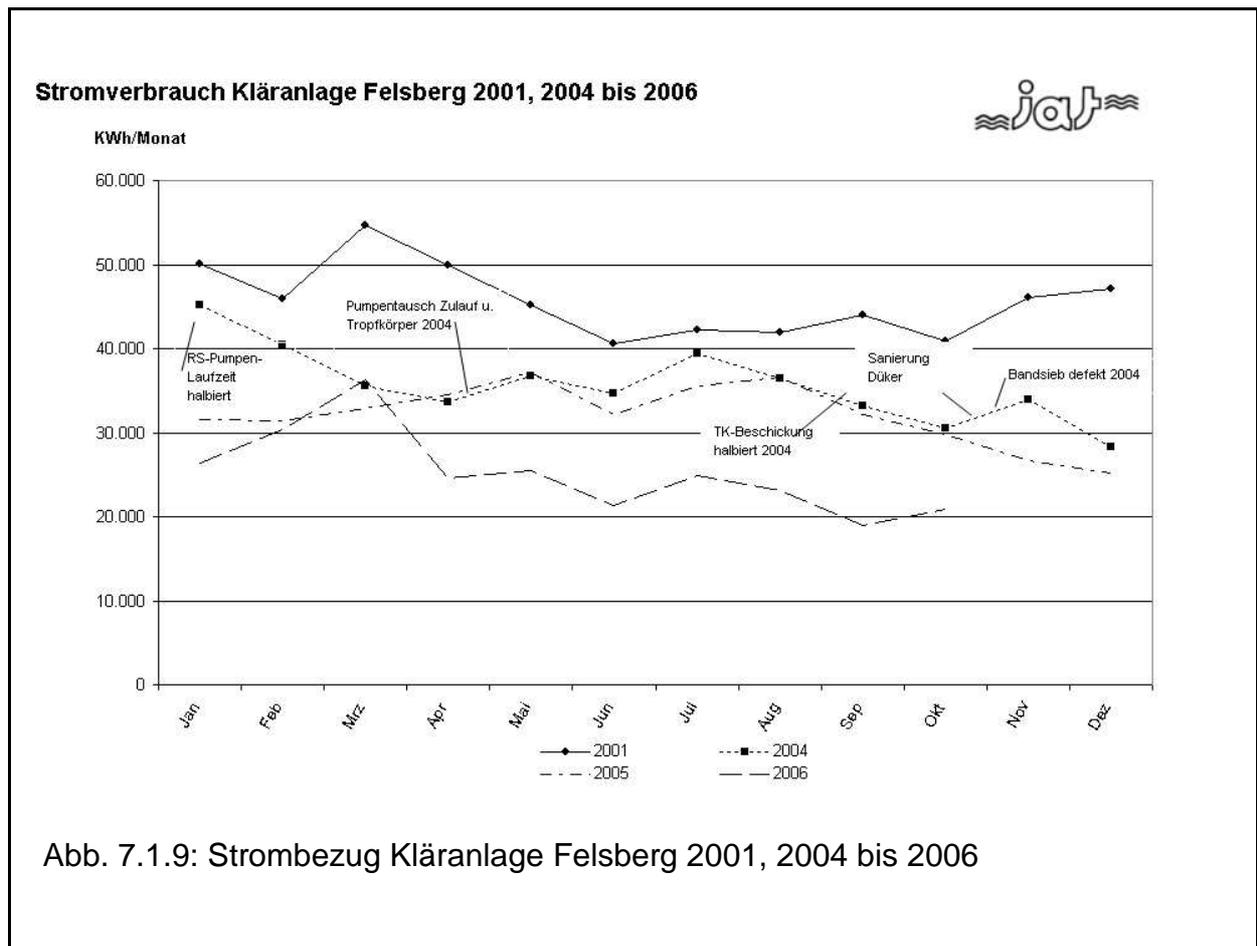


Abb. 7.1.8: Stromverbrauch der Anlagenteile vor Optimierung (kWh/a, 2001)



### Ergebnisse:

Der Stromverbrauch sank zunächst nur langsam und zeitlich versetzt zu den durchgeführten Maßnahmen (z.B. Pumpentausch Mai 04), da der Rückgang überlagert war von sonstigen Einflüssen (wechselnde Wassermengen, Betriebsstörungen, Umbau der Schlammwässerung etc.).

Im Jahresvergleich 2001 bis Ende 2006 sank aber der spezifische Stromverbrauch um ca. 47 % von 55 auf 29 kWh/(EW.a). Der Eigenversorgungsgrad stieg von 0 auf etwa 35 %. Der Strombezug sank von ca. 50.000 auf 20.000 kWh/mon.

### 7.1.3 Schlussfolgerungen

Aus der Analyse der hier dokumentierten Fälle und zahlreichen anderen Beispielen aus der Praxis der befragten Berater, Betreiber und Forscher ergeben sich einige wiederkehrende Erfahrungen, die sich bei aller Varianz im Einzelfall doch verallgemeinern lassen und typische Hemmnisse aber auch wichtige Grundvoraussetzungen für gelungene Umsetzungen erkennen lassen und nicht zuletzt transparenter machen, was möglich und was dazu erforderlich ist.

#### Typische Hemmnisse

- Konzeptionelle Schwächen oder Sachzwänge aufgrund der oft jahrzehntelang immer wieder um- und zugebauten Bau- und Anlagentechnik von Kläranlagen (z.B. durch Einführung der Nährstoffelimination als 3. Reinigungsstufe) können nicht ohne weiteres korrigiert werden. Ungünstige Beckengeometrie oder lange Verbindungsleitungen aufgrund von Umnutzungen des Bestandes, ineffiziente oder überdimensionierte Maschinen- und Steuerungstechnik aufgrund der Integration alter Anlagen in geänderte verfahrenstechnische Konzepte führen zu Mehrverbrauch an Energie, der sich manchmal nur schwer beheben lässt.
- Größere Kläranlagen (GK 4/5) werden selten von einem Planer oder Berater als ganze Einheit betrachtet. Oft werden Teilbereiche wie Schlammwässerung, mechanische Vorbehandlung, Sandfilter etc. von Fachplanern oder –firmen optimiert, ohne die Auswirkungen auf das Gesamtkonzept der Anlage ausreichend zu würdigen. Dadurch bleiben Möglichkeiten der Gesamtoptimierung durch das Zusammenspiel der Anlagenteile außen vor.
- Die Ansatzpunkte für eine Optimierung sind oft versteckt und im Tagesgeschäft nicht ohne weiteres für das Betriebspersonal erkennbar. Dies liegt zum einen daran, dass der Energieverbrauch aufgrund des Verschleißes der Anlagen (z.B. Belüfter, Pumpenlaufräder) grundsätzlich eine leichte Tendenz nach oben hat, ohne dass dies sofort spürbar würde, weil der Energieverbrauch einzelner Anlagenteile selten über Monate oder Jahre hinweg verfolgt wird. Zum anderen wird durch Änderungen an einem Anlagenteil möglicherweise

eine vorher sinnvolle Betriebsweise an anderer Stelle unsinnig oder könnte entfallen. Aufgrund von Betriebsblindheit oder Gewohnheit wird sie aber weiter beibehalten, bis sie ein Außenstehender hinterfragt.

- Die interne Aufteilung des Stromverbrauchs ist meist nicht bekannt. Daher ist es zunächst schwierig, bei ungünstigen Gesamtkennwerten (z.B. Eigenversorgungsgrad < 30 %) die Ursachen dafür herauszufinden.
- Energieeinsparungen müssen vom Betriebspersonal initiiert oder zumindest mitgetragen werden. Oft ist nicht die Bereitschaft gegeben, bewährte oder einfach gewohnte Betriebsweisen auch nur versuchsweise aufzugeben. Diese Zurückhaltung wird noch verstärkt, wenn fachfremde Energieberater zumindest teilweise unsinnige oder praxisferne Empfehlungen aussprechen.
- Eine weitere Schwierigkeit besteht in der nur bedingten Übertragbarkeit von Betriebsweisen und Anlagenkonzepten, die auf unterschiedliche Abwassereigenschaften, aber auch auf sonstige Einflussfaktoren wie Beckengeometrie, Struktur des Kanalnetzes, Besonderheiten der Pumpen und Rührwerke etc. zurückzuführen sind. Gelungene Beispiele für Optimierungen können daher nicht einfach „kopiert“, sondern bestenfalls als Anregung für eine sinngemäße Übertragung genutzt werden.
- Die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen erfordert meist eine Kombination aus guter Kenntnis der jeweiligen Anlage und externem Wissen über die technischen Möglichkeiten der Optimierung. Erst eine phantasievolle Verknüpfung aus theoretischen Ansatz und praktischer Umsetzung ermöglicht nachhaltige Verbesserungen. Die dazu erforderliche Zusammenarbeit zwischen Planer und Klärwerkpersonal findet selten statt, da Planungsprozesse und Betrieb der Anlagen auch bei großen Verbänden traditionell getrennt sind und eher in Konkurrenz stehen. Zur Überwindung anfänglicher Umsetzungsschwierigkeiten ist aber ein Vertrauensverhältnis notwendig.
- Maßnahmen zur Energieoptimierung müssen, um rentabel zu sein, mit geringem Aufwand geplant und mit möglichst weitgehender (Um-)Nutzung des Be-

standes umgesetzt werden. Hier gibt es einen systematischen Konflikt zum verständlichen Interesse des Planers, eher Neuanlagen vorzuschlagen, bei denen sich das Verhältnis von Planungsaufwand zu Bausumme wesentlich günstiger darstellt.

- Energieeinsparungen machen sich meist erst langfristig bemerkbar und fallen nicht als zusätzliche „Einnahmen“ im Haushalt an. Sie gehen sogar meist in Tarifierhöhungen unter. Die erforderlichen Investitionen müssen aber in politischen Gremien beantragt und im Haushalt bereitgestellt werden. Daraus speist sich das subjektive Empfinden, dass bei der Energieeinsparung vor allem Ausgaben, aber kaum Einnahmen entstehen. Müssen bei vorgegebenem Budget Prioritäten gesetzt werden, fallen die nicht zwingend erforderlichen Maßnahmen zur Energieeinsparung und vor allem die vorbereitenden Studien dazu als erstes weg.
- Die Umsetzung der Energiesparmaßnahmen ist meist ein langwieriger und zeitraubender Prozess, dem keine schnellen Erfolgserlebnisse gegenüberstehen. Ist die Personaldecke dünn, was auch im öffentlichen Dienst zunehmend der Fall ist, ist eine hohe Eigenmotivation des Betriebspersonals nötig, um sich diese Zeit zu nehmen.
- Gelegentlich führen stromsparende Änderungen der Steuerung von maschinentechnischen Anlagen zwar zu mehr Energieeffizienz, bewirken aber instabile oder wartungsintensive Betriebsweisen und werden daher vom Betriebspersonal nicht umgesetzt oder wieder rückgängig gemacht. Vor allem in einer Pilot- oder Übergangsphase sind oft Nachbesserungen erforderlich, um die Verbesserungen sinnvoll zu implementieren. Auch hier ist die Geduld und Kooperationsbereitschaft des Betriebspersonals oft überstrapaziert oder wird zu wenig gefördert.

### **Grundvoraussetzungen für eine nachhaltige Energieoptimierung**

Im Umkehrschluss können aus den genannten Hemmnissen aber auch die Bedingungen abgeleitet werden, unter denen eine Energieoptimierung gelingen kann.

- Die mit Abstand wichtigste Voraussetzung für eine gelungene Energieoptimierung ist die engagierte und qualifizierte Mitarbeit des Betriebspersonals. Dabei ist es sekundär, ob dessen Motivation auf ökologischem Interesse an Energieeinsparung, auf betriebswirtschaftlichem Denken oder einfach dem Ehrgeiz beruht, „seine“ Anlage optimal zu betreiben. Bei besonders gelungenen Beispielen findet man meist einen Verantwortlichen (Betriebsleiter), der die Energieoptimierung zu seinem persönlichen Anliegen gemacht hat. Ist diese Voraussetzung gegeben, können selbst unter ungünstigen Randbedingungen (z.B. starke saisonale Schwankungen in Tourismusgebieten wie ARA Strass und Greifswald) sehr gute Werte erzielt werden.
- Energieoptimierung muss als integraler Bestandteil der Instandhaltung, Modernisierung und Erweiterung der Kläranlage gesehen werden. Viele Ansatzpunkte fallen in die Kategorie „Abhängige Maßnahmen“, die nur im Zusammenhang mit einer Reinvestition rentabel sind. Werden die Energieeinsparbemühungen in die laufende betriebliche Optimierung und bauliche Sanierung mit einbezogen, ist der Mehraufwand dafür relativ gering. Bei jedem Ersatz oder Umbau muss die Frage stehen, ob es eine energieeffizientere Alternative gibt.
- Energieoptimierung ist ein jahrelanger, kontinuierlicher Prozess, nicht eine einmalige Aktion. Die meisten Maßnahmen oder zumindest Ansatzpunkte können zwar mit einer einmaligen Feinanalyse identifiziert werden. Deren Umsetzung erfordert aber lange Zeiträume, nicht nur weil die menschlichen oder finanziellen Ressourcen begrenzt sind, sondern auch weil in Versuchen zunächst Erfahrungen gesammelt werden müssen. Außerdem muss das Erreichte weiter beobachtet und immer wieder neu gesichert werden: Neue Belüfter oder Pumpen mit anfänglich hohem Wirkungsgrad verlieren ihre Energieeffizienz bald wieder, wenn die Wartung sie nicht aufrechterhält.
- Eine weitgehende Zielerreichung (Kennwerte nahe dem Zielwert) ist in der Regel nur durch eine Vielzahl kleinerer Maßnahmen an unterschiedlichen Stellen möglich. Neben den bekannten Ansatzpunkten wie Belüftung, Rühr-

werke und Pumpen, müssen auch die jeweiligen Besonderheiten der Anlage ins Auge gefasst werden. Dazu ist zunächst eine gute Transparenz der internen Energieströme notwendig, damit die relevanten Anlagenteile überhaupt erkannt werden.

- Für eine optimale Kombination von Erfahrungswissen und Anlagenkenntnis einerseits und Innovation oder Fachwissen andererseits ist die Zusammenarbeit zwischen externen Beratern und Betriebspersonal erforderlich. Das setzt neben einer gewissen Vertrauensbasis auf beiden Seiten die Bereitschaft voraus, Ideen und Erkenntnisse des Gegenübers aufzugreifen und mit zu berücksichtigen.
- Die technischen Lösungen bei energetisch optimierten Anlagen basieren in der Regel auf Standardverfahren, die lediglich geschickt auf die jeweiligen örtlichen Verhältnisse angepasst wurden. Sonderverfahren wie Deammonifikation, Klärschlammvergassung oder Wasserkraftnutzung sind allenfalls zusätzliche „i-Punkte“, aber nicht entscheidende Grundlage der Energieoptimierung.
- Die erforderlichen Finanzmittel für Maßnahmen müssen entweder vom Betreiber aufgebracht oder über ein (Einspar-)Contracting extern bereitgestellt werden. Auch hier ist eine Transparenz bzw. ein Monitoring der Energieströme im Detail hilfreich, um den Geldgebern bzw. Entscheidungsträgern den Erfolg der Maßnahmen nachweisen zu können.
- Erfolge sind im Bereich der Energieerzeugung meist einfacher zu erreichen und öffentlichkeitswirksamer. Die Installation eines neuen BHKWs zur Faulgasverwertung findet sowohl in den politischen Gremien als auch in den Medien mehr Interesse als der Ersatz eines Pumpenlaufrades oder das Umprogrammieren der Belüftersteuerung. Daher eignen sich solche Maßnahmen auch gut als erster Schritt, zumal sie den übrigen Betrieb der Kläranlage nicht weiter beeinflussen.
- Grundsätzlich ist das Potenzial im Bereich der Faulgaserzeugung und –verwertung wesentlich einfacher und mit weniger Einzelmaßnahmen zu er-

schließen. Gute Erfahrungen sind auch leichter auf andere Anlagen übertragbar. Da das Ausgangsniveau oft relativ niedrig ist, sind Verbesserungen stärker spürbar.

- Durch die steigenden Strompreise ist der Anreiz für die Faulgasverstromung und deren Rentabilität deutlich gestiegen. Außerdem hat der Boom beim Biogas zu einer starken Weiterentwicklung der Biogasmotoren geführt, so dass heute zumindest ab der Größenklasse von 200 bis 300 kW<sub>el</sub> (ab etwa 100.000 EW oder Gasanfall ab etwa 2.000 m<sup>3</sup>/d) bereits sehr leistungsfähige und wenig störanfällige Aggregate mit elektrischen Wirkungsgraden nahe 40 % zur Verfügung stehen.

### **Ansatzpunkte**

Die wichtigsten Ansatzpunkte ergeben sich gemäß Abb. 3.4.1 bei den Hauptverbrauchern bzw. der Energieerzeugung. Das wird auch durch die Fallbeispiele verdeutlicht:

#### Belüftung:

- Auswahl, Beaufschlagung und Anordnung der Belüfterelemente
- Art der Belüftungsregelung (NH<sub>4</sub>-Regelung, Kaskaden)

#### Rührwerke:

- Wahl von Langsamläufnern mit bedarfsgerechter Leistung
- Intervallbetrieb

#### Pumpen:

- Effiziente Laufräder, regelmäßige Wartung
- Verminderung von Kreislaufführung, Abstürzen und örtlichen Druckverlusten

#### Faulgaserzeugung:

- Gute Durchmischung und gleichmäßige Beschickung
- Voreindickung von Überschussschlamm mit Flockungsmittel
- Kofermentation soweit möglich und Substrat verfügbar

#### Faulgasverwertung:

- Wahl effizienter Motoren und vollständige Verstromung des Faulgases, künftig eventuell mit zusätzlichen ORC-Anlagen

Sonstiges:

- Getrennte Zwischenspeicherung und/oder Behandlung von Konzentraten (Prozesswasser, Fäkalien, etc.), z.B. in stillgelegten Becken
- Anpassung Schlammalter ( $TS_{BB}$ ) an tatsächlichen Bedarf im Jahresgang.
- Reduzierung Belüftung Sandfang

Grundsätzlich sind immer wieder besondere Maßnahmen im Einzelfall mitbeteiligt.

Werden auf Basis der o. g. Grundvoraussetzungen die vorhandenen Möglichkeiten und Spielräume zur Energieoptimierung konsequent über längere Zeiträume genutzt, so ist die Energieautarkie bzw. die weitgehende Annäherung an die Zielwerte aus Tabelle 6.2.1 in aller Regel zwar visionär, aber nicht utopisch. Die theoretischen Berechnungen und die Fallbeispiele belegen jedenfalls, dass auch bei relativ ungünstigen Startbedingungen ein Optimierungsprozess technisch machbar und vor allem finanzierbar ist.

Allerdings sind die genannten Grundvoraussetzungen nur selten so ausgeprägt vorhanden, dass das Optimierungspotenzial voll ausgeschöpft wird. Es wäre deshalb utopisch zu glauben, dass ein ähnlicher Prozess wie in den drei ersten Fallbeispielen beschrieben auf (nahezu) allen Kläranlagen durchsetzbar wäre.

In diesem Sinne ist Energieautarkie visionär und utopisch zugleich, weil sie - wie alle Visionen - nur in einer begrenzten Zahl von Fällen auch tatsächlich umgesetzt wird. Aber in dem Maß, wie die handelnden Personen für diese Idee gewonnen werden können, ist das theoretisch gesteckte Einsparziel auch erreichbar. Dazu werden im folgenden Kapitel noch einige Anregungen gegeben.

## 7.2. Empfehlungen für eine Optimierungsstrategie

### Sinnvolle Vorgehensweise bei der Energieoptimierung

Betrachtet man die Schlussfolgerungen aus den Praxisbeispielen wird schnell deutlich, dass Energieoptimierung nicht einfach ein technisches Problem, sondern vor allem eine Frage der Herangehensweise ist. Dabei haben insbesondere das Betriebspersonal, aber auch die Entscheidungsträger eine Schlüsselrolle. Die wesentlichen Grundsätze für eine sinnvolle Vorgehensweise auf der Kläranlage sind:

1. Transparenz herstellen durch detaillierte Ermittlung der Energieverbräuche auf der Anlage: **Wissen schafft Bewusstsein!**
2. Die Erfahrungen und Interessen des Betriebspersonals immer berücksichtigen: „Von oben verordnete“ Energiesparmaßnahmen haben schlechte Erfolgsaussichten und geringe Halbwertszeiten!
3. Bei allen Einzelmaßnahmen immer das Gesamtkonzept der Kläranlage im Auge behalten, z.B. im Rahmen einer Feinanalyse: **Effizienz braucht ganzheitliches Denken!**
4. Bewährt hat sich ein Zusammenspiel zwischen Betriebspersonal, externen Beratern und ggf. Spezialfirmen: **Energieoptimierung ist ein Mannschaftsspiel!**
5. Das Gesamtkonzept beinhaltet idealerweise auch die Peripherie der Kläranlage, von der Vorbehandlung in Industrie und Gewerbe über Fremdwasserbekämpfung bis zur Klärschlammverwertung, ggf. in Kooperation mit anderen Kläranlagen: **Energieeffizienz überschreitet den Zaun der Kläranlage!**
6. Schnelle Erfolge sind selten und meist begrenzt. Sie können aber wichtige erste Schritte sein als Motivation und Vertrauensbildung für schwierigere Etappen. Deshalb sollten im Rahmen einer Feinanalyse auch immer Prioritäten festgelegt und ein Zeitplan erstellt werden: **Energieoptimierung braucht einen langen Atem!**
7. Wird in Energiesparen investiert, soll sich das lohnen. Daher ist eine gute Dokumentation der Energieverbräuche vor und nach einer Maßnahme wichtig. In der Regel muss diese am betroffenen Aggregat selbst erfolgen, um sonstige Einflüsse auszuschließen: **Dokumentierte Erfolge motivieren!**

Im Hinblick auf die bundesweite Bilanz bzw. die Novelle der Abwasserverordnung ergeben sich folgende Empfehlungen:

1. Der Fokus sollte primär auf Großanlagen (GK 4 und 5) liegen. Dies gilt vor allem bei der Gaserzeugung und –verwertung einschließlich Kofermentation.
2. Verbindliche Auflagen sollten nur die Herstellung von Transparenz (Messungen und Feinanalysen) betreffen. Die Maßnahmen selbst sind immer individuell und am besten freiwillig durchzuführen. Der Anreiz über den Wegfall der Abwasserabgabenermäßigung bei Untätigkeit kann aber hilfreich sein.
3. Motivation und Bewusstseinsbildung sowie Erfahrungsaustausch (z.B. über Kläranlagennachbarschaften) sind hilfreicher als Grenzwerte und in jedem Fall notwendig.
4. In manchen Bereichen besteht noch Forschungsbedarf. Dies betrifft z.B. das Ausmaß des Wirkungsgradverlustes von Belüftern und Pumpen im laufenden Betrieb sowie die Möglichkeiten einer wirksamen Kontrolle. Auch das realistische Potenzial der Kofermentation und deren limitierende Faktoren sind noch weitgehend offen.

## 8. Zusammenfassung

Kläranlagen sind in den Städten und Gemeinden mit ca. 20 % Anteil am kommunalen Strombedarf eindeutig der größte Einzelverbraucher vor Schulen, Krankenhäusern, Wasserversorgung, Straßenbeleuchtung etc. Da seit Jahren in zahlreichen Studien hohe Einsparpotenziale bis zu 70 % auf Kläranlagen proklamiert wurden, sind sie ein sehr interessanter Ansatzpunkt für Energieoptimierungen. Im Rahmen der Novellierung der Abwasserverordnung sollen daher auch die Anforderungen an die Energieeffizienz in der Abwasserbehandlung konkretisiert werden.

Ziel der vorliegenden Studie ist einerseits, einen Stand der Technik hinsichtlich Energieeffizienz auf Kläranlagen zu definieren und zum anderen den möglichen Beitrag der Energieoptimierung zum Klimaschutz abzuschätzen. Außerdem sollen die technischen Ansatzpunkte dafür identifiziert und der Einfluss neuer Techniken und Trends auf den Energieverbrauch dargestellt werden.

Dazu wurde zunächst eine Bestandsanalyse durchgeführt mit folgendem Ergebnis:

- Die ca. 10.200 Kläranlagen in Deutschland benötigen mit rund 4.400 GWh/a etwa 0,7 % des bundesweiten Stromverbrauchs. Das entspricht einem spezifischen Verbrauch von 35 kWh/(EW.a) (bei 126 Mio. angeschlossenen Einwohnerwerten) und insgesamt 3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.
- Ein Großteil des Stromverbrauchs (rund 86 %) konzentriert sich auf etwa 2.000 Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 (> 10.000 EW). Mehr als ein Drittel davon wird durch industriell-gewerbliches Abwasser verursacht.
- Die Faulgasproduktion lag 2004 bei 684 Mio. m<sup>3</sup>/a mit einem unteren Heizwert von etwa 4.200 GWh/a bzw. 43 kWh/(EW.a). Dies entspricht einer spezifischen Produktion von 19,6 l/EW.d bezogen auf 96 Mio. EW in 1.150 Kläranlagen mit Faulung. Davon werden 465 Mio. m<sup>3</sup>/a zu 865 GWh/a verstromt, wobei der mittlere Wirkungsgrad mit 30 % deutlich unter den technischen Möglichkeiten liegt.

- Insgesamt kann damit nur etwa ein Fünftel des Stromverbrauchs aller Kläranlagen selbst abgedeckt werden. Über 80 % des Stroms wird dabei von nur 200 großen Kläranlagen erzeugt. Die Eigenstromerzeugung entspricht einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von knapp 600.000 t/a und einem Anteil von 1,4 % an der Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen (in 2005).
- Der Stromverbrauch in der Kläranlage konzentriert sich vor allem auf die Belüftung (ca. 50 %), die großen Pump- und Rührwerke sowie die Schlammbehandlung.

Zur Abschätzung des Optimierungspotenzials wurden zunächst die wichtigsten Ansatzpunkte in den drei Bereichen Stromeinsparung bei der Abwasserbehandlung, Gutschrift aus der (thermischen) Klärschlammverwertung und Faulgasverstromung identifiziert und der Einfluss verschiedener Maßnahmen in Szenarien abgeschätzt. Nach der gleichen Methode wurde der mögliche Mehrverbrauch an Energie durch neue Anforderungen und Techniken wie die Membranfiltration berechnet. Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Bemühungen um Energieeinsparungen sollten vorrangig auf die oberen Größenklassen (Anlagen > 10.000 EW) konzentriert werden, obwohl dort der spezifische Stromverbrauch mit derzeit 32 bis 35 kWh/(EW.a) bereits am niedrigsten liegt und die geringste Streubreite aufweist.
- Selbst bei optimaler Energieeffizienz aller Kläranlagen, d. h. einem mittleren spezifischen Stromverbrauch von 18 - 25 kWh/(EW.a) (je nach Ausstattung der Kläranlage mit Sonderverfahren) wäre nur eine Stromeinsparung von 30 bis 40 % des derzeitigen Verbrauchs möglich. Da der Mehrverbrauch oft durch schwer korrigierbare konzeptionelle Schwächen beim Bau und sonstige unabänderliche Randbedingungen verursacht wird, erscheint aus unserer Sicht eine mittlere **Einsparung von ca. 10 bis 20 %, entsprechend 450 bis 900 GWh/a realistisch.**

Dies deckt sich mit Auswertungen von Feinanalysen und den – wenigen - vollständig umgesetzten Energieoptimierungen. Höhere Einsparraten ergeben sich natürlich aufgrund der starken Streuung im Einzelfall.

Wichtige Ansatzpunkte für die Stromeinsparung sind

- Anordnung, Bemessung und regelmäßige Wartung von Belüfterelementen,
- energieeffiziente Regelung der Belüftung (z. B. bedarfsgerechte Sauerstoff-Sollwerte),
- Einsatz von Pumpenlaufrädern mit hohem Wirkungsgrad und deren regelmäßige Wartung,
- Strömungstechnisch und energetisch optimierte Rührwerke,
- separate Prozesswasserbehandlung (z.B. MAP-Fällung oder Dampfstrippung).

Allerdings erfordert eine signifikante Einsparung nach den Erfahrungen in der Praxis meist einen jahrelangen Optimierungsprozess durch viele Einzelmaßnahmen an verschiedenen Ansatzpunkten. Außerdem ist diese Optimierung nur mit einem motivierten und qualifizierten Betriebspersonal sowie der Unterstützung externer Berater möglich. Sie lässt sich nur begrenzt durch allgemeine Vorgaben „verordnen“.

Dagegen ist das Potenzial bei der Steigerung der Stromerzeugung im Vergleich zur Stromeinsparung wesentlich höher, sowie technisch einfacher und auch wirtschaftlicher zu erschließen. Allein durch den - betriebswirtschaftlich rentablen - Ausbau der Faulgasverstromung auf – annähernd - 100 % des Gasanfalls mit BHKWs nach heutigem Stand der Technik (ca. 35 % elektrischer Wirkungsgrad) kann die Stromerzeugung um bis zu 90 % gesteigert werden.

Der Einsatz von Brennstoffzellen in Kläranlagen ist aufgrund der relativ geringen Wirkungsgradsteigerung im Vergleich zu modernen BHKWs mit Gas- und Dieselmotoren und der extrem hohen Investitionskosten nicht attraktiv. Außerdem spricht der ganzjährig hohe Wärmebedarf der Kläranlagen gegen eine weitere Verminderung der verfügbaren Abwärme. Die Faulgasverstromung über Mikroturbinen oder Stirlingmotoren bietet allenfalls bei sehr kleinen Anlagen Vorteile hinsichtlich Wartungskosten, ist aber energetisch ungünstiger. Dagegen können bei sehr großen Anlagen der Megawatt-

klasse durch Einsatz der GuD-Technik oder mit zusätzlichen ORC-Anlagen deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade bis über 40 % erzielt werden.

Dieses Potenzial kann durch vermehrte Faulgasproduktion (z.B. durch Kofermentation, Optimierung Faulturmbetrieb, Desintegration) weiter gesteigert werden. Bei Ausschöpfung aller Möglichkeiten wäre nahezu eine Vervierfachung der Stromproduktion auf rund 3.300 GWh/a erreichbar. Die dazu erforderlichen Investitionsmittel liegen unter 1 Milliarde € und könnten durch die erzielbaren Stromerlöse von rund 300 Mio. €/a leicht amortisiert werden.

Die Steigerung der Faulgaserzeugung durch Kofermentation wird zwar begrenzt durch die Verfügbarkeit geeigneter Substrate, die zusätzliche Rückbelastung der Kläranlage mit Prozessabwässern und logistische sowie rechtliche Sachzwänge. Aber auch bei relativ bescheidenen Annahmen (Faulgasanfall erhöht auf 25 l/EW.d, zu 90 % mit Wirkungsgrad von 35 % verstromt) ist eine **Verdoppelung der derzeitigen Stromerzeugung möglich.**

Allerdings könnten die Erschließung des Potenzials wesentlich erleichtert werden durch höhere finanzielle Anreize wie z. B. eine Gleichstellung von Klärgas mit Biogas nach EEG und vor allem eine klare, bundeseinheitliche rechtliche Regelung für die Kofermentation. Die große Rechtsunsicherheit bei Behörden und Betreibern hinsichtlich der Einstufung von Substraten/flüssigen Konzentraten als Abfall und deren Mitbehandlung in Abwasserbehandlungsanlagen sowie der seuchenhygienischen Anforderungen bei der Verarbeitung von „tierischen Nebenprodukten“ (Fette, Speisereste, Schlachthofabfälle etc.) führt zu großer Zurückhaltung bei der Umsetzung von Kofermentation und teilweise zu Rechtsstreits.

Die Energieoptimierung lässt sich auch wegen der Vielfalt der Anlagentypen und spezifischen Standortbedingungen nicht einfach verordnen. Vielmehr muss das Betriebspersonal angeregt werden, dem Ziel einer energieeffizienten Kläranlage durch einen Dreierschritt näher zu kommen, der auch Grundlage der Vorschläge für eine Novellierung der Abwasserverordnung ist:

1. **Schaffung von Transparenz** durch Ermittlung des Stromverbrauchs auch für wichtige Anlagengruppen und Berechnung einfacher Kennwerte.

2. **Benchmarking** durch Vergleich dieser Kennwerte mit so genannten Ziel- und Toleranzwerten, die eine Bewertung des Energieverbrauchs zulassen.
  
3. **Ermittlung der Ursachen und Umsetzung von Maßnahmen** im Einzelfall mittels Feinanalyse, wenn einzelne Kennwerte stark vom Zielwert abweichen. Erst wenn zumutbare Maßnahmen nicht zeitnah umgesetzt werden, sind in letzter Konsequenz Sanktionen (z.B. über erhöhte Abwasserabgaben) denkbar

Eine Einzelfallbetrachtung ist letztlich auch immer dann erforderlich, wenn zusätzliche Behandlungsstufen wie Sandfilter oder Klärschlamm-trocknung eingesetzt werden oder besondere Standortfaktoren vorliegen. Aber auch neue Anforderungen an die Reinigungsleistung wie z. B. die Hygienisierung des Kläranlagenablaufes oder die Einführung neuer Techniken wie die Membranfiltration können einen erheblichen Strommehrverbrauch verursachen. Hier wird abzuwägen sein, ob der Mehrwert an Gewässerschutz die entsprechenden Einbußen beim Klimaschutz wirklich rechtfertigt.

Ähnliches gilt für den Bereich Klärschlamm-entsorgung und Nährstoffrückgewinnung, wo die Nachhaltigkeitsforderung je nach betrachtetem Sektor (sparsamer Umgang mit Ressourcen, Bodenschutz, Energieeffizienz) zu widersprüchlichen Forderungen und je nach Gewichtung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Aus energetischer Sicht beinhaltet die thermische Verwertung von Klärschlamm ein relativ großes Potenzial an CO<sub>2</sub>-Gutschriften, vor allem wenn die Trocknung solar oder mit Abwärme (z.B. aus Industrie oder Kraftwerken) durchgeführt werden kann. Im günstigsten Fall beträgt diese Gutschrift knapp 2 Mio. t CO<sub>2</sub>/a. Dagegen ist das energetische Potenzial bei der P-Rückgewinnung durch Gutschriften wegen vermiedener Düngereproduktion von max. 50.000 t CO<sub>2</sub>/a deutlich kleiner und würde vermutlich aufgezehrt durch den erforderlichen Energieeinsatz für die Rückgewinnung.

### Zusammenfassung Szenarien in CO<sub>2</sub> Äquivalenten

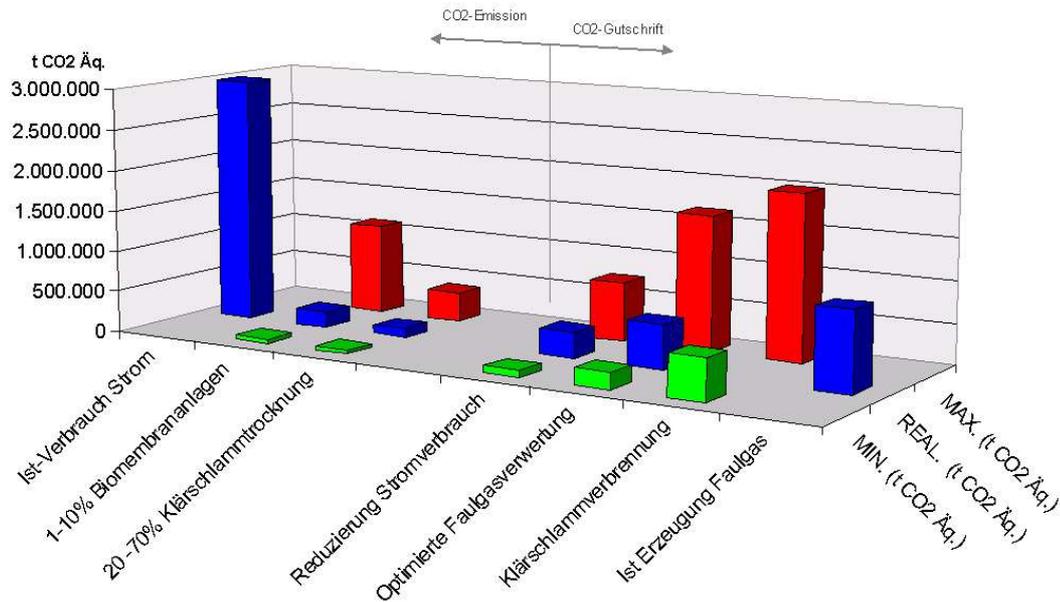


Abb. 8.1: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente von Ist-Situation und diverser Szenarien

Wegen der sektorübergreifenden Betrachtung ist ein größenordnungsmäßiger Vergleich der potenziellen Beiträge zum Klimaschutz aus den verschiedenen Bereichen interessant, wie er in Abb. 8.1 präsentiert wird. Dabei ist zunächst zu beachten, dass die Einführung der Biomembrananlagen und der Stromverbrauch der Klärschlamm-trocknung zu einer zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emmission führen, während die übrigen Szenarien CO<sub>2</sub>-Gutschriften darstellen. Der Vergleich ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- Wichtigste Ansatzpunkte für eine Energieoptimierung sind die Faulgaserzeugung und –verwertung sowie die thermische Klärschlammverwertung. Letzteres allerdings nur bei einer vorgeschalteten Trocknung des Klärschlammes durch ungenutzte Abwärme, z.B. von Kraftwerken oder durch Sonnenenergie. Als additive Verfahren lassen sie sich auch leichter implementieren als Sparmaßnahmen im Bereich der vorhandenen Verfahrenstechnik. Die Effizienzsteigerung bei der Faulgasverstromung ist außerdem mit steigenden Strompreisen immer rentabler umzusetzen.
- Die Stromeinsparungen fallen zwar prozentual geringer aus als die Steigerungen bei der Eigenerzeugung. Wegen der unterschiedlichen Ausgangssituation entspricht aber der Absolutbetrag einer Stromeinsparung von nur 20 % dem

einer Verdoppelung der Faulgasverstromung. Stromeinsparung ist auch deswegen sinnvoll, weil es oft einhergeht mit einer verfahrenstechnischen Optimierung der Kläranlage, die weitere positive Effekte haben kann.

- Die möglichen Stromeinsparungen können leicht überkompensiert werden durch den Mehrverbrauch neuer Techniken. Insbesondere die Installation von Biomembrananlagen für nur 10 % der Einwohnerwerte würde selbst die maximal mögliche Stromeinsparung aller Kläranlagen auffressen.

In der Summe wird die Energieautarkie für Kläranlagen mit Faulung bzw. die Klimaneutralität der Abwasser- und Klärschlammbehandlung insgesamt vielleicht visionär, aber nicht illusionär. Dies belegen erste Beispiele von Kläranlagen unterschiedlicher Konzeption und Größenklasse, die in Teilbereichen oder auch in der Gesamtbilanz die Zielwerte erreicht haben. Allerdings ist dies in der Regel nur in einem langjährigen intensiven Optimierungsprozess unter engagierter Mitwirkung aller Beteiligten möglich. Dies kann nicht auf allen Kläranlagen erwartet oder verordnet werden. Daher wird die Energieautarkie mit den entsprechenden Kennwerten zwar als Zielgröße definiert, aber nicht als einzuhaltender Grenzwert postuliert.

Erstellt von

ARGE iat-Ingenieurberatung für Abwassertechnik

Darmstadt, Stuttgart, November 2006

## 9. Literaturverzeichnis

- Addicks R.; Versuche der Stadt Stuttgart zur Sandfiltration und Mikrosiebung; Landesgruppentagungen 76/77, Berichte der DWA (ATV), Heft 30 Hrsg., DWA (ATV) 1977; ADDICKS R. 1977
- Agis Hermann ; Energieoptimierung von Kläranlagen; Wiener Mitteilungen, Bd. 176, S. 133-17, 2002; AGIS H. 2002
- Agis Hermann; Prof. Dr. Helmut Krois; Energieoptimierung von Kläranlagen - Detailuntersuchung von 21 Anlagen; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Österreich, 2002; AGIS H. et al. 2002
- Albrecht O.; Sandfilter im Ablaufgerinne des Nachklärbeckens; KA Korrespondenz Abwasser Betriebsinfo, 1/2001, S. 975-976; ALBRECHT O. 2000
- Amt für Bundesbauten Amt für Umweltschutz und Energie Basel Landschaft Hrsg.; STROMBOLI Stromkennzahlen für Bauherren öffentlicher Liegenschaften; ; AMT FÜR BUNDESBAUTEN BASEL 1996
- Angermüller Gerd; Thomas Christian; Abendt Rainer-Werner ; Auswirkung von konstanten Filtergeschwindigkeiten auf die simultane Denitrifikation im Sandfilter; gwf Wasser Abwasser, 9/1998, S. 575 ff.; ANGERMÜLLER G. et al. 1998
- aquabench GmbH; Rheinland Pfalz startet Benchmarking Projekt; Wa Nr. 34 v. 05.10.2005, EUWID Wasser und Abwasser ; AQUABENCH 2005
- Austermann-Haun Ute; Wendler Daniel ; Co-Fermentation auf Kläranlagen - Erfahrungen aus Forschung und Praxis; DWA (ATV) Forschungsfonds, Projektnummer 20/1997; Abschlussbericht zu den Forschungsvorhaben: "Mitbehandlung organischer industrieller Reststoffe in kommunalen Faulbehältern", Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik; Universität Hannover; AUSTERMANN-HAUN U. et al. 2000
- Austermann-Haun Ute; Wendler Daniel; Reosenwinkel Karl-Heinz; Großtechnische Erfahrungen mit der Co-Fermentation in Deutschland; KA Korrespondenz Abwasser, 10/2001, S. 1443 - 1451; AUSTERMANN-HAUN U. et al. 2001
- Barjenbruch Matthias; Leitungsfähigkeit und Kosten von Filtern in der kommunalen Abwasserreinigung; Institut für Siedlungswasserwirtschaft Uni Hannover, Heft 97; BARJENBRUCH M. 97
- Barjenbruch Matthias u.a. ; Ermittlung von aktuellen Betriebserfahrungen von Biofiltern zur Bildung von Kennzahlen; DWA (ATV) Projekt 2/2001; BARJENBRUCH M. 2001
- Barjenbruch Matthias u.a. ; Versuche zur nachgeschalteten Denitrifikation in einem kontinuierlich gespülten Sandfilter; KA Abwasser Abfall, 5/1998, S. 922 ff., 1998; BARJENBRUCH M. et al. 1998

- Barjenbruch, Matthias; Quo vadis Klärschlamm? ; KA Korrespondenz Abwasser 08/2002; BARJENBRUCH M. 2002
- Barth Matthias; Tietze Rainer ; Schlammfäulung bei kleinen und mittleren Kläranlagen : Verfahren und ökonomische Einordnung; Dresdner Berichte, Band 17, S. 163-194, 2001; BARTH M. et al. 2001
- Bäuerle U. ; Vergleich von anaerober Fäulung und aerober thermophiler Stabilisierung unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten; Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 10, 1989; BÄUERLE U. 1989
- Baumann A. ; Varianten zur Erweiterung aerober Stabilisierungsanlagen unter Berücksichtigung investiver, betrieblicher und energetischer Aspekte; Schriftenreihe WAR, Bd. 123, S. 143-166, 2000; BAUMANN A. 2000
- Baumbach Annett; Sägebrecht Dagmar; Heine Arnd; Kostenkennziffern für Abwasserpumpwerke; KA Korrespondenz Abwasser, 11/2001, S. 1623 - 1628; BAUMBACH A. et al. 2001
- Baumgart H. C.; Einsparung von Investitions- und Betriebskosten bei der Klärschlammverbrennung; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 27, S. 434-443, 2001; BAUMGART H. C. 2001
- Becher Daniel ; Energieoptimierung : Ein Thema der Ausbildung des Klärwerkpersonals; VSA-Verbandsbericht Nr. 517, 1997, S. 141 ff; BECHER D. 1997
- Behmel Uwe; Meyer-Pittroff ; Risiken bei der Cofermentation organischer Reststoffe in Biogasanlagen; KA Abwasser Abfall, 12/1996, S. 2172 ff; BEHMEL U. et al. 1996
- Bergmann Dieter ; Zur Sinnfälligkeit der Schlammfäulung vor einer Schlammverbrennung; Dresdner Berichte, Band 17, S. 149-162, 2001; BERGMANN D. 2001
- Billmaier Karl; Bolle Friedrich W. ; Technik und Wirtschaftlichkeit der Co-Vergärung; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 177, 2000, S. 59/1 - 59/17; BILLMAIER K. et al. 2000
- Bongards Michael ; Der Energieverbrauch kommunaler Kläranlagen in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt in der biologischen Stufe; KA Korrespondenz Abwasser, 5/2000, S. 697 - 705 ; BONGARDS M. 2000
- Böning Th.; Döding B.; Dressler H.; Faulgasverwertung in Brennstoffzellen : Das Projekt Ahlen. ; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 44, S. 167 - 182, 2002; BÖNING T. et al. 2002
- Brandenburg Heinz; Energieoptimierung der Kölner Kläranlage; Gewässerschutz-Wasser-Abwasser GWA/Bd. 172, 1999, S. 25/1 ff. ; BRANDENBURG H. 1999

- Brautlecht Peter; Gredigk Sylvia ; Alternatives Managementkonzept zur Energieoptimierung auf Kläranlagen; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 178, 1999, S. 12/1 - 12/13 ; BRAUTLECHT P. et al. 1999
- Brendel Gerhard ; Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Wärmepumpen auf Kläranlagen, Untersuchungen an Modellanlagen; Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1983; BRENDEL G. 1983
- Bruns Nurlu ; Stromkosteneinsparung in kommunalen Kläranlagen durch Optimierung der Belüftersteuerung; Wasser und Abfall - Boden, Altlasten, Umweltrecht, 9/2003, S. 26-29; BRUNS N. 2003
- Burbaum Hubert; Dickmann Thomas; Kery Karoly; Pascik Imre; Radermacher Helmut; Biokatalytische Verbesserung der Klärschlammfäulung durch Enzyme ; KA Korrespondenz Abwasser 08/2002; BURBAUM H. et al. 2002
- Burch Peter ; Mess-, Steuer- und Regeltechnik im Dienst der Energieoptimierung; VSA-Verbandsbericht Nr. 517, 1997, S. 41 ff.; BURCH P. 1997
- Buri René; Kobel Beat ; Wärmegewinnung aus Abwasser; KA Korrespondenz Abwasser Betriebsinfo 2005 35; RENÉ B. et al. 2005
- Burkhardt Detlef; Eichinger Joachim ; Optimierung des Einsatzes von Sandfiltern zur Denitrifikation; Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, TU München, 1997, Nr. 130, S. 153 ff. ; BURKHARDT D. et al. 1997
- Bux Markus u.a; Solare Trocknung von Flüssigschlamm in kleinen Kläranlagen; KA Korrespondenz Abwasser, 3/2002, S. 341 - 344 ; BUX M. et al. 2002
- Bux Markus; Baumann Rainer ; Wirtschaftlichkeit und CO<sub>2</sub>-Bilanz der solaren Trocknung von mechanisch entwässertem Klärschlamm ; KA Korrespondenz Abwasser 09/2003; BUX M. 2003
- Bux Markus; Baumann; Rainer; Solare Trocknung von Klärschlamm; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; BUX M. et al. 2003
- Chenal R.; Vuillerat C.A.; Roduit J. ; Elektrizität aus Abwassersystemen; ; CHENAL R. 1995
- Christmann Bertold; Lezius Florian ; Ermittlung und Beurteilung des Energieeinsparpotentials von Kläranlagen; KA Korrespondenz Abwasser 45 Nr. 5, 1998; CHRISTMANN B. et al. 1998
- Cornel P.; Schaum C. ; Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammasche; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 190, S. 71/1-71/19, 2003; CORNEL P. et al. 2003
- Cornel P.; Wagner M.; Krause S. ; Sauerstoffeintrag in grosstechnischen Membranbelebungsanlagen; Schriftenreihe WAR, Bd. 134, S. 127-148, 2001; CORNEL P. et al. 2001

- Croissier Wolfgang G. ; Optimierung von Stromlieferverträgen auf kommunalen Klär- und Pumpenanlagen; UAN-Schriftenreihe, Heft 32, S. 9 ff., 1998; CROISSIER W. 1998
- Daniel Hellström Erik Kärrmann; Exergy analysis and nutrient flows of various sewerage systems; Water Science and Technology Vol. 35; HELLSTRÖM D. et al. 1997
- Demoulin Gunnar; Mervyn C. Goronsky; Einfluss der Online-Atmungs-Regelung auf die Betriebskosten von zyklischen Abwasserbehandlungsanlagen; KA Korrespondenz Abwasser 50/2003; DEMOULIN G. et al. 2003
- Dichtl Norbert ; Neue Energiekonzepte auf Kläranlagen unter Einbeziehung der Wasserstofftechnologie; KA Korrespondenz Abwasser 3/2004; DICHTL N. 2004
- Dichtl Norbert ; Energieeinsparung in Abwasserreinigungsanlagen bei Planung und Betrieb unter Beachtung aktueller Meß- und Regeltechnik; DWA (ATV) Landesgruppentagung Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland 1997, S. 21 ff. ; DICHTL N. 1997
- Dichtl Norbert ; Verfahrenstechnische Möglichkeiten und Kosten bei der Minimierung des Klärschlammmanfalls; Abfall - Recycling - Altlasten, Bd. 27, Teil II, 2002, S. 70/1 - 70/14; DICHTL N. 2002
- Dichtl Norbert u.a. ; Desintegration von Klärschlamm : ein aktueller Überblick; KA Abwasser Abfall, 10/1997, S. 1726 ff. ; DICHTL N. et al. 1997
- Dichtl Norbert; Fuhrmann D.; Hartmann K.H.; Kapp H.; Köhlhoff D.; Siekmann K. ; Energieverbrauch und Emissionen bei der Abwasserbehandlung; KA Korrespondenz Abwasser 11/1991; DICHTL N. et al. 1991
- Dichtl Norbert; Kopp Julia; Entwässerungsverhalten von Klärschlämmen aus Anlagen mit Membranfiltration; wap Wasser Abwasser Praxis, 1/1999, S. 35 ff.; DICHTL N. et al. 1999
- Dippert T. ; Trocknung und Kompostierung, Behandlungsalternativen für Klärschlamm im Rottecontainer; Schriftenreihe WAR, Bd. 132, S. 313-320, 2001; DIPPERT T. 2001
- Dittrich J.; Gnirß R.; Peter-Fröhlich A.; Sarfert F.; Betriebserfahrungen und Kostenbetrachtungen für die Mikrofiltration von gereinigtem Abwasser – Ergebnisse eines BMBF-Forschungsvorhabens; ; DITTRICH ET AL., 1998
- Dittrich J. ; Membranfiltration als nachgeschaltete Stufe in der kommunalen Abwasserreinigung; DWA (ATV) Landesgruppentagung Nord-Ost, 1999, S. 58 ff.; DITTRICH J. 1999
- Dohmann M; Michalska A. ; Auswirkungen von reduziertem Wasserverbrauch und Fremdwasserreduzierung auf den Betrieb und die Kosten von Abwasseranlagen; Entwicklungen in der Kanalisationstechnik, Tagung, 1999, S. 1/1 - 1/19 ; DOHMANN M et al. 1999

- Dorias Bernd; Appel Ernst; Flügel Peter ; Betriebsoptimierung der Kläranlagen der Stadt Nürnberg ; KA Korrespondenz Abwasser, 1/2001, S. 91 - 95 ; DORIAS B. et al. 2001
- DWA (ATV); ATV-Handbuch: Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 1997; ; DWA (ATV), 1997
- DWA (ATV); Merkblatt ATV-M 205: Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser, 1998; ; DWA (ATV), 1998
- DWA (ATV); DWA Merkblatt M 299 (Entwurf): Einsatz von Brennstoffzellen in Kläranlagen, 2006; ; DWA (ATV), 2006
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe 3.1.6 Hrsg.; Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlamm-Desintegration; Arbeitsbericht der DWA (ATV) Arbeitsgruppe 3.1.6 "Klärschlamm-Desintegration", KA Korrespondenz Abwasser, 4/2000, S. 570 - 576 ; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE 3.1.6 2000
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe AK-1.1 Phosphor-Rückgewinnung Hrsg.; Phosphorrückgewinnung; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE AK-1.1 2003
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe AK-1.3 Rückbelastung aus der Schlammbehandlung; Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Verfahren zur Schlammwasserbehandlung; ; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE AK-1.3 2005
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe AK-1.6 AK Abfall/Klärschlamm Hrsg.; DWA (ATV) Sonderdruck Mechanische Klärschlamm-Desintegration ; KA Korrespondenz Abwasser 02/2002; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE AK-1.6 2002
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe AK-1.6 Klärschlamm-Desintegration Hrsg.; Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE AK-1.6 2003
- DWA (ATV) Arbeitsgruppe ES-1.3; Fremdwassersituation in Deutschland; Arbeitsbericht; KA Korrespondenz Abwasser, 1/2003, S. 70 - 81; DWA (ATV) ARBEITSGRUPPE ES-1.3 2003
- DWA (ATV) Fachausschuss RE-4 "Rechtsfragen zu Kreislaufwirtschaft und Bodenschutz"; Zur Zulässigkeit der Mitbehandlung organischer Stoffe in kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen - Co-Vergärung; Juli 2005; DWA (ATV) CO-VERGÄRUNG 2005
- DWA (ATV) Hrsg.; ATV M-253 Automatisierungs- und Leittechnik auf Abwasseranlagen; ; DWA (ATV)
- DWA (ATV) Hrsg.; ATV-Handbuch, Bd. Klärschlamm, 4. Auflage, Berlin; 1996; DWA (ATV) (HRSG.)

- DWA (ATV) Hrsg.; Auf Kläranlagen Stromkosten sparen; DWA (ATV) Hinweis H 259, 1988; DWA (ATV) 1988
- DWA (ATV) Hrsg.; Auf Kläranlagen Strom sparen; DWA (ATV) Hinweisblatt H 259, 1988; DWA (ATV) 1988
- DWA (ATV) Hrsg.; ATV-Schriftenreihe Bd. 9, Biogas -Verwertung und Aufbereitung; 1997; DWA (ATV) 1997a
- DWA (ATV) Hrsg.; ATV Handbuch Betriebstechnik; 1997; DWA (ATV) 1997b
- DWA (ATV) Hrsg.; ATV-Handbuch, Bd. Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, Auflage, Berlin; 1997; DWA (ATV) 1997c
- DWA (ATV) Hrsg.; Mechanische Klärschlammdeintegration : Verfahren, Anwendungsbereiche, Verfahrensvergleich und Ergebnisse; Arbeitsbericht der DWA (ATV) Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlammdeintegration" Hennef, 2001 ; DWA (ATV) 2001
- DWA (ATV) Hrsg.; DWA (ATV) A 202 Entwurf – Phosphorelimination ; KA Korrespondenz Abwasser 10/2002; DWA (ATV) 2002
- DWA (ATV) Hrsg. ; ATV-Merkblatt M 252 Empfehlungen zur Gestaltung von Stromlieferungsverträgen bei Kläranlagen; DWA (ATV) Regelwerk Abwasser-Abfall, 1997; DWA (ATV) 1997
- DWA (ATV) Hrsg. ; Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen; Merkblatt ATV-DVWK-M 363, DWA (ATV) Regelwerk, 2002; DWA (ATV) 2002
- DWA (ATV) Projektgruppe Wasserstoff Hrsg.; Kläranlagen als Baustein der Energie-Infrastruktur von morgen?; KA Korrespondenz Abwasser 09/2002; DWA (ATV) PROJEKT-GRUPPE WAS-SERSTOFF 2002
- DWA (AVT) Fachausschuss 3.1 Hrsg. ; Energiebilanz auf Kläranlagen; Arbeitsbericht, 1999; DWA (AVT) FACHAUSSCHUSS 1999
- Eder Bernhard; F. Günthert Wolfgang ; Klärschlammminimierung durch Zellaufschluss mit Ultraschall ; KA Korrespondenz Abwasser 03/2003; EDER B. et al. 2003
- Eder Bernhard; Günthert Wolfgang ; Auslegung von Ultraschallanlagen zur Klärschlammbehandlung; Dissertation Bundeswehr Universität München, Mitteilung in KA Korrespondenz Abwasser 12/2005; EDER B. et al. 2005
- Eichinger J. Kramer P. ; Großversuch zur Denitrifikation im Sandfilter des Klärwerkes München II; KA Korrespondenz Abwasser 07/1992 S. 1026 ff; EICHINGER J. et al. 1992
- Eirich Bernd; Müller Burkhard; Spohler Leonhard; Zimpfer Rigobert ; Klärgas-BHKW-Anlagen die nach dem Hessischen Energiegesetz gefördert wurden; hessen-ENERGIE GmbH, 1995; EIRICH B. et al. 1995

- Ellersdorfer Ernst; Betriebserfahrungen mit BHKWs mittlerer und großer Bauart; DWA (ATV) Schriftenreihe, Band 09, 1997, S. 359 ff. ; ELLERSDORFER E. 1997
- Engelhardt N. ; Wirtschaftlichkeit einer großtechnischen kommunalen Membranbelebungsanlage am Beispiel der Kläranlage Nordkanal (80 000 EW) des Erftverbandes; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 188, Teil 1, 2002, S. 26/1 - 26/19; ENGELHARDT N. 2002
- Ermel, Achim; CO-Vergärung von Bioabfall vor dem Hintergrund der EU-Hygienevorschrift für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte; Schriftenreihe WAR, Bd. 176, S. 93-109, 2006; ERMEL 2006
- EU Kommission ; Energieeffiziente Elektromotoren - ein EU-weites Pilotprogramm - Das europäische Motor Challenge Programm ; ; EU-KOMMISSION
- EU-Kommission Hrsg.; Grünbuch Energie EU 2005; 2005; EU-KOMMISSION 2005
- Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V., Hrsg; Regenerative Energie aus der Trockenwetterrinne ; KA Korrespondenz Abwasser 11/2003; FBS 2003
- Felde Dierk von; Ferdinand Schmitt; Trocknung störfstoffhaltiger Klärschlämme ; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; FELDE D.v. et al. 2003
- Firk Wolfgang ; Integration der Membranfiltration in das Belebungsverfahren; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Band 158, 1997, S. 26/1 ff. ; FIRK W. 1997
- Forschungszentrum Jülich Hrsg.; Drittfinanzierung von Energiesparvorhaben im öffentlichen Sektor; Tagungsband Nürnberg 17-18.10.1995; FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH 1995
- Frauendorf Günter ; Tauchmotor-Rührwerke in Belebungsanlagen; umweltpraxis Abwasser/Abfall/Management, 4/2001, S. 36-38 ; FRAUENDORF G. 2001
- Frechen F. B. ; Membranfiltration zur Ertüchtigung von Kläranlagen in Hessen; Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung Perspektiven, Neuentwicklungen u. Betriebserfahrungen, 2001, A3, 18 S. ; FRECHEN F. B. 2001
- Frei Werner ; Betriebsoptimierung und Erfahrungen mit WKK-Anlagen in ARA; VSA-Verbandsbericht Nr. 517, 1997, S. 103 ff; FREI W. 1997
- Frey W.; Einsatz von Oberflächenbelüftungssystemen - heute wieder gerechtfertigt?; Schriftenreihe WAR, Bd. 134, S. 177-195, 2001; FREY W. 2001
- Friedrich Volkmar; Beckler Josef; Schneider Martin; Klärgasreinigung mittels Aktivkohle : eine wirtschaftliche Lösung für den Einsatz eines Oxidationskatalysa-

- tors bei gleichzeitiger Vermeidung silicatischer Ablagerungen; KA Korrespondenz Abwasser, 11/2000, S. 1637 - 1640; FRIEDRICH V. et al. 2000
- Grabski C.; Ökobilanz einer Kläranlage; KA Abwasser Abfall, 6/1996, S. 1053 ff; GRABSKI C. 1996
- Grägel; Grägel, W.: Abwasserdesinfektionsanlage auf der Kläranlage Bad Tölz, Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Band 55, 2003; ; GRÄGEL 2003
- Gredigk Sylvie; Stölting Birgit ; Von der Windkraft zur Brennstoffzelle ; DWA (ATV) Bundes- und Landesverbandstagung 2001, S. 142-153, 2001; GREDIGK S. et al. 2001
- Groth H. ; Energieoptimierung einer Kläranlage Burgstadt Heiersdorf; 1996; GROTH H. 1996
- Grünebaum Thomas; Evers Peter ; Vergleichende Betrachtungen über den Energieverbrauch auf Kläranlagen ; KA Abwasser Abfall, 12/1999, S. 1890 ff.; GRÜNEBAUM T. et al. 1999
- Grünebaum Thomas; Thöle Dieter; Schmitt Ferdinand ; Fallbeispiele zur Energie - Optimierung von Kläranlagen im Spannungsfeld von Praxis und Psychologie; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 20, S. 709-720, 2000; GRÜNEBAUM T. et al. 2000
- Günder Berthold ; Das Membranbelebungsverfahren in der kommunalen Abwasserreinigung; KA Korrespondenz Abwasser, 11/2000, S. 1627 - 1633; GÜNDER B. 2000
- Günther F.; Osswald M. ; Weniger Klärschlamm durch Klärschlammbehandlung mit Ultraschall; Nürnberger Abwassertagung 1998, S. 92 ff.; GÜNTHERT F. et al. 1998
- Günther F.W. u.a. ; Minimierung des Schlammanfalls auf Kläranlagen durch Desintegration : Bestandsaufnahme auf großtechnischen Anlagen. Neubiberg ; Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 69/1999 ISSN 0720-1273; GÜNTHERT F.W. et al. 1999
- Hahn, J.; Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser - mehr als eine politische Diskussion?; Schriftenreihe WAR Band 167, 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, Darmstadt 2005; HAHN 2005
- Halbach Uwe ; Zielfunktion für den Energieverbrauch von Kläranlagen; Umwelt Abwasser, 1999; HALBACH. U. 1999
- Hanisch Prof. Dr.-B. ; Leistungsverbesserung durch zusätzliche Maßnahmen der kommunalen Abwasserbehandlung durch einfach Sandfiltration und durch Flockungsfiltration; Berichte der DWA (ATV), Band 37 S. 269 ff, Hrsg., DWA (ATV), ST. Augustin, 1987; HANISCH B. 1987

- Hauke Alois ; Stromgewinnung in einer kleinen Kläranlage mit aerober Stabilisation; KA Korrespondenz Abwasser 29/1999; HAUKE A. 1999
- Haydt W. ; Sandfiltration im Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen; Berichte der DWA (ATV), Heft 41, 1991, S. 441 ff.; HAYDT W. 1991
- Heimann Michael ; Leistungserhöhung der Kläranlage senkt Betriebskosten; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 5/2002, S. 26 - 29 ; HEIMANN M. 2002
- Henze Michael ; Abwasser als Energiequelle, Wärmerückgewinnung aus dem Abwasserkanal; bi Umwelt Bau 6/2004; HENZE M. 2004a
- Heppe Andreas ; Elektrolytische Membranfiltration : ein neuer Weg der weitergehenden Abwasserreinigung; wlb Wasser, Luft und Boden, 7-8/2000, S. 25 - 26 ; HEPPE A. 2000
- hessenENERGIE GmbH Hrsg.; Energiedienstleistungs- und Contracting-Angebote in Hessen; Fachtext 10.4, Wiesbaden, 1996; HESSENENERGIE 1996
- Hessisches Ministerium für Umwelt Energie Jugend Familie und Gesundheit Hrsg.; Contracting Leitfaden für öffentliche Liegenschaften; 1998; Hessisches Ministerium für Umwelt 1998a
- Hessisches Ministerium für Umwelt Energie Jugend Familie und Gesundheit Hrsg.; Geförderte Biogasprojekte in Hessen; 1998; Hessisches Ministerium für Umwelt 1998b
- Hoffmann Jan; Schrader Rainer ; Kostenvergleichsrechnungen am Beispiel Faulgasverwertung auf Kläranlagen; KA Abwasser Abfall, 5/1997, S. 910 ff.; HOFFMANN J. et al. 1997
- Hoffmann Jan; Schrader Rainer ; Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Faulgasverwertung auf Kläranlagen; UAN-Schriftenreihe, Heft 32, S. 22 ff., 1998; HOFFMANN J. et al. 1998
- Hohmann Rüdiger; Energiewirtschaft auf Kläranlagen; ; HOHMANN R.
- Höhne Andrea ; Desintegration von Schlämmen ; KA Korrespondenz Abwasser 08/2002; HÖHNE A. 2002
- Hollinger AG K. Schweizer AG ; ARA Mittelthurgau, Weinfelden - Energetische Feinanalyse ; 1994; HOLLINGER AG et al. 1994
- Hopp Gerhard; Zwanziger Peter ; Gefilterte Energie; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 7/2002, S. 40 - 41; HOPP G. et al. 2002
- Hörner Michael; Müller Burkhard ; Stromsparuntersuchung in der Kläranlage des Abwasserverbandes Limburg; hessenENERGIE GmbH; !%; HÖRNER M. et al. 1995

- Hungerbühler Erich; Verfahrenstechnik und Energieoptimierung: Stellenwert, Betriebsoptimierung, Betriebskosteneinsparung; VSA-Verbandsbericht Nr. 517, 1997, S. 27 ff.; HUNGERBÜHLER E. 1997
- Hunze Michaela; Sauerstoffzufuhr in Belebungsbecken durch Oberflächenbelüfter; KA Korrespondenz Abwasser, 4/2003, S. 464 - 469; HUNZE M. 2003a
- Hunze Michaela; Effizienzsteigerung im Kläranlagenbetrieb; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 3-4/2003, S. 38 - 42; HUNZE M. 2003b
- Ingenieurbüro Ryser AG Intep AG Aqua System AG; Energetische Feinanalyse ARA Worblental / BE; 1994; RYSER AG et al. 1994
- Jung Rolf u.a.; Potential der Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 190, S. 70/1-70/17, 2003; JUNG R. et al. 2003
- Kapp H.; Beitrag der Abwasserbehandlung zur CO<sub>2</sub>-Belastung der Umwelt; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 114, 1991; H. KAPP 1991
- Kapp H.; Leistungsgrenzen von Belüftungssystemen; KA Abwasser Abfall, 1/1996, S. 95 ff., 1996; KAPP H. 1996
- Karner A. Birlinger M. Benz R. Jordy M.; Leistungssteigerung auf Großkläranlagen durch intermittierende Betriebsweise; KA Korrespondenz Abwasser 07/2003; KARNER A. 2003
- Kassner Wolfram; Solare Klärschlamm-trocknung; KA Korrespondenz Abwasser - Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 01/2000, S. 91 ff.; KASSNER W. 2000
- Kaste Andrea; Energiemanagement auf Kläranlagen - Analysemethoden und Fördermöglichkeiten in NRW; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 37, S. 169-185, 2000; KASTE A. 2000
- Kaste Andrea; Handbuch zur Energiekostenoptimierung; wwt 1/2000; ANDREA K. 2000
- Kayser R.; Betriebsoptimierung der Stickstoffelimination durch MSR-Techniken; Schriftenreihe WAR, Band 75, TH Darmstadt, 1994; KAYSER R. 1994
- Kazner Chr. Riegler; Energiesparen auf Kläranlagen; Umweltreport; KAZNER C. et al. 1999
- Keicher et al.; Keicher, K.; Krampe, J.; Rott, U.; Ohl, M.; Blesl, M.; Fahl, U.: Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen - Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg, Forschungsbericht i. A. Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS), 2004; 2004; KEICHER ET AL. 2004

- Kiefer; U.; Krauth. Kh. ; Energieeinsatz auf Kläranlagen ; Diplomarbeit Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft Universität Stuttgart 1996; KIEFER U. et al. 1996
- Knappe F.; Vogt R. ; Ökobilanz der Co-Fermentation von Abfällen in Faulbehältern; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 37, S. 225-241, 2000; KNAPPE F. et al. 2000
- Kobel Beat; Müller Ernst A. et al.; Energie in Kläranlagen, Handbuch ; Handbuch des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, NRW; MURL NRW. 1999a
- Kobel Beat; Müller Ernst A. et al.; Energie in Kläranlagen - EDV-Programm für Grob- und Feinanalysen; Handbuch des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, NRW; MURL NRW. 1999a
- Koch F. ; Tauchmotor-Rührwerke: Auslegung, Strömungsführung und Installation Gut gerührt ist halb geklärt!; KA Korrespondenz Abwasser 05/1990 S. 625 ff; KOCH F. 1990
- Kommunale Umwelt-AktioN (U.A.N.) Hrsg.; Optimierung von Kläranlagen; Schriftenreihe der Kommunalen Umwelt-AktioN U.A.N., Heft 32, 1998; KOMMUNALE UMWELT-AKTION 1998
- Komorowski Klaus ; Einsatz Erneuerbarer Energien als Energieversorgung bei der kommunalen Abwasserbehandlung; Gewässerschutz Wasser Abwasser, GWA, 131, Seite 415 ff., 1992; KOMOROWSKI K. 1992
- Köpke Ralf ; Watt mit jeder Toilettenspülung; Energie 2/2002; KÖPKE R. 2002
- Koppetsch Jürgen ; Bemessung, Auslegung und Planung von BHKW-Anlagen für Klärwerke; DWA (ATV) Schriftenreihe, Band 09, 1997, S. 237 ff.; KOPPETSCH J. 1997
- Köppke Karl-Erich ; Klärschlammdeintegration - ein Weg zur Betriebskostensenkung auf kommunalen Kläranlagen; WAP Wasser Abwasser Praxis, 1/1999, S. 39 ff.; KÖPPKE K.-E. 1999
- Krampe; Laufer; Krampe, J.; Laufer, R.: Betriebserfahrungen mit der kommunalen Membranbelebungsanlage der Stadtwerke Schramberg in Waldmössingen, Wasser und Abfall, 2005; 2005; KRAMPE 2005
- Krampe; Laufer; Abwasserreinigung mit Membrantechnologie (Kläranlage Waldmössingen), Dienstbesprechung Kommunales Abwasser und Gewässerschutz des Umweltministeriums Baden-Württemberg, in Vorbereitung; 2006; KRAMPE UND LAUFER 2006
- Krampe; Vetter; Grundlagen, Technologien und Kosten der Desinfektion von Kläranlagenabläufen, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 174, 2003; 2003; KRAMPE UND VETTER 2003

- Krause; Krause, S.: Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsanlagen, Schriftenreihe WAR 166, Darmstadt 2005; 2005; KRAUSE 2005
- Krause S.; Cornel P.; Wagner Martin; Sauerstoffeintrag und  $\alpha$ -Werte in Membranbelebungsanlagen; KA Korrespondenz Abwasser, 11/2001, S. 1573 - 1579; KRAUSE S. et al. 2001
- Kroiß H.; Prendl L; Einfluß von Fremdwasser auf Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen; zur Wasserwirtschaft der TU Graz, Band 18, 1996 S. 27 ff.; KROISS H. et al. 1996
- Kunz P. Müller A. ; Energiekostensenkung bei der kommunalen Abwasserreinigung durch den Abbau von Strombezugsspitzen; BMFT, Forschungsbericht 02 WA 85213, Karlsruhe, 1986 ; KUNZ P. et al. 1986a
- Kunz P. Müller A. ; Ergebnisse von Stromverbrauchsmengen in kleineren und mittelgroßen Kläranlagen. Ein Beitrag zur differenzierten Betrachtung des Energiehaushalts von Kläranlagen; KA Korrespondenz Abwasser 05/1986 S. 405 ff; KUNZ P. et al. 1986b
- Kunz P.M. Mandel S. Theunert B. Wagner S. ; Desintegration von Klärschlamm; Schriftenreihe des ISWW -Karlsruhe, Band 71, Seite 139 ff., 1994; KUNZ P.M. et al. 1994
- Kunz P.M.; Theunert Birte; Wagner S. ; Erkenntnisse und Erfahrungen aus praktischen Anwendungen der Klärschlamm-Desintegration; KA Abwasser Abfall, 7/1996, S. 1289 ff. ; KUNZ P.M. et al. 1996
- Kunz Peter; Nutzung von Faulgas; Abwassertechnik 06/1989 S. 26 ff ; KUNZ P. 1989
- Kunz Peter; Hillenbrand Thomas ; Optimierung des Energiebezuges von Kläranlagen Stromlastregulierung; KA Korrespondenz Abwasser 4/89; KUNZ P. et al. 1989
- Kunz Peter; Schlichter; Annette ; Eigenständige Energiebedarfsanalyse durch das Klärpersonal; KA Korrespondenz Abwasser Betriebsinfo 1/1990; KUNZ P. et al. 1990
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL; Kofermentation; Arbeitspapier, Darmstadt, 1998; KTBL 1998
- Lang H.; Energieoptimierung bei der Projektierung eines Klärwerks gezeigt am Beispiel Klärwerk Bändlegrund des Wieseverbandes Lörrach; KA Korrespondenz Abwasser 06/1982 S. 399 ff ; LANG H. 1982
- Lange M. ; Betriebsoptimierung durch Einführung eines integrierten Qualitäts- und Umweltmanagements - Erfahrungen kommunaler Abwasserbetriebe in NRW; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 37, S. 133-146, 2000; LANGE M. 2000
- Langhans Gerhard ; Co-Vergärung in der Praxis; Abfallbrief, 2/2000, S. 4 ff; LANGHANS G. 2000

- Laubach J. ; Vergleich verschiedener Membransysteme zur Biomasseabtrennung; Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung Perspektiven, Neuentwicklungen u. Betriebserfahrungen, 2001, A19, 15 S; LAUBACH J. 2001
- Lehne G. u.a.; Beurteilung des Aufschlußerfolges und Vergleich verschiedener Verfahren des Klärschlammaufschlusses; Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 61, 1998, S. 83 ff. ; LEHNE G. et al. 1998
- Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft Ruhr-Universität Bochum Hrsg. ; Neue Konzepte und Technologien in der Abwasserentsorgung; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 44, 2002; SIWAWI 2002
- Lemmer H. u.a. ; In situ-Nachweis der dominanten Denitrifikantenpopulation zur biologisch begründeten Betriebsoptimierung der methanol-gestützten Denitrifikation in einem Sandfilter; Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie, Bd. 52, 1998, S. 43 ff.; LEMMER H. et al. 1998
- Lemmer Hilde; Zaglauer Anita; Metzner Gerhard ; Optimierung der Denitrifikation im Festbettverfahren.; KA Abwasser Abfall, 9/1997, S. 1581 ff.; LEMMER H. et al. 1997
- Lindtner Stefan; Kroiss Helmut; Nowak Otto ; Benchmarking des Betriebes von 76 österreichischen Kläranlagen; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 190, S. 14/1-14/16, 2003; LINDTNER S. et al. 2003
- Loll Ulrich ; Biogaspotentiale im Klärschlamm und anderen biogenen Abfällen; KA Korrespondenz Abwasser, 10/2001, S. 1424 - 1429 ; LOLL U. 2001
- Londong Jörg ; Auswirkungen von Fremdwasser auf Kanalisation und Kläranlage. ; DWA (ATV) Landesverbandstagung Sachsen/Thüringen 2003, S. 45-56 ; LONDONG J. 2003
- Lützner K. u.a. ; Erneuerbare Energien aus dem Schlamm kleiner und mittlerer Abwasserbehandlungsanlagen; Schriftenreihe WAR, Bd. 132, S. 223-246, 2001; LÜTZNER K. et al. 2001
- Lützner Klaus; Möller F.-W. ; Möglichkeiten der Betriebsoptimierung bei unterbelasteten Kläranlagen; Schriftenreihe WAR, Bd. 91, TH-Darmstadt, 1996, S. 223 ff.; LÜTZNER K. et al. 1996
- Maass Dieter ; Pumpen für die Abwasserwirtschaft ; KA Korrespondenz Abwasser 07/2003; MAASS D. 2003
- Maurer Max; Fux Christian, Siegrist Hansruedi; Nitrifikation, Denitrifikation und Energieeffizienz des Wirbelbettverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung; KA Korrespondenz Abwasser, 9/2003, S. 1142 - 1151; MAURER M. 2003
- Mertsch Viktor; Wiedenhöft Claudia ; Aktueller Stand des LUA-Merkblattes zur "Mitbehandlung von biogenen Abfällen in Faulbehältern"; Forum Siedlungswas-

serwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, Heft 16/2000, S. 1-12 ;  
MERTSCH V. et al. 2000

Michalska Agnieszka; Pecher Klaus H. ; Betriebliche und kostenmäßige Auswirkung  
des Fremdwassers auf Kanalisation und Kläranlage; Gewässerschutz - Was-  
ser - Abwasser GWA, Bd. 177, 2000, S. 27/1 - 27/17 ; MICHALSKA A. et al.  
2000

Ministerium für Umwelt Naturschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Lan-  
des Nordrhein-Westfalen (MUNLV) Hrsg.; CO-Fermentation von biogenen Ab-  
fällen in Faulbehältern von Kläranlagen; Berichte zur Umwelt, Bereich Abwas-  
ser, Bd. 22; MUNLV NRW 2001

Ministerium für Umwelt Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-  
Westfalen (MURL NRW) Hrsg. ; Kombiniertes Einsatz von Wasserstofftechno-  
logie und regenerativen Energieträgern zur Energie- und Verfahrensoptimie-  
rung von Abwasserreinigungsanlagen : Forschungs- und Entwicklungsvorha-  
ben. Düsseldorf : ; MURL NRW, 2000, o. S.; MURL NRW 2000

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des  
Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.); Anforderungen an die Co-Fermentation  
von biogenen Abfällen in Faulbehältern von Kläranlagen; Berichte zur Umwelt  
Bereich Abwasser, Band 22, Düsseldorf 2001; MUNLV 2001

Mues Andreas ; Verfahrenstechnik und Kosten des Ultraschalleinsatzes auf Kläran-  
lagen; Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU  
Braunschweig, Heft 61, 1998, S. 271 ff.; MUES A. 1998

Müller E. A.; Kobel B. ; Verminderung der Betriebskosten von Kläranlagen durch sys-  
tematische Energieoptimierung; Schriftenreihe des ISWW, Bd. 89 Karlsruhe,  
1997; Müller Ernst A. et al. 1997b

Müller E. A.; Thommen R.; Stähli P.; Energie in ARA (Abwasserreinigungsanlagen);  
Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern/Schweiz, 1994; Müller Ernst A. et al.  
1994

Müller E. A.; Thommen R.; Stähli P.; Energie in ARA: Musteranalysen; Bundesamt  
für Konjunkturfragen, Bern/Schweiz, Materialien zu PACER, 2000; Müller  
Ernst A. et al. 2000

Müller Ernst A. ; Zwei NRW-Kläranlagen reduzieren Energiebezug um zwei Drittel ;  
Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nord-  
rhein-Westfalen MURL NRW Hrsg., 1999; Müller Ernst A. 1999

Müller Ernst A.; Kobel B. ; Verminderung der Betriebskosten von Kläranlagen durch  
systematische Energieoptimierung; Schriftenreihe des ISWW Universität  
Karlsruhe, Bd. 89, 1997, S. 63 ff.; Müller Ernst A.; KOBEL B.

Müller Ernst A.; Kobel Beat ; Nutzung von Wärme aus Abwasser mit Wärmepumpen :  
Erfahrungen in der Schweiz, Potentiale in Deutschland; KA Korrespondenz  
Abwasser, 8/2001, S. 1074 - 1090; MÜLLER E. A. et al. 2001

- Müller Ernst A.; Kobel Beat ; Erfahrungen mit der Energieoptimierung: Betriebskosten um 10 % senken; DWA (ATV) / VSA-Fachtagung 1997, S. 154 ff.; Müller Ernst A. et al. 1997a
- Müller Ernst A.; Schmid Felix; Heizen und Kühlen mit Abwasser; EnergieSchweiz, 2003; MÜLLER E. 2003
- Müller Ernst A.; Schmid Felix ; Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden; Schweiz ; SCHWEIZ
- Müller Johannes ; Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des Klärschlammaufschlusses als Verfahrensschritt der anaeroben Schlammstabilisierung ; Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 61, 1998, S. 281 ff.; MÜLLER J. 1998
- Müller Johannes ; Klärschlamm-Integration zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Schlammfaulungsanlagen; Schriftenreihe WAR, Bd. 132, S. 133-156, 2001; MÜLLER J. 2001
- Müller Johannes ; Stand der Technik bei der Klärschlamm-Integration; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 29, S. 277-306; MÜLLER J. 2003
- Müller Johannes; Mues Andreas; Oles Jürgen ; Steigerung der Energieausbeute und Reduzierung der Kosten durch Klärschlamm-Integration; Schriftenreihe SI-WAWI Bochum, Band 33, 1997, S. 103 ff. ; MÜLLER J. et al 1997
- Müller R. ; Platzer Chr.; Klärschlammvererdung : eine nachhaltige und gleichzeitig kostengünstige Methode der Klärschlammbehandlung; Schriftenreihe der Kommunalen Umwelt-Aktion, U.A.N., Heft 41, S. 58-66, 2001; PLATZER C. et al. 2001
- Müzel Franz ; Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit von Pumpwerken; umweltpraxis Abwasser | Abfall | Management, 5/2001, S. 42-45 ; MÜZEL F. 2001
- Neis Uwe; Nickel Klaus; Tiehm Andreas ; Intensivierung der Schlammfaulung durch Klärschlammaufschluß mit Ultraschall; KA Abwasser Abfall, 10/1997, S. 1850 ff.; NEIS U. et al. 1997
- Niehoff H.-H. ; Verwertung von Faulgas auf Kläranlagen in Blockheizkraftwerken; Hauptversammlung 1986, Berichte der DWA (ATV), Band 37 Hrsg., DWA (ATV) 1987 ; NIEHOFF H.-H. 1997
- Niemann K. ; Reduzierung des Bedarfs externer C-Quellen durch Betriebsoptimierung ; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Bd. 41, S. 177 - 188, 2002; NIEMANN K. 2002
- Nisipeanu Peter ; Co-Vergärung und Mono-Vergärung Zur Abgrenzung von Abfallrecht und Abwasserrecht; Abfallbrief, 2/2000, S. 12 ff.; NISIPEANU P. 2000

- Nowak Otto ; Energie -Benchmarking von Kläranlagen : Überlegungen aus abwassertechnischer Sicht; Wiener Mitteilungen, Bd. 176, S. 179-210, 2002; NOWAK O. 2002
- Ochs Annette; Widmann R. ; Einsatz der Brennstoffzellentechnologie zur Biogasnutzung; Schriftenreihe WAR, Bd. 135, S. 162-174, 2001; OCHS A. et al. 2001
- Ohle Peter; Brands Evelyn ; Membrantechnologie zur Behandlung kommunalen Abwassers; wwt wasserwirtschaft wassertechnik, 4/1999, S. 17 ff.; OHLE P. et al. 1999
- Oldenburg Martin ; Dynamische Simulation kommunaler Kläranlagen zur Betriebsoptimierung; Wasser und Abfall, 4-5/2002, S. 18 - 23 ; OLDENBURG M. 2002
- Patt Judith; Söhngen Karl-Hermann ; Modernisierung der Belüftungs- und Analysesysteme : Leistung gesteigert.; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 7-8/2003, S. 18-24, 2003; PATT J. et al. 2003
- Pecher Rolf ; Fremdwasser und seine Vermeidung - ein aktuelles Problem in der gesamten Bundesrepublik; DWA (ATV) Landesgruppentagung Sachsen/Thüringen 1998, S. 31 ff.; PECHER R. 1998
- Pille Sabine; Litzke Vera; Steffan Tim; Krause Michael ; Potentialstudie zur Abwärmenutzung in Bremerhaven; im Auftrag der Bremer Energie Konsens, 2004; PILLE S. et al. 2004
- Pinnekamp Johannes; Energieverbrauch und Energiekosten kommunaler Kläranlagen; Vortrag beim Bildungszentrum für die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, 1998; PINNEKAMP J. 1998
- Pinnekamp Johannes ; Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm; KA Korrespondenz Abwasser 10/2002; PINNEKAMP J. 2002
- Pinnekamp Johannes ; Bewertung der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm unter ökologischen, ökonomischen und technischen Kriterien; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 29, S. 119-138, 2003; PINNEKAMP J. 2003
- Pinnekamp Johannes; Mertsch Viktor; Müller Ernst A. ; Handbuch "Energie in Kläranlagen"; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 20, S. 687-700, 2000; PINNEKAMP J. et al. 2000
- Pirchner; persönliche Mitteilungen; 2006; PIRCHNER 2006
- Rautenbach R.; Melin T.; Dohmann M. ; Membrantechnik in der öffentlichen Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung - Technische Neuentwicklungen und Betriebserfahrungen im In- und Ausland; 3. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik. Aachen, RWTH, Institut für Verfahrenstechnik und Institut für Siedlungswasserwirtschaft, 2000 ; RAUTENBACH R. et al. 2000

- Reichert J. ; Betriebskosteneinsparung bei Belüftungssystemen: Praxisbeispiele; Schriftenreihe WAR, Bd. 134, S. 149-176, 2001; REICHERT J. 2001
- Reipa Anja; Kostenreduzierung für Kommunen und Verbände durch effiziente Erzeugung und Verwertung von Faulgas als Primärenergie sowie Reduzierung der Faulschlammmenge; Teilprojekt: Co-Vergärung; Emschergenossenschaft / Lippeverband, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Essen Juli 2003; REIPA 2003
- Reipa Anja; Schmelz Karl-Georg ; Verbesserte Schlammfäulung durch Zugabe verschiedener Enzympräparate ; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; SCHMELZ K.-G. et al. 2003c
- Roediger, H.; Roediger, M.; Kapp, H.; Anaerobe alkalische Schlammfäulung; R. Oldenbourg Verlag, 1990; ROEDIGER 1990
- Rolfs T. ; Simulation zur Energieoptimierung von Belebungsanlagen; Hürth, S. 68-79, 1999, DWA (ATV) Landesgruppentagung Nordrhein-Westfalen; ROLFS T. 1999
- Rölle Reinhold; Dürringer Herbert ; Praktische Aspekte bei der Biogasverwertung; Wasserwirtschaft 5/1999, S. 254 ff; RÖLLE R. et al. 1989
- Roost Gaby ; Energiesparende Massnahmen auf Kläranlagen; Zeitschrift für IP Bau, Ravel und Pacer, Schweiz, 1993; ROOST G. 1993
- Rosenwinkel K.-H.; Wagner J. ; Niedrig-Energie Membranverfahren zur Abtrennung von Biomasse aus dem Abwasser. ; Veröffentlichungen des ISAH, Heft 103, Universität Hannover, 1997, S. 4 - 1 ff. ; ROSENWINKEL K.-H. et al. 1997
- Roth M. ; Energiesparende Verfahrenstechniken und Betriebsweisen auf Kläranlagen; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Bd. 114, 1991; M. ROTH 1991
- Sailer K.; Pöpel H.J. ; Klärschlamm-Desintegration : Verfahren und Ergebnisse; Schriftenreihe WAR, Bd. 109, 1998, S. 141 ff; SAILER K. et al. 1998
- Scheuer Lothar; Wozniak Thomas ; Erste Betriebserfahrungen mit einer großtechnischen Versuchsanlage des Aggerverbandes; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 177, 2000, S. 39/1 - 39/10; SCHEUER L. et al. 2000
- Schleypen; Gschlößl; Abwasserbehandlung mit Keimreduzierung? Auswirkung auf die Gewässer, gwf Wasser Abwasser, Nr.5, 1993; 1993; SCHLEYPEN 1993
- Schmauz Harald ; DWA-Membrantage in Osnabrück; KA Korrespondenz Abwasser 2005 52; SCHMAUZ H. 2005
- Schmelz Karl.-Georg ; Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 189, S. 2/1-2/17, 2002; SCHMELZ K.-G. 2003b

- Schmelz Karl.-Georg; Winter A. ; Klärschlammverminderung durch verschiedene Methoden der Desintegration auf der Kläranlage Schermbeck; Schriftenreihe SI-WAWI Bochum, Bd. 37, S. 205-224, 2000; SCHMELZ K.-G. et al. 2000
- Schmelz Karl-Georg ; Erfahrungen bei der Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen; KA Korrespondenz Abwasser, 6/2003, S. 765 - 773 ; SCHMELZ K.-G. 2003a
- Schmidt Arnold ; Mengen, Charakteristik und Probleme des Fremdwasseranfalls auf kommunalen Kläranlagen in NRW; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 177, 2000, S. 26/1 - 26/15 ; SCHMIDT A. 2000
- Schmitt F.; Klauwer E. ; Wirksame Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs auf Abwasserbehandlungsanlagen; WAR-Schriftenreihe Bd. 102, Darmstadt, 1997; SCHMITT F. et al. 1997
- Schmitt Ferdinand; Weil Christian; Seibert-Erling Gerhard; Brandenburg; Heinz; Energieanalyse als Instrument der Betriebskosten- und Verfahrensoptimierung; KA Korrespondenz Abwasser 46, 1999 No. 3; SCHMITT F. et al. 1999
- Schmitt W. ; Betriebsoptimierung von Schlammfauungs- und Schlammmentwässerungsanlagen; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 27, S. 218-259, 2001; SCHMITT W. 2001
- Schnatmann Christian; Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken; Schriftenreihe SIWAWI Bochum, Band 33, 1997, S. 155 ff. ; SCHNATMANN C. 1997
- Schneider Dietmar; u.a. ; Klärschlammreduzierung mittels Ultraschall; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 12, 1998, S. 541 ff. ; SCHNEIDER D. et al. 1998
- Schneidmadl Joachim; Fuchs Stephan; Hillenbrand Thomas ; Vergleichende Ökobilanz unterschiedlicher Abwasserkonzepte; KA Korrespondenz Abwasser, 5/2000, S. 681 - 696; SCHNEIDMADL J. et al. 2000
- Schoppe Ingo; Wendler Daniel; Linnemann Claus; Rosenwinkel Karl Heinz; Kabelac Stephan; Die Brennstoffzelle – Option zur nachhaltigen Erzeugung von Wärme und Strom auf Kläranlagen; KA Korrespondenz Abwasser 04/2002; SCHOPPE I. 2002
- Schröder Markus; Produktionsunternehmen Kläranlage, Baustein der zukünftigen Infrastruktur zur Energie- und Wasserstoffversorgung; KA Korrespondenz Abwasser, 10/2002, S. 1380 - 1387, 2002; SCHRÖDER M. 2002
- Schröder Markus; Neue Energiekonzepte auf Kläranlagen durch Nutzung der Wasserstofftechnologie (Brennstoffzellen); DWA (ATV) Landesverbandstagung Sachsen/Thüringen, 2002, S. 97-108, 2002; SCHRÖDER M. 2002
- Schröder Markus ; Wasserstoff auf Kläranlagen; DWA (ATV) Landesverbandstagung Nord-Ost 2003, S. 95-106 ; SCHRÖDER M. 2003

- Schumacher; Schumacher, J.: Ozonung zur weitergehenden Aufbereitung kommunaler Kläranlagenabläufe, Dissertation, Berlin 2006; 2006; SCHUMACHER 2006
- Seibert-Erling G. ; Energie sparen auf Kläranlagen; WAP Wasser Abwasser Praxis, 5/2000, S. 28-32; SEIBERT-ERLING G. 2000
- Statistisches Bundesamt Hrsg.; Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung ; Fachserie 19 Reihe 2.1, 2005; STAT. BUNDES-AMT 2005
- Steier, K.; Thermische Klärschlammverwertung - Möglichkeiten und Erfahrungen aus der Sicht eines Kraftwerksbetreibers; 1. Fachtagung "Klärschlamm" in Berching/Opf., 9. September 2003; STEIER 2003
- Stein Simone; Walther Hendrik ; Das Membranbelebungsverfahren bei der Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH : regionale Entwicklungen und einjährige Betriebserfahrungen in der Kläranlage Markranstädt; DWA (ATV) Landesverbandstagung Sachsen/Thüringen 2001, S. 107-122; STEIN S. et al. 2001a
- Steuernagel Stefan; Kraus Joachim; Zanke Ulrich; Wasserkraftnutzung in Kläranlagen; Wasser & Boden, 3/2002, S. 32-35; STEUERNAGEL S. 2002
- Stiegelbauer Franz ; Erfahrungsbericht über die Reinigung von Belüftungsstellen mit 85%iger Ameisensäure.; KA Korrespondenz Abwasser Betriebsinfo,4/1998, S. 820 ff., 1998; STIEGELBAUER F. 1998
- Strunkheide Jörg; Eckhardt Roland; Witte Hartmut ; Wärmerückgewinnung aus der Druckluft von Belebungsanlagen; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 2/2002, S. 14-19; STRUNKHEIDE J. et al. 2002
- Strunkheide Jörg; Witte Hartmut; Berger Christian ; Wärmerückgewinnung aus Belebungsanlagen; wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, 2/2000, S. 19-22; STRUNKHEIDE J. et al. 2000
- Stumpmeier Martin ; Wirtschaftliche Maschinen zur Schlammeindickung und Schlammentwässerung; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 04, 1996, S. 1107 ff.; STUMPMEIER M. 1996
- Thöle Dieter; Böcker Karl-E. ; Ergebnisse von Energieanalysen beim Wupper- und Ruhrverband. ; Gewässerschutz - Wasser - Abwasser GWA, Bd. 190, S. 15/1-15/11, 2003; THÖLE D. et al. 2003
- UBA (Hrsg.); Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, 3. Überarbeitete Auflage (08/2004); ; UBA 2004
- Vestner Richard J.; Günthert F. Wolfgang ; Leistungspotenziale unbelüfteter Belebungsstufen; KA Korrespondenz Abwasser, 10/2002, S. 1388 - 1396 ; VESTNER R. et al. 2002
- Vogel Hans-Joachim ; Untersuchungen zum Ersatz der Nachklärung durch Membranfiltration in der kommunalen Abwasserreinigung bei stark variablen Zulauf-

- verhältnissen; DWA (ATV) Schriftenreihe, Bd. 12, 1998, S. 557 ff. ; VOGEL H.-J. 1998
- Waerdt Stephan ; Klär- und Biogas-Nutzung in Blockheizkraftwerken : neue Rahmenbedingungen und Techniken; Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität Essen, Heft 16/2000, S. 95-106; WAERDT S. 2000
- Wagner Jens ; Optimierung von Druckbelüftungssystemen in der Abwasserbehandlung; ISAH, 2002, 208 S., zugl., Hannover, Univ., Diss., 2002; WAGNER J. 2002
- Wagner Martin ; Ansätze der Energiesparung auf Abwasserbehandlungsanlagen; Schriftenreihe WAR, Bd. 123, S. 113-142, 2000; WAGNER M. 2000
- Wagner Martin ; Neue Tendenzen bei der Belüftungstechnik; Schriftenreihe WAR, Bd. 134, S. 1-30, 2001; WAGNER M. 2001
- Wagner Martin ; Neue Wege der Schlammbehandlung – Desintegration von Klärschlamm; KA Korrespondenz Abwasser 11/2003; WAGNER M. 2003
- Walther Hendrik ; Membranfiltration in der Abwasserbehandlung : Grundlagen, Entwicklungen und Anwendungen; DWA (ATV) Landesverbandstagung Nord-Ost 2003, S. 47-58; WALTHER H. 2003
- Werther Joachim ; Aktuelle Entwicklungen bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm ; KA Korrespondenz Abwasser 06/2003; WERTHER 2003
- Wilderer Peter A.; Merkl Gerhard Hrsg. ; Angewandte Membrantechnologie in Wasserwerken.; Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft TU München, Nr. 157 ISSN 0942-914X, 2000; WILDERER Pet al. 2000
- Winter Anke; Kostenreduzierung für Kommunen und Verbände durch effiziente Erzeugung und Verwertung von Faulgas als Primärenergie sowie Reduzierung der Faulschlammmenge; Teilprojekt: Desintegration von Überschuss- und Faulschlämmen; Institut für Siedlungswasserwirtschaft Technische Universität Braunschweig, Mai 2003; WINTER A. 2003
- Winter Anke; Dichtl Norbert ; Minimierung von Betriebskosten auf Kläranlagen durch Klärschlamm-desintegration; gwf Wasser Abwasser, 10/2002, S. 712 - 718; WINTER A. et al. 2002
- Wozniak Thomas ; Membrantechnik in der Kläranlage Büchel : Praxiserfahrungen nach zweijährigem Betrieb; up - umweltpraxis, 5/2002, S. 46 - 51; WOZNIAK T. 2002
- Wozniak Thomas; Lothar ; ; Größte Versuchsanlage zur Membranfiltration von Abwasser; gwf Wasser Abwasser, 12/1999, S. 855 ff.; WOZNIAK T. et al. 1999
- Zentralverband der Elektroindustrie e.V. ZVEI Hrsg.; Energiesparmotoren: Kosteneinsparung statt Regulierung; 1999; ZVEI 1999