



Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Die Gewässerqualität in Baden-Württemberg hat sich gegenüber den siebziger Jahren deutlich verbessert. Die Erfolge können sich sehen lassen. Verantwortlich sind insbesondere die gesetzlichen Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen, die zu wesentlichen Fortschritten in der Abwasserreinigung geführt haben. Im Hinblick auf zusätzliche Anforderungen aus der europäischen Wasserrahmenrichtlinie werden weitere Anstrengungen notwendig, die verfahrensbedingt zusätzliche Energie benötigen. Kommunale Kläranlagen sind mit ca. 20 % des Gesamtenergiebedarfs in Kommunen regelmäßig der größte Energieverbraucher. Es ist daher ökonomisch und ökologisch geboten, die energetischen Optimierungspotenziale der Kläranlagen zu erkennen und diese sowohl im Betrieb als auch in der Planungsphase umzusetzen.

Der Leitfaden richtet sich insbesondere an kommunale Entscheidungsträger, Kläranlagenbetreiber, Behörden und Planer. Ich bin zuversichtlich, dass mit Hilfe dieses Leitfadens Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz erfolgreich umgesetzt werden können.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'F. Untersteller'.

Franz Untersteller MdL

Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
des Landes Baden-Württemberg





Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	1
1. Hintergrund.	2
2. Stand der Energiesituation baden-württembergischer Kläranlagen	4
2.1 Datengrundlage	4
2.2 Durchgeführte Energieanalysen.	6
2.3 Daten des DWA-Leistungsvergleichs 2013.	10
2.4 Fazit Energiesituation in Baden-Württemberg.	13
3. Potenziale zur Energieeinsparung	14
3.1 Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz.	14
3.2 Potenzialabschätzung zur Stromeinsparung.	20
3.3 Fazit Potenziale zur Stromeinsparung	22
4. Potenziale zur Energieerzeugung	24
4.1 Ansatzpunkte zur Steigerung der Stromerzeugung.	24
4.2 Potenzialabschätzung zur Stromerzeugung	28
4.3 Fazit Potenziale zur Stromerzeugung	31
5. Beispiele für realisierte Einzelmaßnahmen	33
6. Energiebedarf zur Spurenstoffelimination	36
7. Zusammenfassung	38
8. Handlungsempfehlungen.	40
9. Literatur	42
Anhang	44
Impressum	48



Abkürzungsverzeichnis

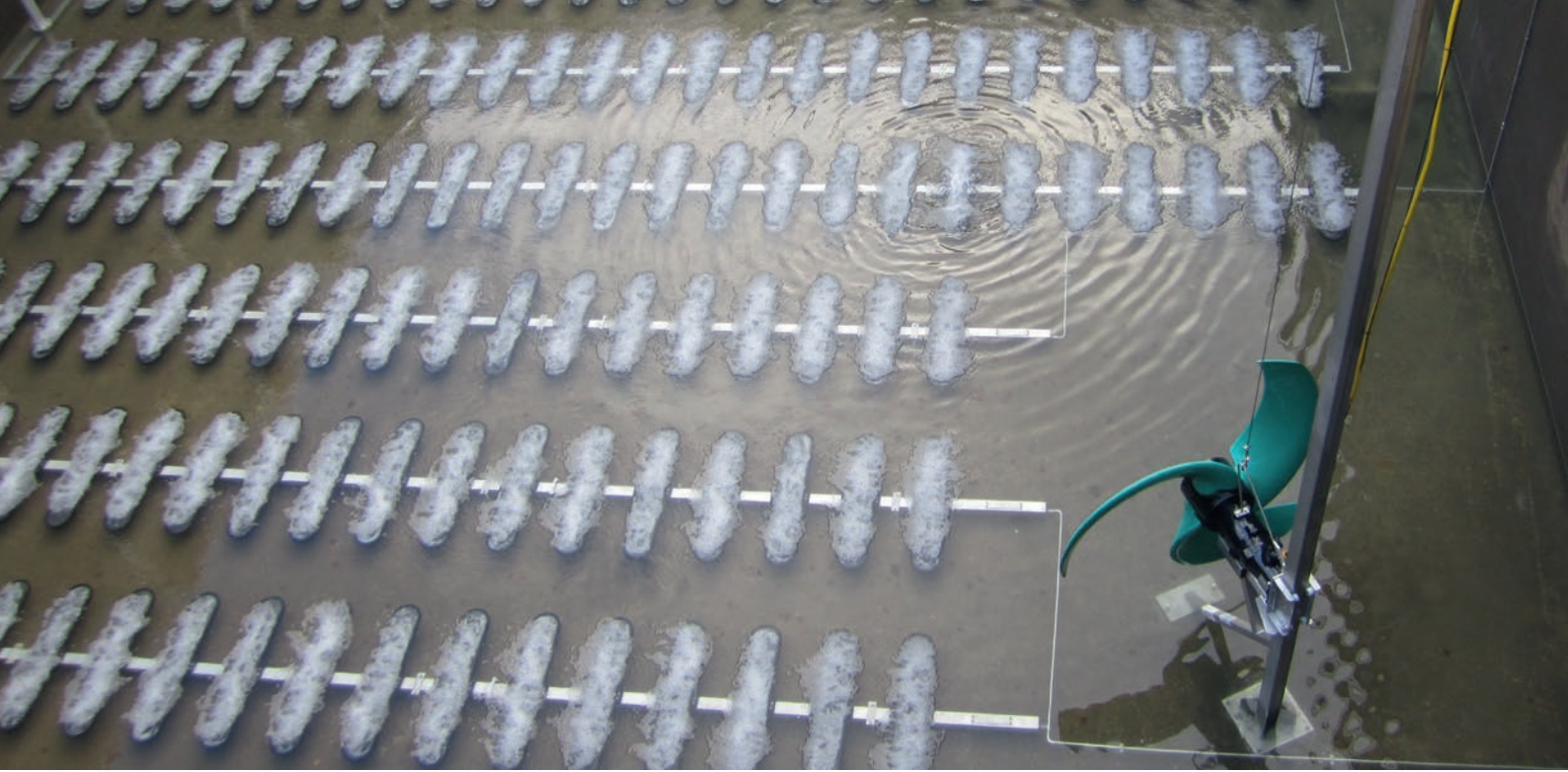
a	Jahr	m	Meter
A	Abhängige Maßnahme	m_{FH}	Manometrische Förderhöhe
Abb.	Abbildung	m^3	Kubikmeter
BHKW	Blockheizkraftwerk	mg	Milligramm
BW	Baden-Württemberg	m_N^3	Normkubikmeter
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	Mio.	Millionen
d	Tag	MSR-Technik	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	n	Anzahl der berücksichtigten Datensätze
E bzw. E_{CSB}	Angeschlossene Einwohnerwerte (mittlere Belastung), bezogen auf 120 g CSB pro Einwohner und Tag	N/DN	Nitrifikation/Denitrifikation
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	NKB	Nachklärbecken
EVU	Energieversorgungsunternehmen	NO_x-N	NO_x -Stickstoff
EW	Einwohnerwert (Ausbaugröße)	NO_3-N	Nitrat-Stickstoff
FB	Faulraum, beheizt	O_2	Sauerstoff
FU	Frequenzumrichter	Opt.	Optimierung
g	Gramm	oTR	Organischer Trockenrückstand
GAK	Granulierte Aktivkohle	P	Phosphor
GK	Größenklasse	PAK	Pulveraktivkohle
GWh	Gigawattstunde	PU	Polyurethan
h_{geod}	Geodätische Förderhöhe	PV	Photovoltaik
K	Kurzfristige Maßnahme	RS	Reinigungsstufe
KA	Kläranlage	RV	Rücklaufverhältnis
Kap.	Kapitel	s	Sekunde
kg	Kilogramm	S	Sofortmaßnahme
kW_{el}	Kilowattstunde, elektrisch	spez.	spezifisch
kWh	Kilowattstunde	theor.	theoretisch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	TPU	Thermoplastisches Polyurethan
l	Liter	TS_{BB}	Trockensubstanzkonzentration im Belebungsbecken
l_N	Normliter	ÜS	Überschussschlamm
		W	Watt
		W_R	Leistungsdichte
		η	Wirkungsgrad
		η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad



1. Hintergrund

Im kommunalen Bereich ist die Abwasserreinigung der größte Einzelverbraucher von Energie. Daher sollten vor allem in diesem Bereich mögliche Einsparpotenziale untersucht und umgesetzt werden. Andererseits erzeugen Kläranlagen auch nutzbare Energie, wenn auf Anlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung das anfallende Faulgas zur Erzeugung von Strom bzw. Wärme genutzt wird. Sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten ist anzustreben, den Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen zu reduzieren und die Stromerzeugung zu forcieren.

Im Jahr 2013 wurden in Baden-Württemberg 951 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von 20,8 Mio. EW betrieben. Ca. 64 % aller Anlagen gehören in die Größenklassen 1 bis 3, behandeln jedoch lediglich das Abwasser von 9 % der angeschlossenen Einwohnerwerte (Abbildung 1). Diese Verhältnisse machen deutlich, dass es in Baden-Württemberg zwar viele kleinere Kläranlagen gibt, der Großteil des kommunalen Abwassers jedoch in großen, zentralen Kläranlagen gereinigt wird. Daher ist das auf die Gesamtheit der Kläranlagen bezogene Potenzial zur Energieeinsparung bzw. -gewinnung in den Größenklassen 4 und 5 am größten. 95 % der kommunalen Kläranlagen der Größenklasse 3 bis 5 sind Belebungsanlagen und tragen mit 94 % zum Gesamtstrombedarf der kommunalen Kläranlagen bei. Energieanalysen können helfen, die Potenziale zur Optimierung der Energieeffizienz einer Kläranlage aufzuzeigen.



Die Ziele der Abwasserreinigung bzw. des Gewässerschutzes haben jedoch stets Vorrang vor einer Steigerung der Energieeffizienz. Im vorliegenden Leitfaden werden die Ergebnisse aus baden-württembergischen Energieanalysen vorgestellt und durch Daten aus dem DWA-Leistungsvergleich 2013 für Baden-Württemberg ergänzt. Darauf aufbauend wird das theoretische Potenzial zur Stromersparung und zur Stromerzeugung abgeschätzt. Beispiele aus der Praxis sollen Kläranlagenbetreibern zudem Anreiz geben, ihre Kläranlagen energetisch zu optimieren.

Der vorliegende Leitfaden ist ein Teil des Projekts „Energiepotenzialstudie für die kommunalen Kläranlagen in Baden-Württemberg“. Der zugehörige Abschlussbericht wird auf der Website des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg zum Download zur Verfügung gestellt.

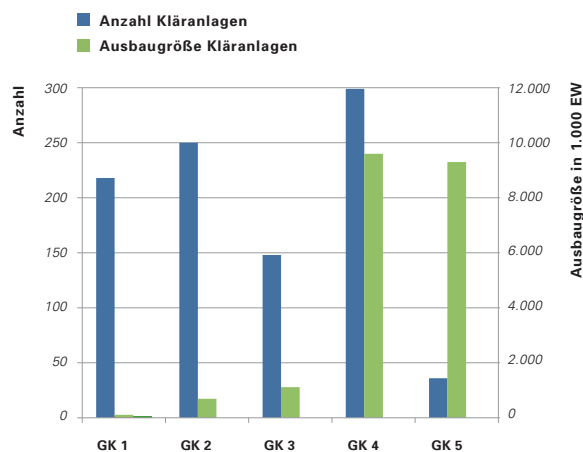


Abb 1: Anzahl der Kläranlagen in Abhängigkeit der Größenklasse in Baden-Württemberg (DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)



2. Stand der Energiesituation baden-württembergischer Kläranlagen

2.1 DATENGRUNDLAGE

Um die aktuelle Energiesituation der Kläranlagen in Baden-Württemberg darzustellen, wurde auf zwei Datenquellen zurückgegriffen:

- Energieanalysen ab Größenklasse 3 der Jahre 2007 bis 2012, die auf baden-württembergischen Kläranlagen durchgeführt (n=75) und von den Betreibern zur Auswertung bereitgestellt wurden (n=62)
- Daten des DWA-Leistungsvergleichs 2013 (n=483)

Während die DWA für den jährlichen Leistungsvergleich lediglich den Gesamtstromverbrauch und die Gesamtstromerzeugung als energetisch relevante Daten abfragt, gehen die Energieanalysen ins Detail. Dadurch erlauben diese eine Auswertung, die auch die Darstellung der Stromverbräuche einzelner Verbraucher (Einzelaggregate) oder

Verbrauchergruppen zulässt. Zudem werden dort auch konkrete Maßnahmen zur Energieeinsparung und Energieerzeugung vorgeschlagen.

Zur Bewertung und zum Vergleich der Energiekennwerte wird der einwohnerspezifische Stromverbrauch in kWh/(E·a) bzw. der Begriff „mittlere Belastung“ (angeschlossene Einwohnerwerte) einer Kläranlage verwendet. Der Begriff „Auslastung“ gibt die prozentuale Belastung der Kläranlage bezogen auf die Ausbaugröße an. Die „mittlere Belastung“ wird aus dem Chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und der einwohnerspezifischen Tagesfracht von 0,12 kg/(E·d) berechnet. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass die „mittlere Belastung“ der Kläranlagen im DWA-Leistungsvergleich (aus Jahresmittelwert der CSB-Konzentration und der Jahresabwassermenge) anders berechnet wird als in den Energieanalysen (Energie-EW,



überwiegend aus mittlerer CSB-Tagesfracht). Dadurch ist bezüglich der spezifischen Stromverbräuche keine unmittelbare Vergleichbarkeit der beiden Datenquellen gegeben. Der DWA-Leistungsvergleich ergibt in der Regel höhere Einwohnerwerte und damit bis zu 10 % niedrigere Energiekennwerte.

Da die kleineren Kläranlagen lediglich einen sehr geringen Anteil am Gesamtstromverbrauch haben, werden im Folgenden nur die Kläranlagen der Größenklassen 3, 4 und 5 betrachtet. Für detailliertere Betrachtungen wird die Größenklasse 4 in drei Bereiche unterteilt (Tabelle 1), um die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen deutlicher den Ausbaugrößen zuordnen zu können. Dies betrifft besonders Anlagen mit anaerober Stabilisierung. Der Betrieb einer Faulung inklusive BHKW kann heutzutage auch auf Kläranlagen < 20.000 EW wirtschaftlich sein, dies ist jedoch

Tabelle 1: Unterteilung der Größenklassen

DWA-Leistungsvergleich 2013		Energiepotenzialstudie BW 2015	
Größenklasse	EW	Größenklasse	EW
GK 1	< 1.000	–	–
GK 2	1.001 – 5.000	–	–
GK 3	5.001 – 10.000	GK 3	5.001 – 10.000
GK 4	10.001 – 100.000	GK 4.1	10.001 – 20.000
		GK 4.2	20.001 – 50.000
		GK 4.3	50.001 – 100.000
GK 5	> 100.000	GK 5	> 100.000

immer im Einzelfall zu prüfen.

Obwohl im Weiteren die Größenklasse 1 und 2 nicht berücksichtigt werden, sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass auch für diese Kläranlagen die Durchführung einer Energieanalyse empfohlen werden kann.

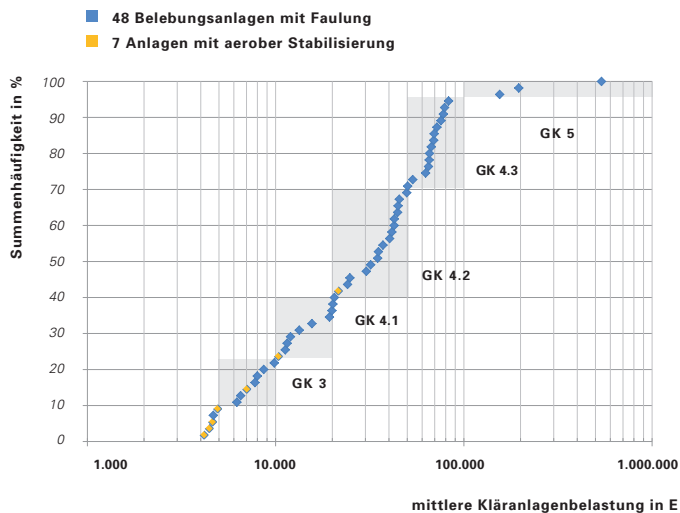


Abb 2: Mittlere Kläranlagenbelastung (aus mittlerer CSB-Tagesfracht) nach Energieanalysen BW

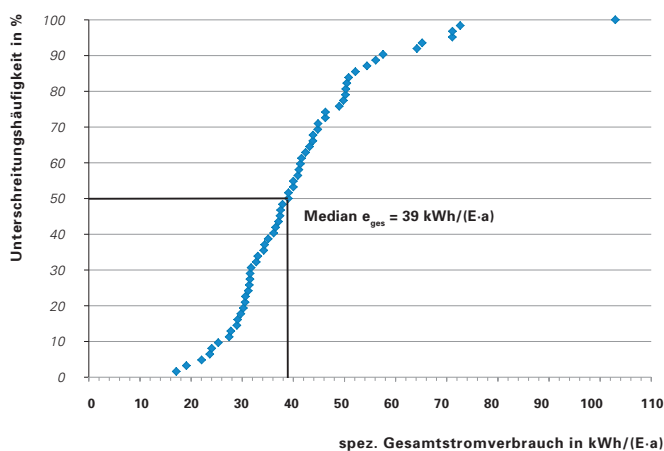
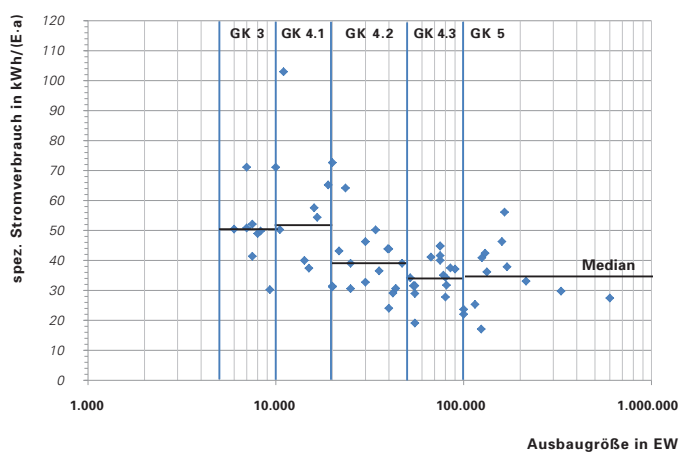


Abb 3: Spezifischer Gesamtstromverbrauch (n = 62, Energieanalysen BW)

2.2 DURCHGEFÜHRTE ENERGIEANALYSEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Von den in Baden-Württemberg durchgeführten und zur Auswertung zur Verfügung gestellten Energieanalysen waren 62 Energieanalysen der Größenklassen 3 bis 5 verwertbar. Diese umfassen eine Ausbaugröße von insgesamt 4,31 Mio. EW. Dies entspricht 21 % der gesamten Anschlussgröße von Baden-Württemberg. Abbildung 2 stellt die mittlere Kläranlagenbelastung der ausgewerteten Belebungsanlagen dar. In Abbildung 3 ist der einwohnerspezifische Stromverbrauch in Abhängigkeit der Ausbaugröße und als Summenlinie dargestellt.

Stromverbrauch

Abbildung 3 macht die enorme Streubreite im spezifischen Stromverbrauch deutlich. Diese ist den unterschiedlichen Verfahrens- und Betriebsweisen, den eingesetzten Aggregaten und den örtlichen Randbedingungen, insbesondere Einlauf- und Zwischenhebewerken sowie dem Fremdwasseranteil geschuldet. Erwartungsgemäß sinkt der einwohnerspezifische Gesamtstromverbrauch mit zunehmender Ausbaugröße der Kläranlage, der Median aus den 62 Energieanalysen liegt bei 39 kWh/(E·a). Das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ aus Nordrhein-Westfalen [1] und der Praxisleitfaden „Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen“ [2] geben Richt- und Idealwerte bzw. Toleranz- und Zielwerte für den spezifischen Stromverbrauch an. Für Belebungsanlagen der Größenklasse 5 liegen diese beispielsweise bei 26 und 20 kWh/(E·a) [1] bzw. bei 30 und 20 kWh/(E·a) [2]. Der Median des spezifischen Stromverbrauchs der ausgewerteten Energieanalysen liegt für die Größenklasse 5 bei 32 kWh/(E·a).

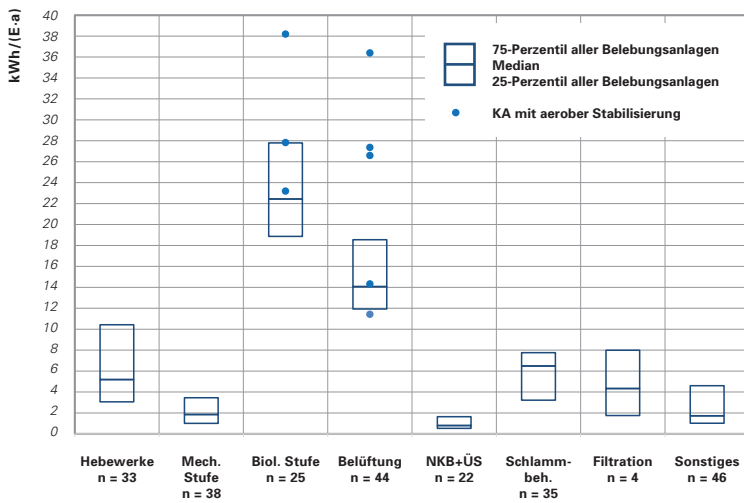


Abb 4: Verteilung der einwohnerspezifischen Stromverbräuche einzelner Verfahrensgruppen aller Kläranlagen mit Belebungsverfahren (aus Medianwerten)

Neben dem Gesamtstromverbrauch sind dem Großteil der Energieanalysen auch detaillierte Energiedaten einzelner Verbrauchergruppen wie Pumpen oder Gebläse zu entnehmen. In Abbildung 4 sind die einwohnerspezifischen Stromverbräuche der einzelnen Verfahrensgruppen für alle Anlagen mit Belebungsverfahren dargestellt. Zusätzlich sind für die Verbrauchergruppen der biologischen Stufe und der Belüftung die einwohnerspezifischen Verbrauchswerte der Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung durch Punkte gekennzeichnet.

Bei entsprechender Erfassung des Stromverbrauchs einzelner Verfahrensgruppen wird deutlich, dass neben der stromintensiven biologischen Reinigungsstufe und der Schlammbehandlung, die Filtration und die Hebewerke die weiteren maßgeblichen Verbrauchergruppen darstellen. Auf den in den Energieanalysen betrachteten Kläranlagen sind insgesamt 50 Einlauf- und Zwischenhebewerke vorhanden. Abbildung 5 zeigt die prozentuale Verteilung der mittleren spezifischen Stromverbräuche auf die einzelnen Verfahrensgruppen ohne Berücksichtigung der Hebewerke und der Filtrationsanlagen.

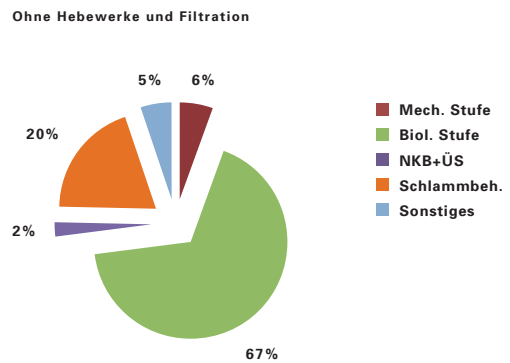
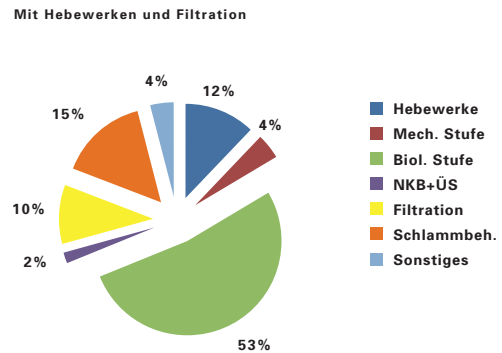


Abb 5: Prozentuale Verteilung aus Medianwerten des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs ohne Hebewerke und Filtration

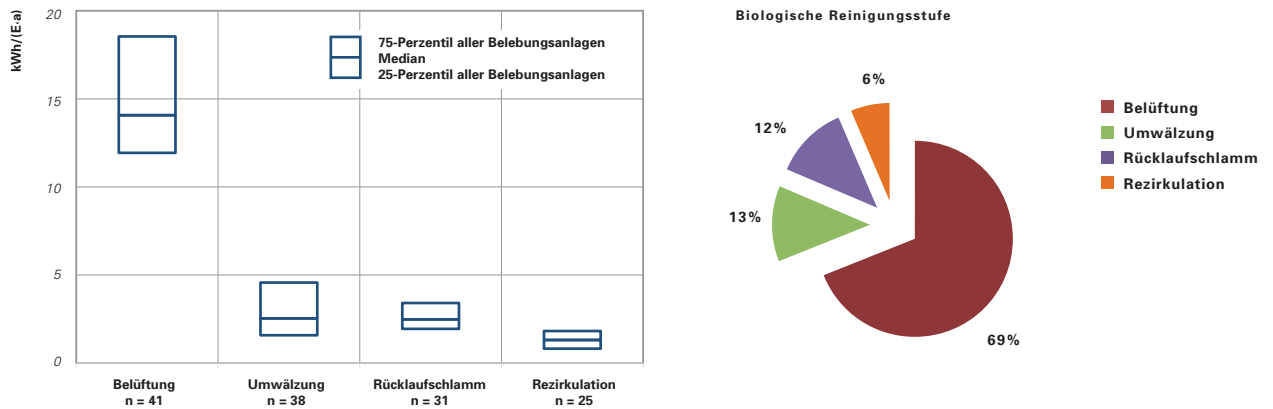


Abb 6: Verteilung der Stromverbräuche innerhalb der biologischen Reinigungsstufe (aus Medianwerten)

53 % des Gesamtstromverbrauchs werden im Mittel für die biologische Reinigungsstufe benötigt, ohne Berücksichtigung von Hebewerken und Filtrationsstufen erhöht sich dieser Anteil auf 67 %. Das Belüftungssystem stellt innerhalb der biologischen Reinigungsstufe mit 69 % erwartungsgemäß den größten Einzelverbraucher dar (Abbildung 6).

Stromerzeugung

50 der 62 ausgewerteten Kläranlagen betreiben eine separate anaerobe Klärschlammstabilisierung. Sieben Kläranlagen verfügen über eine simultane aerobe Schlammstabilisierung, fünf transportieren den unstabilisierten Klärschlamm zu benachbarten Kläranlagen oder direkt in eine Verbrennung.

Die einwohnerspezifische Faulgasproduktion liegt bei $26 \text{ l}_N / (\text{E} \cdot \text{d})$ (Median, $n = 46$). Die Faulgasproduktion bezogen auf die organische Substanz beträgt $455 \text{ l}_N / \text{kg oTR}$ (Median, $n = 26$) und liegt damit knapp über dem im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [1] genannten Richtwert. Diese gute Faulgasausbeute lässt sich auf Faulzeiten deutlich über 20 Tage zurückführen. Das zeigt auch, dass in den anaeroben Stabilisierungsanlagen oft noch ungenutzte Kapazitäten im Faulbehälter vorhanden sind.

Die Faulgasnutzung liegt nach Auswertung der Energieanalysen im Median bei 98 % ($n = 30$). Dennoch werden über alle Größenklassen hinweg zum Teil noch erhebliche Mengen an Faulgas abgefackelt.

Die Umwandlung des Faulgases in Elektrizität beträgt im Median 29 % bezogen auf den Energieinhalt des Faulgases und entspricht damit in etwa dem Richtwert des Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ [1].

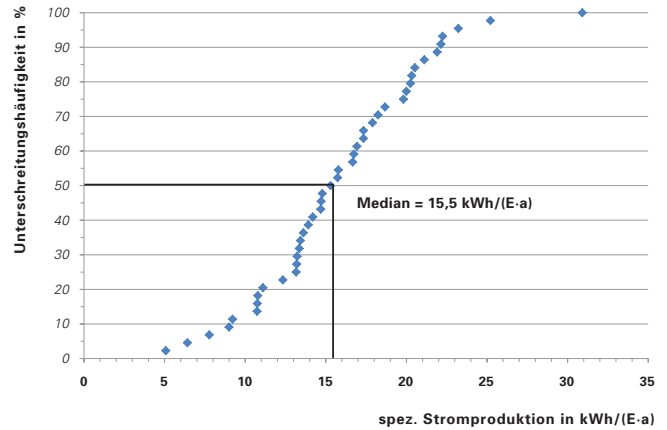
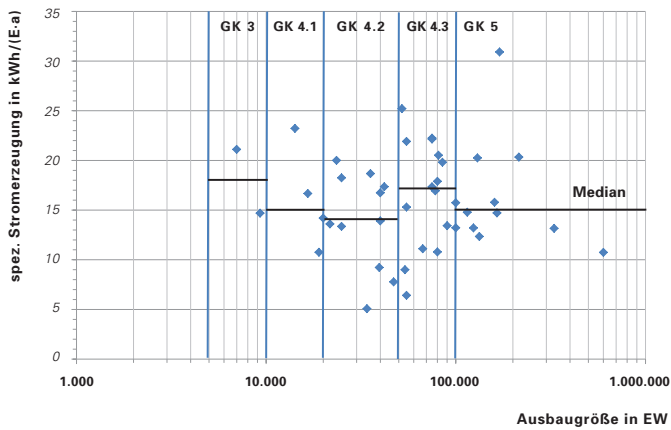


Abb 7: Spezifische Stromerzeugung ($n = 44$, Energieanalysen BW)

Sechs der ausgewerteten Kläranlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung verfügen noch nicht über eine Faulgasverwertung. Der elektrische Eigenversorgungsgrad beträgt bei den 44 Faulungsanlagen mit BHKW im Median 44 %. Abbildung 7 zeigt die einwohnerspezifische Stromerzeugung in Abhängigkeit der Ausbaugröße und als Summenlinie. Werte über 25 kWh/(E·a) sind nur durch Zugabe externer Schlämme oder Co-Substrate zu erreichen.

je nach Effektivität, Wirtschaftlichkeit und Aufwand in

- (S) Sofortmaßnahmen (sofort realisierbar, geringe Investitionen),
- (K) Kurzfristige Maßnahmen (Umsetzung innerhalb von ca. 2 bis 5 Jahren, entsprechende Investitionen, aber wirtschaftlich) und
- (A) Abhängige Maßnahmen (mittel-/langfristig realisierbar, abhängig von anstehenden Sanierungen oder Erweiterungen).

Maßnahmen

In den 62 ausgewerteten Energieanalysen Baden-Württembergs wurden insgesamt 387 Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz auf den Anlagen der Größenklassen 3 bis 5 aufgeführt. Diese Maßnahmen unterteilen sich dabei

Die Anzahl an Maßnahmen sowie die potenzielle Strom- einsparung und Stromerzeugung sind getrennt nach Ver- fahrensgruppen in Abbildung 8 dargestellt. Die größte Anzahl von Maßnahmen und das höchste Einsarpotenzial an elektrischer Energie liegen in der biologischen Reini- gungsstufe, da sich dort auch die größten Stromverbrau- cher befinden. Bei den Maßnahmen handelt es sich dabei

sowohl um betriebliche als auch um maschinentechni- sche Anpassungen (Tabelle 5, Kapitel 3.1.4). Auf Seiten der Stromerzeugung sind die am häufigsten vorgeschlagenen Maßnahmen die Anschaffung bzw. Erneuerung von Block- heizkraftwerken sowie die Verwendung von Co-Substraten bei der Faulung.

Die zur Steigerung der Energieeffizienz sinnvollen Maß- nahmen werden in den Kapiteln 3 und 4 näher dargestellt.

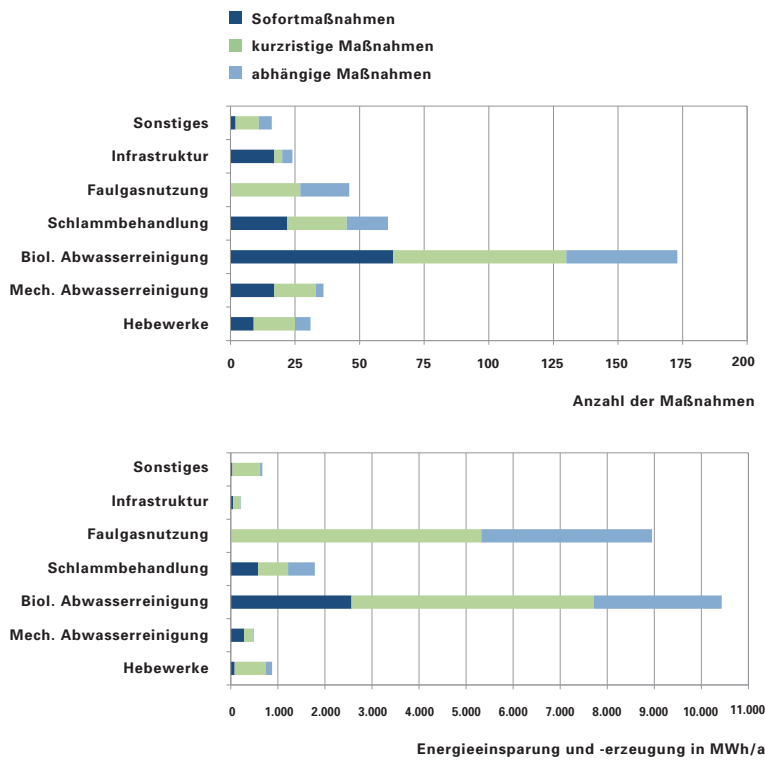


Abb 8: Anzahl der Maßnahmen und Einsparpotenzial an elektrischer Energie (Energieanalysen BW)

2.3 DATEN DES DWA-LEISTUNGSVERGLEICHS 2013 FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG

Im DWA-Leistungsvergleich 2013 für Baden-Württemberg stehen die Daten von 486 Kläranlagen der Größenklasse 3 bis 5 zur Verfügung. Für die folgenden Auswertungen werden drei Anlagen nicht berücksichtigt, die außerhalb Baden-Württembergs liegen und lediglich das gereinigte Abwasser in Baden-Württemberg einleiten. Die verbleibenden 483 Anlagen umfassen eine Ausbaugröße von insgesamt 20,01 Mio. EW. Dies entspricht etwa 96 % der Gesamtausbaugröße aller Kläranlagen Baden-Württembergs. Tabelle 2 fasst die Daten zusammen.

Stromverbrauch

In Abbildung 9 ist der einwohnerspezifische Strom- verbrauch in Abhängigkeit der Ausbaugröße und als Summenlinie dargestellt. Der Median des spezifischen Stromverbrauchs liegt landesweit für die 483 betrachteten Kläranlagen bei 35 kWh/(E · a).

Stromerzeugung

277 der 483 Kläranlagen ab Größenklasse 3 verfügen über eine separate anaerobe Stabilisierung, 244 Anlagen verstromen das anfallende Faulgas mittels Blockheizkraftwerken. Eine Verstromung erfolgt auf Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 16,15 Mio. EW. Dies entspricht ca. 80 % der gesamten Reinigungskapazität Baden-Württembergs ab

Größenklasse 3. Unter den 7 % der Kläranlagen, die ihr Faulgas nicht verstromen, befinden sich z. B. auch Anlagen, die ihr Faulgas den Stadtwerken überlassen oder das Faulgas ausschließlich zur Wärmeerzeugung nutzen. Daraus lässt sich schließen, dass durch Nachrüstung bestehender Faulungsanlagen mit BHKW kein großer Zugewinn an der Gesamtstromerzeugung zu erwarten ist.

Tabelle 2: Daten aus dem DWA-Leistungsvergleich 2013, Baden-Württemberg

Größenklasse	Grenzen EW	Anzahl der Kläranlagen	Gesamt-Ausbaugröße EW	Gesamtstromverbrauch kWh/a	Spez. Stromverbrauch (Median) kWh/(E-a)
GK 3	5.001 – 10.000	148	1.113.854	33.741.906	38
GK 4.1	10.001 – 20.000	123	1.913.555	55.389.052	36
GK 4.2	20.001 – 50.000	128	4.165.410	104.724.286	34
GK 4.3	50.001 – 100.000	48	3.519.500	79.706.678	32
GK 5	> 100.000	36	9.299.213	214.945.557	32
Gesamt		483	20.011.532	488.507.479	35

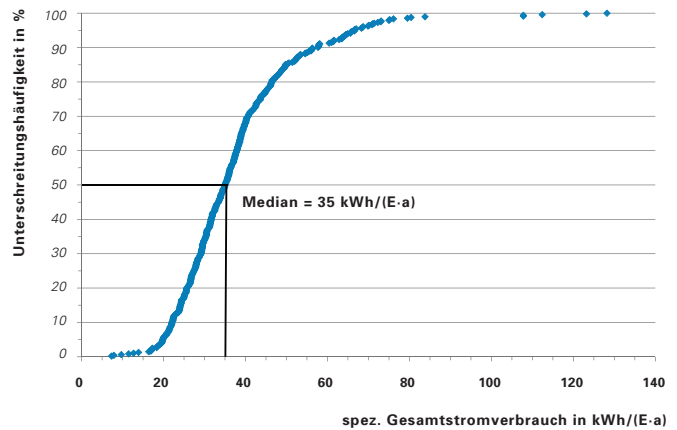
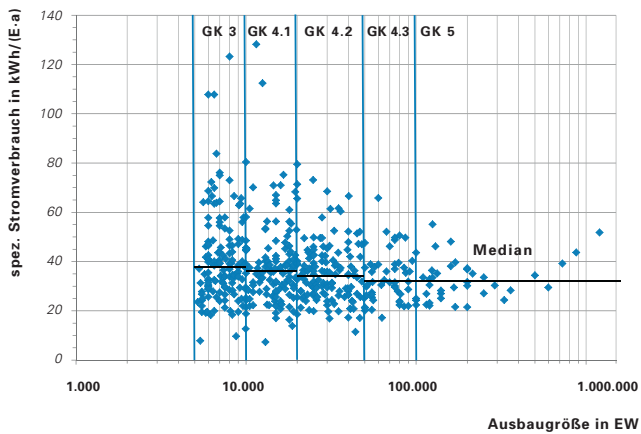


Abb 9: Spezifischer Gesamtstromverbrauch (n = 483, DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)

Tabelle 3: Kläranlagen mit und ohne beheizte Faulung / BHKW (DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)

Kläranlagen		GK 3	GK 4.1	GK 4.2	GK 4.3	GK 5
Gesamt	<i>n</i>	148	123	128	48	36
	<i>Ausbau-EW</i>	1.113.854	1.913.555	4.165.410	3.519.500	9.299.213
Ohne FB	<i>n</i>	124	56	25	0	1
	<i>Ausbau-EW</i>	911.945	817.995	759.100	0	875.000
Mit FB (beheizt)	<i>n</i>	24	67	103	48	35
	<i>Ausbau-EW</i>	201.909	1.095.560	3.406.310	3.519.500	8.424.213
FB + BHKW	<i>n</i>	15	48	98	48	35
	<i>Ausbau-EW</i>	130.449	792.560	3.281.310	3.519.500	8.424.213

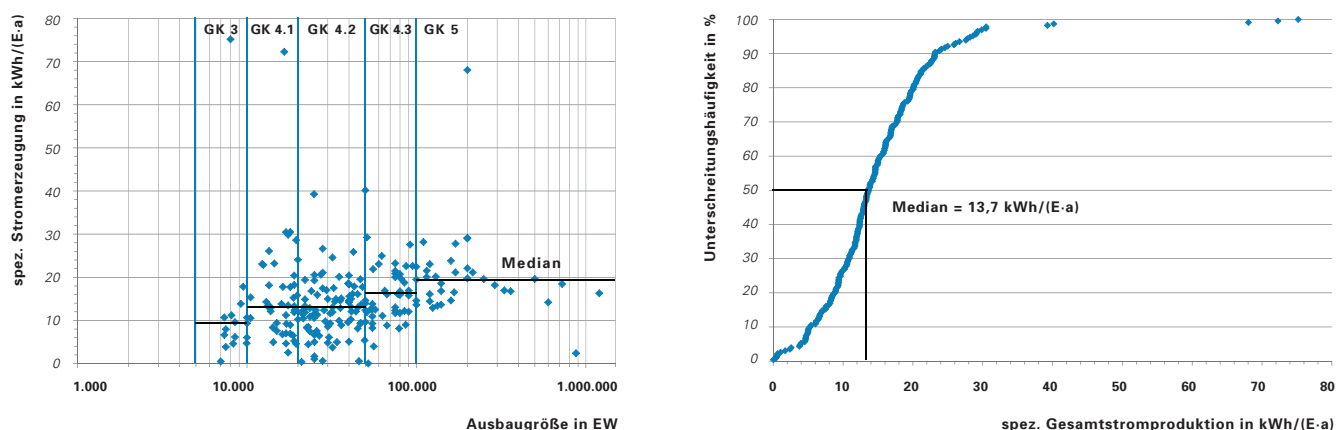


Abb 10: Spezifische Stromerzeugung (*n* = 230, DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)

Tabelle 3 fasst die Daten zur Schlammbehandlung zusammen. Abbildung 10 zeigt die einwohnerspezifische Stromerzeugung in Abhängigkeit der Ausbaugröße und als Summenlinie.

Im DWA-Leistungsvergleich 2013 sind Werte für die Stromerzeugung in kWh/a angegeben, aus denen sich anhand der ebenfalls angegebenen mittleren Belastung

die einwohnerspezifische Stromerzeugung in kWh/(E·a) ermitteln lässt. Anhand der mittleren Auslastung lässt sich eine theoretische Stromerzeugung ermitteln, welche deutlich vom IST-Zustand abweicht. Dies ist auf die inhomogene Datengrundlage des DWA-Leistungsvergleichs zurückzuführen, da nicht alle Kläranlagenbetreiber alle Daten vollständig angeben. Daher wurde für weitere Berechnungen

die mittlere Belastung angepasst, so dass die theoretische Stromerzeugung mit dem IST-Zustand in Deckung gebracht wird (Tabelle 4).

2.4 FAZIT STAND DER ENERGIESITUATION IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Die Auswertungen der in Baden-Württemberg durchgeführten Energieanalysen haben gezeigt, dass der spezifische Gesamtstromverbrauch auf den kommunalen Kläranlagen im Median bei 39 kWh/(E·a) liegt. Der spezifische Energieverbrauch ist dabei in den Anlagen bis 20.000 EW Anschlussgröße am größten und nimmt dann tendenziell mit steigender Anschlussgröße ab. Im Vergleich zu den Richtwerten in der einschlägigen Literatur [1–3] sind die spezifischen Gesamtstromverbräuche der untersuchten Kläranlagen eher hoch, was jedoch u. a. auf die Ermittlungsmethodik der Energiekennwerte zurückzuführen ist. Die Berechnungen der Energieanalysen führen häufig zu einem höheren spezifischen Gesamtstromverbrauch als

im DWA-Leistungsvergleich angegeben wird. Ein weiterer Grund könnte darin liegen, dass Betreiber weniger effizienter Kläranlagen eher dazu neigen, eine Energieanalyse anfertigen zu lassen.

Die Verbreitung von Blockheizkraftwerken ist auf den kommunalen Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung weit fortgeschritten (n = 44 von 50 Energieanalysen). Aufgrund von Faulzeiten deutlich über 20 Tagen ist die Faulgasproduktion sehr gut. Daher ist das Potenzial zur Steigerung der Stromerzeugung begrenzt. Die Zahlen aus dem DWA-Leistungsvergleich 2013 bestätigen hier die Auswertungen der Energieanalysen.

Die Energieanalysen haben gezeigt, dass die untersuchten Kläranlagen durch Umsetzen aller vorgeschlagenen Maßnahmen (S+K+A) im Mittel etwa ein Viertel ihres Strom-Netzbezugs durch Optimierung des Energieverbrauchs und der Erzeugung von Eigenstrom senken könnten. Dies macht deutlich, dass Energieanalysen durchaus eine lohnende Investition sein können.

Tabelle 4: Reale Stromerzeugung nach DWA-Leistungsvergleich 2013 und Anpassung der mittleren Belastung

		GK 3	GK 4.1	GK 4.2	GK 4.3	GK 5
FB + BHKW	n	15	48	98	48	35
Ausbaugröße	EW	130.449	792.560	3.281.310	3.519.500	8.424.213
Stromerzeugung 2013 (DWA)	kWh/a	1.117.754	9.068.150	30.675.875	37.390.324	101.539.079
Spez. Stromerzeugung (DWA)	kWh/(E·a)	9,8	14,5	14,5	14,5	18,0*
Mittlere Belastung (angepasst)	E	114.057	625.390	2.115.578	2.578.643	5.641.060
Auslastung (angepasst)	%	87	79	64	73	67

*Abweichung zu spez. Stromerzeugung aus DWA-Leistungsvergleich 2013 Baden-Württemberg durch Nichtberücksichtigung der drei Kläranlagen, die in Baden-Württemberg einleiten, aber außerhalb der Bundeslandgrenzen liegen.



3. Potenziale zur Energieeinsparung

3.1 ANSATZPUNKTE ZUR STEIGERUNG

DER ENERGIEEFFIZIENZ

Die detaillierte Auswertung der Energieanalysen Baden-Württembergs ergab bei allen untersuchten Kläranlagen eine Vielzahl an Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Abwasserreinigung und der Schlammbehandlung (Kapitel 2.2). Abbildung 11 fasst die maßgeblichen Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz zusammen. Es wird deutlich, dass zur Verringerung des Energieverbrauchs sowohl eine energieoptimierte Betriebsführung als auch eine energieeffiziente Aggregatetechnik erforderlich ist [4]. Wesentliche Eingriffsmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz werden im Folgenden beschrieben.

3.1.1 BELÜFTUNG

Eine effektive Belüftung, eine sorgfältig geregelte Luftzufuhr und eine gewissenhafte Wartung des gesamten Belüftungssystems birgt das größte Potenzial zur Stromeinsparung auf kommunalen Kläranlagen. Als energetisches Ziel ist daher eine Minimierung der Luftzufuhr bei bestmöglicher Ablaufqualität und hoher Prozessstabilität anzustreben.

Regelung des O₂-Eintrags

Auf vielen Kläranlagen stellt eine optimierte Regelung der Sauerstoffzufuhr ein meist einfach und umgehend zu realisierendes Energieeinsparpotenzial dar. Dies belegen die zahlreichen Vorschläge zur Optimierung der Sauerstoffsollwerte in den ausgewerteten Energieanalysen (Kapitel 2.2). Die Sauerstoffkonzentration sollte im Nitrifikationsbecken gewöhnlich zwischen 1,5 bis 2,0 mg/l liegen. Höhere Sauerstoffkonzentrationen führen zu einer deutlichen Erhöhung der erforderlichen Sauerstoffzufuhr. Da sich dabei die Umsatzrate der Nitrifikanten nur geringfügig verbessert, wird unnötig Belüftungsenergie verbraucht. Allein eine Absenkung des Sauerstoffsollwertes von 2 auf 1,5 mg/l führt zu einer Reduzierung der Luftzufuhr um ca. 7 % bei geringfügiger Abnahme der Umsatzleistung der Nitrifikanten [5]. Demnach besteht bei hohen Sauerstoffgehalten im Belebungsbecken durch die schrittweise Absenkung der Sauerstoffsollwerte eine zu prüfende, direkte Eingriffsmöglichkeit. Dafür muss die Sauerstoffmessung an einer repräsentativen Stelle im Belüftungsbecken erfolgen. Negative Auswirkungen auf Ablaufqualität und Schlamm-eigenschaften sind in jedem Fall zu vermeiden.

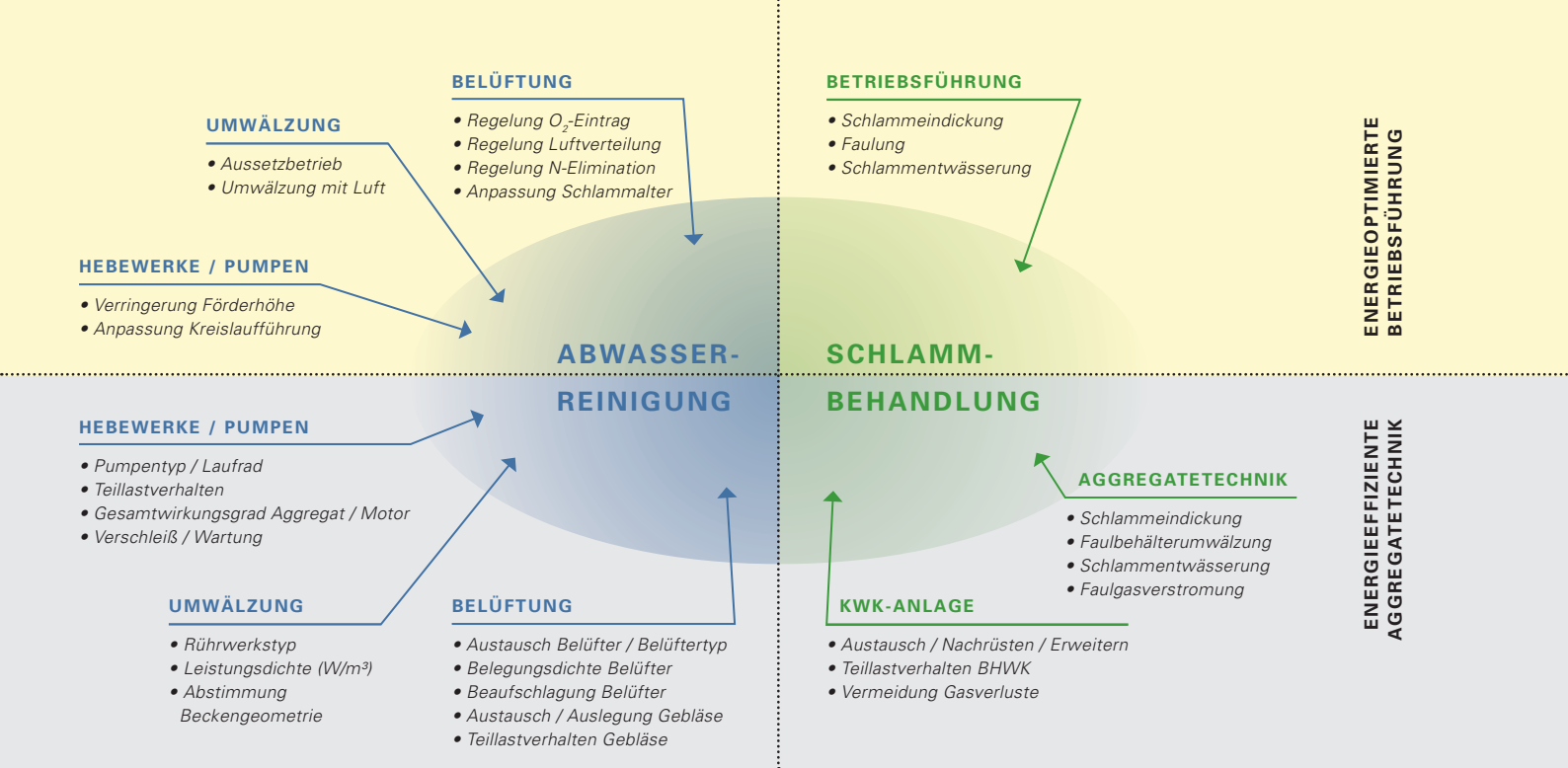


Abb. 11: Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen (nach [4]; modifiziert)

Regelung der Luftverteilung

Müssen bei größeren, mehrstufigen Belebungsanlagen mehrere Sauerstoffregelkreise unabhängig voneinander mit Druckluft bedient werden, stehen mit der Konstantdruckregelung, der Gleitdruckregelung und der Luftverteilregelung verschiedene Regelungen für die Aufteilung der Druckluft zur Verfügung [6]. Die an die Belastung angepasste Gleitregelung bietet gegenüber der Regelung mit konstantem Druck ein Energieeinsparpotenzial von ca. 3 bis 5 % der Belüftungsenergie durch Reduzierung des Drucks bei geringerem Luftbedarf [7]. Das Regelverhalten einer Gleitdruckregelung ist beispielhaft in Abbildung 12 dargestellt. Bei der sogenannten Verteilregelung erfolgt die Regelung der Gebläse ausschließlich über die Werte der Sauerstoffmessungen in den Belebungsbecken. Die Regelarmaturen sind von der Abdrosselung des Anteils für die Druckhaltung in der Sammelleitung entbunden und das System kann mit einem geringeren Druck gefahren werden [6]. Eine aktuell durchgeführte modelltechnische Überprüfung der drei Regelungsvarianten belegt, dass im Vergleich zur Gleitregelung mit Implementierung der Verteilregelung eine weitere Druckabsenkung in der Sammelleitung und

damit weitere Energieeinsparungen möglich sind [8]. Insbesondere für größere Kläranlagen sind daraus resultierende Energiekosteneinsparungen von Bedeutung [9].

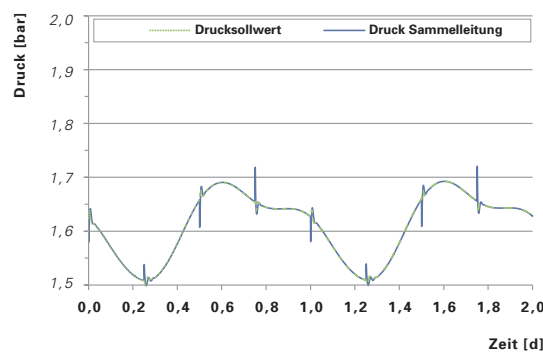
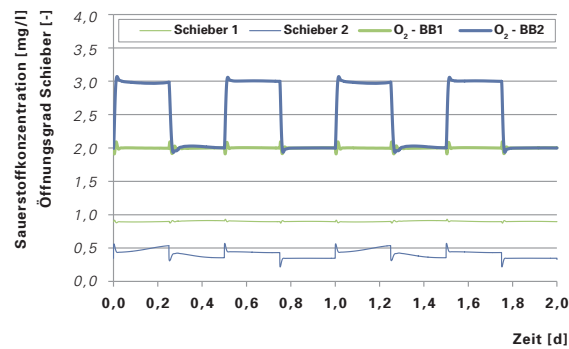


Abb. 12: Regelverhalten einer Gleitdruckregelung [8]



Abb. 13: Hochdruckreinigung von Belüfterelementen zur Vermeidung gradueller Druckanstiege infolge Belagbildung

Schlammalter

Die Auswertung der Energieanalysen zeigt auch, dass in vielen Fällen in der Belebungsanlage nicht immer das optimale Schlammalter eingestellt ist. Durch einen unnötig hohen Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken entsteht aufgrund der zusätzlichen Grundatmung des belebten Schlammes ein entsprechend höherer Sauerstoffbedarf; für jedes $\text{g/l TS}_{\text{BB}}$ somit ein Mehrverbrauch von bis zu 10 %. Dabei wird unnötig elektrische Energie verbraucht, ohne dass die Reinigungsleistung merklich verbessert wird. Zusätzlich führt ein zu hohes Schlammalter bei Belebungsanlagen mit anaerober Schlammstabilisierung zu niedrigeren oTR -Gehalten im Schlamm, was geringere Gaserträge zur Folge haben kann.

Aus energetischer (sowie verfahrenstechnischer) Sicht ist daher abhängig von der Abwassertemperatur das Schlammalter in der Belebungsanlage bedarfsgerecht einzustellen. Ein ausreichendes aerobes Schlammalter ist dabei immer zu gewährleisten.

Belüftungselemente

In annähernd der Hälfte der ausgewerteten Energieanalysen wird ein Austausch von Belüfterelementen mit besserem Wirkungsgrad, d. h. höherem spezifischen Sauerstoff-ertrag, vorgeschlagen und daraus eine deutliche Energieeinsparung prognostiziert. Belüfterelemente mit hohem Wir-

kungsgrad bestehen größtenteils aus EPDM, TPU, PU, Silikon oder Keramik. Prinzipiell besitzen Keramikelemente einen geringeren Druckverlust und sind dadurch im Einzelfall energetisch günstiger. Allerdings ist zur Vermeidung irreversibler Verstopfungen bei Keramikbelüftern eine ständige Mindestluftbeaufschlagung sicherzustellen, wodurch sich ein Einsatz bei intermittierender Nitrifikation/Denitrifikation in aller Regel ausschließt. Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb ist eine gleichmäßige Luftverteilung auf die installierten Belüfterelemente. Mit abnehmender Luftbeaufschlagung nimmt der spezifische Sauerstoff-ertrag der Belüfterelemente zu. Bei zu hoher Luftbeaufschlagung kann durch Nachrüstung von zusätzlichen Belüftern eine deutliche Ertragsverbesserung erzielt werden, die Rahmenbedingungen bezüglich notwendiger Mindestbeaufschlagung, passender Gebläseleistung und ausreichender Homogenisierung sind jedoch immer zu beachten [10].

Im Betrieb ist die Druckentwicklung in der Sammelleitung des Belüftungssystems kontinuierlich zu dokumentieren. Ein gradueller Anstieg des Differenzdrucks über die Zeit deutet auf biologische oder chemische Belagbildungen auf bzw. in den Belüfterelementen hin. Hat sich der Ausgangsdruck um 5 bis 10 % erhöht, ist eine chemische Reinigung der Belüfter zu empfehlen. Das verwendete Reinigungsmittel ist mit dem Hersteller der Belüfter abzustimmen. Aufwendiger ist meistens die manuelle Hochdruckreinigung der Belüfterelemente, da hierzu die Becken weitgehend zu entleeren sind (Abbildung 13).

Drucklufterzeugung

Der Austausch von Verdichteraggregaten mit geringen Wirkungsgraden oder eine bessere Abstufung der Gebläseleistung birgt ein weiteres Energieeinsparpotenzial innerhalb des Druckbelüftungssystems. In rund 30 % der ausgewerteten Energieanalysen wird ein Austausch von

Gebäsen als energetische Optimierungsmaßnahme formuliert. Zur Druckluftherzeugung stehen Drehkolbengebläse, Schraubenverdichter oder Turboverdichter zur Verfügung. Bei optimaler Auslegung besitzen Turboverdichter für den Lufteintrag eine geringere spezifische Leistungsaufnahme ($W/(m_N^3 \cdot m)$). Größere Verdichter weisen geringere Verluste und damit höhere Wirkungsgrade auf als kleinere Verdichter. Durch die Kopplung mehrerer Gebläse mit Frequenzumrichter ist eine möglichst optimierte Abdeckung des Arbeitsbereiches anzustreben. Gerade im Bereich der häufigen mittleren Luftbedarfsfälle ist ein energieeffizienter Betrieb der Gebläsestation sicherzustellen, um auch im Teillastbereich einen guten Gesamtwirkungsgrad erreichen zu können. Sind Gebläse zu groß ausgelegt, ist für eine bessere Abstufung der Austausch eines Aggregates gegen ein kleineres energetisch sinnvoll und häufig auch wirtschaftlich [5]. Bei Neuinstallation ist eine sachgerechte Ausschreibung mit definierten Wertungskriterien unerlässlich, da die spezifische Leistungsaufnahme verschiedener Verdichteraggregate erhebliche Wirkungsgradschwankungen über den Arbeitsbereich zeigt. Hinweise dazu sind dem DWA-Regelwerk zu entnehmen [10].

3.1.2 UMWÄLZUNG VON BELEBUNGSBECKEN

Der spezifische Energieeintrag von Rührwerken, die zur Umwälzung in unbelüfteten Becken und zur Vorwärtsförderung in Umlauf- und Kreisringbecken eingesetzt werden, lässt sich anhand der Leistungsdichte W_R in W/m^3 bewerten. Für eine einfache Beurteilung des Energiebedarfs zur Umwälzung ist für die einzelnen Rührwerke die Leistungsdichte W_R mit dem in Abhängigkeit des Beckenvolumens formulierten Zielwert zu vergleichen [2, 3].

Rührsysteme

Effiziente Rührsysteme kommen mit einer spezifischen Eintragsleistung von weniger als $2 W/m^3$ aus [11]. Aus-

wertungen an ausgeführten Projekten zeigen, dass bei Rund- und Kreisringbecken der Zielwert von $1,5 W/m^3$ bei Volumen $> 1.000 m^3$ durchaus unterschritten werden kann. Rechteckbecken (insbesondere kleine) weisen hingegen mit im Mittel $3,2$ bis $3,8 W/m^3$ tendenziell höhere Werte für die Leistungsdichte von Rührwerken auf [12].

Unverhältnismäßig hohe Verbrauchswerte von Rührwerken deuten auf eine schlechte Abstimmung zwischen Rührwerk und Beckengeometrie hin. Das Aggregat ist überdimensioniert, der Beckenform nicht angepasst bzw. besitzt einen geringen Auslastungsgrad oder hat den falschen Aufstellungsort. Eine zu prüfende Eingriffsmöglichkeit bei zu schnell laufenden, nicht regelbaren Rührwerken besteht im Nachrüsten eines Frequenzumrichters oder eines Tauschgetriebes passender Größe zur Drehzahlanpassung.

Rührwerksbetrieb

In manchen Fällen kann kurzfristig eine energetische Optimierung der Umwälzung erreicht werden, wenn es gelingt, die Rührwerke zumindest zeitweise abzuschalten. Eine längere Entmischung bzw. Sedimentation des belebten Schlammes ist dabei zu vermeiden. Es darf zu keiner bleibenden Ablagerung und zu keiner Beeinträchtigung der Denitrifikationskapazität kommen. Zur Kontrolle sind das Schlammvolumen und der Nitratgehalt im Denitrifikationsstiel zu bestimmen. Insgesamt dürfen die Stillstandzeiten der Rührwerke keinesfalls zu groß werden, weiterhin ist der ggf. größere Verschleiß der Motoren zu berücksichtigen [2].

Durchmischung mit Luft

In belüfteten Belebungsbeckenbereichen erfolgt mit der eingeblasenen Luft bereits eine ausreichende Durchmischung. Die belüfteten Phasen bei intermittierender Nitrifikation/Denitrifikation sollten daher möglichst ohne zusätzlichen Rührwerksbetrieb erfolgen, außer die

Rührwerke werden zur Vorwärtsförderung des Abwassers benötigt. In unbelüfteten Phasen kann die Umwälzung grundsätzlich auch mit Luft erfolgen. Durch eine regelmäßige, sehr kurze Impulsbelüftung (ca. 10 bis 20 Sekunden) kann in einem Abstand von 10 bis 15 Minuten der belebte Schlamm mit der Mischenergie der aufsteigenden Luftblasen wieder in Schwebelage gebracht werden [13]. Aus energetischer Sicht ist die Umwälzung mit Luft während der unbelüfteten Phasen bei intermittierender Nitrifikation/Denitrifikation gegenüber einem Rührwerksbetrieb von Vorteil. Allerdings können höhere Investitionskosten sowie im Einzelfall verfahrenstechnische Nachteile entstehen. Auswirkungen auf die Stickstoffelimination sind beim Impulsbelüftungsverfahren in Abhängigkeit der Beckengeometrie und der Schlammeigenschaften (Schlammindex) vorab zu prüfen. In Schwachlastphasen und bei/niedriger O_2 -Zehrung kann ein signifikanter negativer Effekt auf den Stickstoffumsatz erwartet werden.

3.1.3 HEBWERKE UND PUMPEN

Der elektrische Energiebedarf der Abwasserhebwerke, der Schlammumpenwerke und der Kreislaufumpenwerke ist direkt abhängig von der zu fördernden Abwassermenge sowie der erforderlichen Druckhöhe. Für eine detaillierte Bewertung des Energiebedarfs zur Abwasser- und Schlammförderung auf Kläranlagen sind für die einzelnen Förderaggregate der mittlere Gesamtwirkungsgrad (%) und der spezifische Stromverbrauch ($Wh/(m^3 \cdot m)$) zu bestimmen und mit den jeweiligen Zielwerten der verschiedenen Pumpenarten zu vergleichen [2, 3]. Abhängig von Pum-

penart, Fördermedium und Laufrad liegen die Zielwerte für den Wirkungsgrad η_{ges} zwischen 50 und 80 % und für den spezifischen Stromverbrauch im Bereich von 3,4 bis 6,0 $Wh/(m^3 \cdot m_{FH})$ [2, 3]. Bei deutlich höheren spezifischen Stromverbräuchen ist das entsprechende Förderaggregat zu kontrollieren. Zu prüfende Eingriffsmöglichkeiten bestehen insbesondere durch Neuauslegung von Aggregat und Motor, Anpassung von Förderhöhe und Fördermenge und regelmäßige Wartungs- und Verschleißbegutachtungen.

Betrieb von Schneckenpumpen

In Einlaufhebwerken sind die Schaltpunkte der Trocken- und Regenwetterschnecken im Sinne einer möglichst kleinen Förderhöhe h_{geod} zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Zu hohe (bzw. zu niedrige) Unterwasserpegel, eine Überschreitung der zulässigen Schalthäufigkeit und andere betriebliche Beeinträchtigungen (zulaufseitige Ablagerungen, frühzeitige Entlastungen, Störungen der mechanischen Stufe) sind dabei zu vermeiden. Im Zuge der energetischen Optimierung bietet es sich zusätzlich an, die Schneckenpumpen mit Frequenzumrichter zur stufenlosen Drehzahlregelung auszustatten, diese dann in Funktion des Unterwasserspiegels zu regeln und damit durchgehend in einem guten Wirkungsgradbereich zu betreiben. Darüber hinaus sind regelmäßige Wartungs- und Verschleißbegutachtungen bei Schneckenpumpen unabdingbar, um frühzeitig erhöhte Spaltverluste zwischen Schnecke und Trog zu erkennen. Schon geringe Vergrößerungen des Spaltes haben einen erheblichen Rückgang des Wirkungsgrades zur Folge [11].

Auslegung von Kreiselpumpen

Die Überprüfung von Kreiselpumpen ergibt in vielen Fällen, dass diese mit erheblichen Wirkungsgradverlusten arbeiten. Oft deutet ein geringer Wirkungsgrad im laufenden Betrieb an, dass der Betriebspunkt der Kreiselpumpe deutlich vom Auslegungspunkt abweicht. Je weiter dieser sich vom Auslegungspunkt entfernt, desto schlechter wird der Wirkungsgrad. Häufig sind aber neben einer unzutreffenden Pumpenauslegung auch eine mangelnde Kontrolle und Wartung und in der Folge nicht erkannte Verschleiß-, Verstopfungs- bzw. Verzopfungserscheinungen oder Spaltverluste Grund für einen Rückgang des Pumpenwirkungsgrades.

Bei überdimensionierten Pumpen lässt sich durch Einsatz eines Frequenzumrichters nachträglich der gewünschte Förderstrom bei weitgehender Beibehaltung des optimalen Wirkungsgrades erreichen. Trotz geringer Verluste durch den Frequenzumrichter ist der Leistungsbedarf im Teillastbetrieb deutlich niedriger als bei einer Drosselregelung mittels Schieber in der Druckleitung (Abbildung 14, [5]). Im Zuge einer Ersatzbeschaffung ist allerdings der Austausch gegen eine kleinere Pumpe in Betracht zu ziehen. Dabei ist auch zu prüfen, ob durch eine Änderung der Laufradform eine Wirkungsgradverbesserung erzielt werden kann. Zur Gewährleistung der Betriebsstabilität ist zu beachten, dass Laufräder mit einem hohen Wirkungsgrad tendenziell anfälliger gegenüber Verstopfungen sind [14].

Regelung der Fördermenge

Durch Verringerung der Fördermenge mittels angepasster interner Kreislaufführung kann der Stromverbrauch der

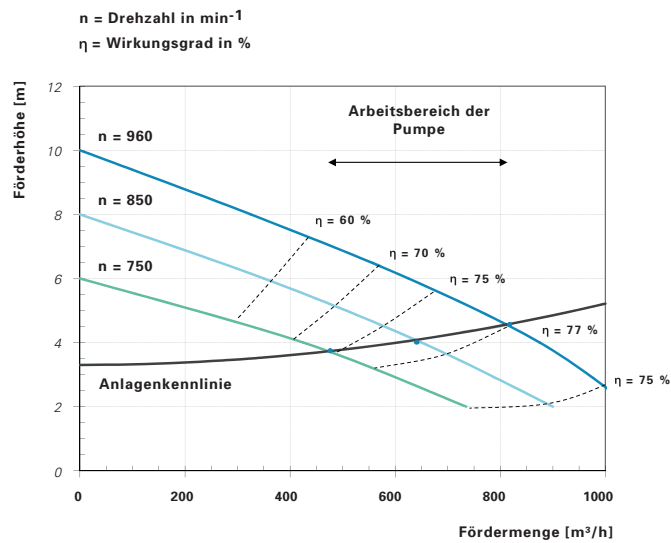


Abb. 14: Arbeitsbereich und Wirkungsgrad einer Pumpe mit Frequenzumrichterbetrieb [5]

Rezirkulationspumpen bei Anlagen mit vorgeschaltetem Denitrifikationsreaktor gesenkt werden. Energetisch (und verfahrenstechnisch) optimal ist die Ansteuerung bzw. Regelung der Rezirkulationspumpen über die kontinuierliche Messung des Nitrat- bzw. NO_x-N-Gehaltes im Ablauf der Denitrifikationszone bei durchgehender Ausschöpfung der DN-Kapazität. Auf Anlagen mit alleiniger intermittierender Nitrifikation/Denitrifikation (ohne vorgeschaltete DN) ist die interne Rezirkulation möglichst außer Betrieb zu nehmen (Kapitel 3.1.2).

Bei der Rücklaufschlammförderung kann durch eine Regelung proportional zur Zulaufmenge, insbesondere bei geringen Zuflüssen, der zurück geförderte Volumenstrom vermindert und damit auch der Energiebedarf reduziert werden. Allerdings ist vor allem bei sich verschlechternden Absetzeigenschaften des Schlammes ein zu niedriges Rücklaufverhältnis zu vermeiden, um der Gefahr von Schlammabtrieb vorzubeugen.

3.1.4 UMSTELLUNG DER VERFAHRENSWEISE

Auf Anlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation kann sich die Prüfung einer Umstellung der Verfahrensweise auf intermittierende Nitrifikation/Denitrifikation anbieten. Hierdurch kann bestenfalls der Betrieb von Rührwerken (durch Umwälzung mit Luft; vgl. Kapitel 3.1.2) und die interne Kreislaufförderung (vgl. Kapitel 3.1.3) vermieden werden. Der erhöhte Aufwand für die MSR-Technik ist den resultierenden Energiekosteneinsparungen gegenüberzustellen (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung). Weiterhin ist dann eine neue verfahrenstechnische Berechnung zum Nachweis der benötigten biologischen Volumina durchzuführen.

Tabelle 5: Theoretisches Einsparpotenzial auf Basis der DWA-Daten (DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)

Größenklasse	Stromeinsparpotenzial		% vom IST-Wert
	kWh/(E·a)	GWh/a	
GK 3	8,6	8,3	24,6
GK 4.1	8,0	12,1	21,8
GK 4.2	7,9	21,1	20,1
GK 4.3	5,5	14,1	17,7
GK 5	5,2	32,6	15,1
Gesamt	6,3	88,2	18,0

3.2 POTENZIALABSCHÄTZUNG ZUR

STROMEINSPARUNG

3.2.1 THEORETISCHES EINSARPOTENZIAL AUF BASIS DER DWA-DATEN

Das energetische Einsparpotenzial wird zunächst theoretisch auf Basis der DWA-Daten (Kapitel 2.3) abgeschätzt. Dafür werden die ermittelten tatsächlichen Verbrauchsdaten (Medianwerte) mit dem 25-Perzentilwert der einzelnen Größenklassen verglichen; also mit Bedarfswerten, die schon heute auf 25 % der Anlagen unterschritten werden. Über die Differenz kann das Potenzial für Baden-Württemberg summarisch hochgerechnet werden. Für die Unterteilung der Größenklassen zeigt Abbildung 15 die verschiedenen Summenlinien des spezifischen Gesamtstromverbrauchs. Über die Abstandsbildung zwischen Median- und 25-Perzentilwert ergibt sich ein rechnerisches Einsparpotenzial von 88,2 GWh/a bzw. 18 % des Gesamtstrombedarfs (Tabelle 5). Die Einsparungen führen zu einer Reduzierung des mittleren Gesamtstromverbrauchs von 35 kWh/(E·a) auf 28,7 kWh/(E·a). Die größten relativen Einsparungen von 25 % lassen sich für die Kläranlagen der Größenklasse 3 erzielen. Absolut bietet jedoch Größenklasse 4 mit 47,3 GWh/a das größte Einsparpotenzial.

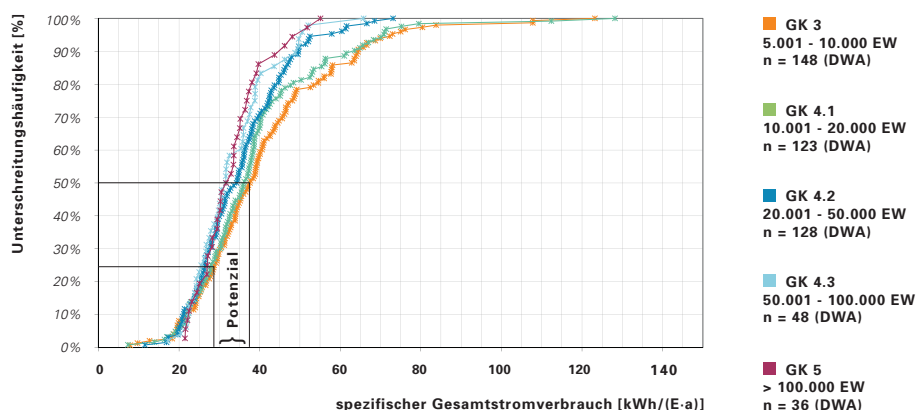


Abb. 15: Theoretische Abschätzung des elektrischen Einsparpotenzials durch Vergleich mit Perzentilwerten (DWA-Leistungsvergleich BW, 2013)

3.2.2 EINSARPOTENZIAL DURCH UMSETZUNG VON MASSNAHMEN AUS ENERGIEANALYSEN

Gestützt auf die detaillierte Auswertung der Energieanalysen wird das Einsparpotenzial durch Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen berechnet und das Gesamtpotenzial für Baden-Württemberg abgeleitet. Die Umsetzung aller Sofort- (S), kurzfristigen (K) und abhängigen (A) Maßnahmen würde ein Einsparpotenzial von landesweit 68,4 GWh/a ergeben (14 % des Gesamtstrombedarfs, Stromverbrauch von rund 15.000 Vier-Personen-Haushalten; Abbildung 16). Das auf Basis von real vorgeschlagenen Maßnahmen abgeleitete Einsparpotenzial liegt demnach knapp unterhalb der Auswertung von Kapitel 3.2.1. Allein 18 GWh/a lassen sich dabei einfach ohne größere Investitionen durch Realisierung von Sofortmaßnahmen erschließen (20 bis 30 % der Einsparpotenziale der einzelnen Größenklassen 3 bis 5). Bei zusätzlicher Umsetzung der kurzfristigen Optimierungsmaßnahmen können insgesamt 51,2 GWh/a bzw. 60 bis 80 % der Gesamteinsparpotenziale der Größenklassen erschlossen werden. Folglich kann per Definition die Erschließung der prognostizierten Potenziale zu großen Teilen als wirtschaftlich und technisch machbar eingestuft werden [3]. Von allen Verfahrensgruppen weist die biologische Stufe das mit Abstand größte Optimierungspotenzial auf; in Summe rund 70 % der erwarteten Gesamteinsparung bei Umsetzung aller Maßnahmen. Das große Potenzial der biologischen Stufe wird detailliert in Kapitel 3.2.3 aufgezeigt. In Hebewerken sind häufig genannte Maßnahmen die Anpassung von Schaltpunkten (S) und der Einsatz effizienterer Pumpen (K/A). Optimierungen der mechanischen Stufe betreffen in vielen Fällen den Ersatz von Sandfanggebläsen (S/K). Bei der Optimierung der Schlammbehandlung, die neben der biologischen Stufe das nächstgrößte Einsparpotenzial aufweist (Abbildung 8), stehen überwiegend Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs der Faulraumumwälzung (S/K) und Maß-

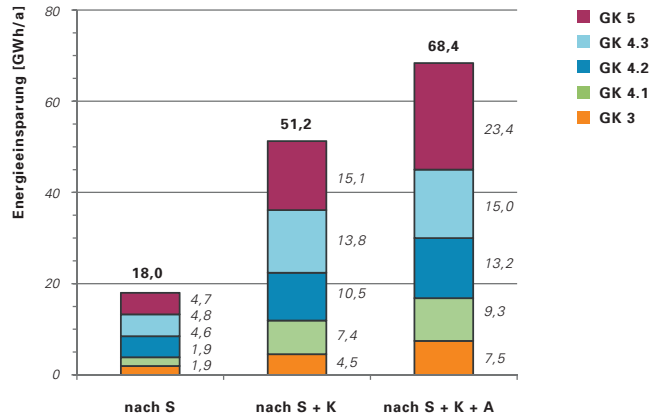


Abb. 16: Abschätzung des elektrischen Einsparpotenzials durch Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen (Energieanalysen BW)

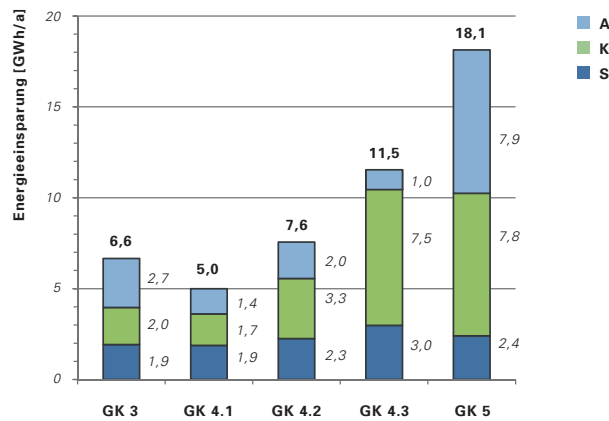


Abb. 17: Abschätzung des elektrischen Einsparpotenzials durch Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen in der biologischen Stufe (Energieanalysen BW)

nahmen zur Optimierung der Voreindickung (K/A) im Fokus.

3.2.3 EINSARPOTENZIAL DURCH UMSETZUNG VON MASSNAHMEN IN DER BIOLOGISCHEN REINIGUNGSSTUFE

Die zentralen Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der biologischen Stufe sind ausführlich in Kapitel 3.1 beschrieben. Insgesamt betreffen 45 % der identifizierten Maßnahmen die biologische Reinigungsstufe. Für die Größenklassen 3 bis 5 zeigt Abbildung 17 das entsprechende Einsparpotenzial bei Umsetzung der Maßnahmen. Es ergibt sich ein Einsparpotenzial von insgesamt 48,7 GWh/a. Die Maßnahmen zur Energieeinsparung im



Bereich der biologischen Stufe weisen auf den Kläranlagen der Größenklasse 4 mit 24,1 GWh/a das größte Potenzial auf. Schon allein durch Umsetzung von Sofortmaßnahmen kann der elektrische Energieverbrauch in der biologischen Stufe um 11,5 GWh/a (17 % des Gesamteinsparpotenzials) gesenkt werden.

Der Trockensubstanzgehalt und die Sauerstoffkonzentration sollten im Belebungsbecken dafür möglichst bedarfsgerecht eingestellt sein. Für Kläranlagen, bei denen dies nicht der Fall ist, resultiert ein unnötiger Energiemehrverbrauch. Bei Einstellung eines optimierten Schlammalters und einer effizienten Regelung des Sauerstoffeintrags betragen die jährlichen Energieeinsparungen auf baden-württembergischen Kläranlagen rund 3,5 GWh/a (5 % des Gesamteinsparpotenzials). Ein vermehrter Gasertrag durch Erhöhung des Glühverlustes ist hierbei nicht berücksichtigt. Weitere bedarfssenkende Sofortmaßnahmen betreffen die Umstellung auf einen Intervallbetrieb von Rührwerken und die Optimierung der Rücklaufschlamm- und Kreislaufförderung.

Bei zusätzlicher Umsetzung von kurzfristigen Optimierungsmaßnahmen im Bereich der biologischen Stufe kann der Energiebedarf um insgesamt 33,7 GWh/a (49 % des

Gesamteinsparpotenzials) verringert werden. Dabei ist insbesondere der Austausch von ineffizienten Belüfterelementen auf vielen Kläranlagen mit deutlichen Energieeinsparungen verbunden. Durch Einbau von effizienten Belüfterelementen kann der Energiebedarf auf Kläranlagen in Baden-Württemberg um insgesamt rund 18,8 GWh/a (27 % des Gesamteinsparpotenzials) gesenkt werden. Die Einsparungen verteilen sich zu 13 % auf Kläranlagen der Größenklasse 3, zu 43 % auf Kläranlagen der Größenklasse 4 und zu 44 % auf Kläranlagen der Größenklasse 5. Der Austausch und die Neuauslegung ineffizienter Aggregate (Gebläse, Rührwerke, Pumpen, u. a.) und die Bestückung mit energieeffizienten Motoren (ggf. mit FU) sind weitere häufig genannte kurzfristige und abhängige Optimierungsmaßnahmen im Bereich der biologischen Reinigungsstufe.

3.3 FAZIT POTENZIALE ZUR STROMEINSPARUNG

Die Betrachtung der Einsparpotenziale von elektrischer Energie auf baden-württembergischen Kläranlagen zeigt, dass eine Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen durch Optimierung der Betriebsführung und Effizienzsteigerung der Aggregatetechnik erreicht werden kann.



Die wesentlichen Eingriffsmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der biologischen Stufe fasst Tabelle 6 zusammen.

Es wird deutlich, dass rund 75 % des prognostizierten Einsparpotenzials (nach Umsetzung von Maßnahmen aus den Energieanalysen) sofort bzw. kurzfristig erschlossen werden kann (51,2 GWh/a). Die biologische Reinigungsstufe weist dabei das mit Abstand größte Einsparpotenzial auf (48,7 GWh/a). Allein die Umsetzung von Maßnahmen im Bereich der biologischen Stufe auf Kläranlagen der Größenklasse 4 würde eine Energieeinsparung von landesweit 24 GWh/a erbringen. Ein Sofort-Einsparpotenzial in Höhe von 5 % des Gesamtpotenzials besteht durch die Einstellung eines angepassten Schlammalters und einer optimierten Regelung des Sauerstoffeintrags (3,5 GWh/a). Ein wesentlich größeres Potenzial von 27 % des Gesamtpotenzials besteht im Einbau von effizienten Belüfterelementen (18,8 GWh/a). Die Einsparungen liegen zu annähernd 90 % auf Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5. Festzuhalten bleibt, dass bei allen Überlegungen zur Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen die sichere Einhaltung der geforderten Ablaufqualität oberste Priorität aufweist.

Tabelle 6: Eingriffsmöglichkeiten im Bereich der biologischen Reinigungsstufe

Verfahrensbereich	Beispiele
Biologische Stufe allgemein	<ul style="list-style-type: none"> o Schlammalter reduzieren (S) o Verfahrensweise umstellen (K/A) o Verkleinerung des Belebungsbeckenvolumens
Belüftung	<p><i>Belüftungsregelung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> o Sauerstoffsollwerte anpassen (S) o Gleitdruck-/Verteilregelung implementieren (K/A) <p><i>Belüfterelemente:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> o ineffiziente Belüfter erneuern (K/A) <p><i>Drucklufterzeugung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> o Frequenzumrichter nachrüsten (S) o ineffiziente Aggregate/Antriebe austauschen (K/A)
Rücklaufschlammförderung	<ul style="list-style-type: none"> o nach Zulaufmenge regeln (S) o max. RV reduzieren (S/K) o Frequenzumrichter nachrüsten (K) o ineffiziente Pumpen/Antriebe austauschen (K/A)
Rezirkulation	<ul style="list-style-type: none"> o nach $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf der DN regeln (S) o bei intermittierender N/DN abschalten (S) o ineffiziente Pumpen austauschen (K)
Umwälzung	<ul style="list-style-type: none"> o Rührwerke zeitweise abschalten (S) o Frequenzumrichter nachrüsten (K) o ineffiziente Rührwerke austauschen (K/A) o mit Stoßbelüftung umwälzen



4. Potenziale zur Energieerzeugung

4.1 ANSATZPUNKTE ZUR STEIGERUNG DER STROMERZEUGUNG

Neben der Stromeinsparung durch verfahrens- und anlagentechnische Optimierungen kann der Strombezug auf Kläranlagen durch die Erzeugung von Eigenstrom gesenkt werden. Für die Eigenstromproduktion steht als kläranlageneigene Energiequelle Faulgas zur Verfügung, ergänzt durch zusätzliche regenerative Energiequellen wie Sonnenenergie und Wasserkraft. Eine Übersicht über die Maßnahmen zur Erhöhung der Stromproduktion spiegelt Abbildung 18 wider.

4.1.1 FAULGASPRODUKTION

Bei bestehenden Faulungsanlagen (Anaerobanlagen) ist grundsätzlich davon auszugehen, dass der Betrieb fortwährend optimiert wird, um eine möglichst hohe Faulgasausbeute sicherzustellen. Die Qualität der Faulgasproduktion lässt sich danach beurteilen, wieviel Faulgas pro kg zugeführter organischer Masse (oTR) erzeugt wird. Nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [3] liegt eine gute Faulgasausbeute bei 450 bis 500 l_N/kg oTR und der einwohnerspezifische

Faulgasanfall bei 20 bis 24 l_N/(E · d) bzw. 7,3 bis 8,7 m³_N/(E · a).

Erhöhung Energiegehalt Rohschlamm

In Faulungsanlagen wird üblicherweise gut abbaubarer Primärschlamm mit einem hohen Anteil organischer Stoffe zusammen mit dem Überschussschlamm zu methanhaltigem Faulgas umgesetzt. Um für einen hohen Anteil an organischer Masse im Zulauf zur Faulung zu sorgen, sollte die Vorklärzeit möglichst groß und das Schlammalter in der Belebung möglichst klein (viel Primärschlamm und hoher Anteil oTR im Überschussschlamm) sein.

Beide Betriebsparameter müssen sich jedoch unbedingt an den gegenläufigen Anforderungen einer anschließenden Denitrifikation (erhöhter Kohlenstoffbedarf, längere Aufenthaltszeit in der Belebung) orientieren, um die sichere Einhaltung der wasserrechtlich geforderten Ablaufwerte nicht zu gefährden. Da die biologischen Vorgänge der Denitrifikation temperaturabhängig sind, kann eine Absenkung des Schlammalters zur Optimierung der Faulgasgewinnung vor allem in den wärmeren Sommermonaten sinnvoll sein.

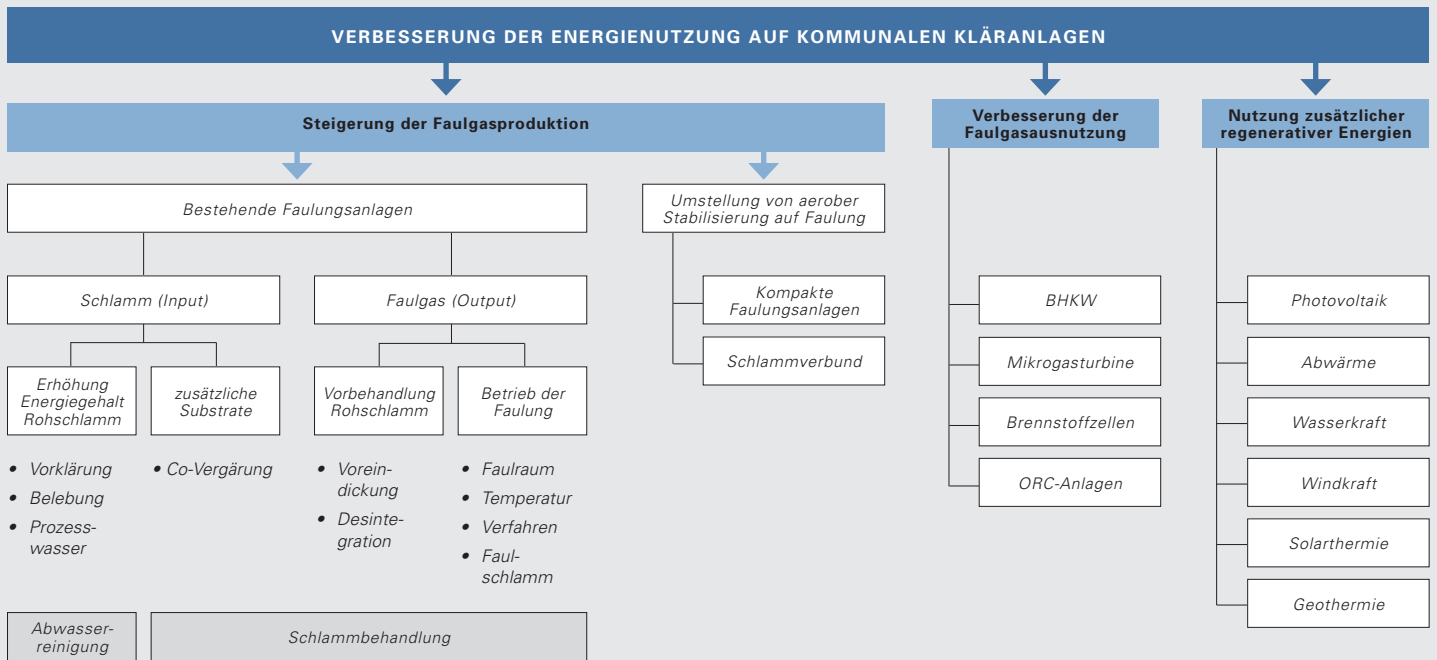


Abb. 18: Übersicht der Maßnahmen zur Erhöhung der Stromerzeugung

Zusätzliche Substrate

Bei Reservekapazitäten in der Faulungsanlage (lange Faulzeiten, Kapitel 2.2) kann eine Mitbehandlung von geeigneten Fremdschlämmen aus Nachbarkläranlagen oder Co-Substraten zur Erhöhung der Faulgasausbeute genutzt werden. Da eine solche Mitbehandlung durch das anfallende Prozesswasser zu einer erhöhten Rückbelastung der Belebungsanlage führt, müssen auch Reservekapazitäten in der Belebungsanlage vorhanden sein. Engpässen in diesem Bereich kann gegebenenfalls eine Vorbehandlung des stickstoffhaltigen Prozesswassers im Teilstrom entgegenwirken.

Die Mitbehandlung von Co-Substraten stellt eine effiziente Methode zur Steigerung der Faulgasausbeute dar, weshalb sie in den Energieanalysen als bevorzugte Maßnahme zur Steigerung der Faulgasproduktion empfohlen wird. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Co-Substraten in der Vergangenheit durch die Konkurrenz von Biogasanlagen sehr stark eingeschränkt worden. Die Co-Vergärung zusätzlicher Substrate nimmt daher in der Praxis eher eine regionale Sonderstellung ein (z. B. Schlempe aus dem Obst- und Weinanbau, Enteigungsabwasser von Flughäfen). Die rechtlichen Rahmenbedingungen müssen beachtet werden.

Vorbehandlung Rohschlamm / Betrieb der Faulung

Eine weitere Möglichkeit, das Substratangebot in der Faulung zu erhöhen, besteht in der Vorbehandlung des Rohschlammes durch chemischen oder physikalischen Aufschluss (Desintegration). Da die zur Anwendung kommenden Verfahren sehr energieaufwendig sein können, muss ihr Einsatz im Einzelfall sorgfältig geprüft werden.

Die anaerobe Stabilisierung des Schlammes und die damit verbundene Faulgasproduktion werden maßgeblich durch die Bedingungen im Faulbehälter beeinflusst. Die Qualität und Geschwindigkeit der biologischen Vorgänge hängen vom Substratangebot und der Temperatur ab und bestimmen somit die notwendige Aufenthaltszeit im Faulbehälter. Zum anderen hängt die Faulzeit von der hydraulischen Belastung (Raumbelastung) bzw. dem zur Verfügung stehenden Faulraumvolumen ab. Sowohl die hydraulische Aufenthaltszeit als auch der Energiebedarf zur Aufheizung des Faulschlammes können durch eine effektive Voreindickung des Rohschlammes positiv beeinflusst werden. Neben einer optimierten Aufenthaltszeit begünstigen eine gleichmäßige Beschickung des Faulraumes, die Vermeidung von Schwimmschlammdecken und eine gute Durchmischung (Vermeidung von Ablagerungen / Toträumen) die biologischen Vorgänge im Inneren [15].

Verfahrensumstellung aerob – anaerob

Durch eine Verfahrensumstellung von aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung kann auch dieser Klärschlamm zur Energiegewinnung genutzt werden. Die Umrüstung des Kläranlagenbetriebes auf anaerobe Schlammstabilisierung (Faulungsanlage) stellt eine erhebliche verfahrenstechnische Änderung mit weitreichenden Umbaumaßnahmen dar: Neben der Einrichtung zusätzlicher Verfahrensstufen (Vorklärung, Faulungsbehälter, Gasspeicher, KWK-Anlage, ggf. Filtratwasserspeicher) ist auch der Betrieb der biologischen Reinigungsstufe betroffen (Verkleinerung des Belebungsvolumens, Anpassung der Belüftung).

Den Kosten für die Umbaumaßnahmen und dem zukünftig erhöhten betrieblichen Aufwand stehen die Erhöhung des Eigenversorgungsgrades an elektrischer Energie und die Reduzierung der Entsorgungskosten durch Reduzierung der Klärschlammmenge gegenüber. Neue, technisch einfache und somit kostengünstige Entwicklungen von kompakten Faulungsanlagen (Faulbehälter mit integrierter Gasspeicherung) für kleine Kläranlagen < 20.000 EW rücken vor diesem Hintergrund zunehmend in den Fokus des öffentlichen Interesses [16]. In Rheinland-Pfalz wurde eine zweistraßige Faulungsanlage in kompakter Betonbauweise entwickelt [17].

Bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße < 20.000 EW spielt die Frage der Wirtschaftlichkeit eine zentrale Rolle. Neben dem finanziellen Aufwand folgt aus der Verfahrensumstellung auch ein betrieblicher Mehraufwand durch die neu hinzugekommenen Anlagenteile. Außerdem ist bei einer Verfahrensumstellung ein besonderes Augenmerk auf die Stickstoff-Ablaufwerte zu richten, die bei aerober Stabilisierung durch das höhere Schlammalter in der Regel niedriger sind.

Es wird deutlich, dass die Abwägung zwischen den Vor- und Nachteilen sehr komplex ist und letztlich nur im Einzelfall bewertet werden kann.

Schlammverbund

Die Investitionskosten durch Neubau einer Faulungsanlage können umgangen werden, wenn der bisher aerob stabilisierte Schlamm auf einer nahe gelegenen Nachbarkläranlage mit bestehender Faulungsanlage mitbehandelt werden kann (Schlammverbund). Betrachtungen zur Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit sind auch hier komplex und im Einzelfall zu bewerten.

Die Mitbehandlung von Fremdschlämmen im Schlammverbund könnte zukünftig vor dem Hintergrund einer gesicherten Klärschlamm Entsorgung an Bedeutung gewinnen: Die Wertstoffrückgewinnung aus Klärschlamm (Phosphor-Recycling) steht derzeit im Fokus der politischen Diskussion. Um die Einführung des P-Recyclings zu forcieren, wird angedacht, dass eine Verbrennung von Klärschlamm außerhalb von Monoverbrennungsanlagen (Mitverbrennung z. B. in Kohlekraftwerken) zukünftig nur nach vorheriger P-Rückgewinnung möglich sein soll.

Sowohl die energetische Nutzung (Faulgasverstromung) als auch die stoffliche Verwertung (P-Recycling) sind mit großen Klärschlamm m engen wirtschaftlicher zu betreiben als in kleinen Einzellösungen. Die Zentralisierung in der Schlammbehandlung begünstigt somit nicht nur die energetische Nutzung des Klärschlammes, sondern auch die weitere Nutzung von Klärschlamm als Wertstoff.

4.1.2 FAULGASNUTZUNG

Für die energetische Nutzung von Faulgas eignen sich besonders Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK). Sie erzeugen sowohl Strom als auch Wärme. Auf Kläranlagen kommen fast ausschließlich BHKW und vereinzelt Mikrogasturbinen zum Einsatz. Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW liegt heute bei ca. 85 % mit einem elektrischen Wirkungsgrad (η_e) von 30 bis 42 % für die Stromerzeugung.

Ein hoher elektrischer Wirkungsgrad wird nur erreicht, wenn das BHKW-Modul nicht in einem ungünstigen Teillastbereich unterhalb von 70 % geregelt werden muss. Bei Altanlagen ist der Wirkungsgrad zusätzlich durch altersbedingte Verschleißerscheinungen und den technischen Entwicklungsrückstand vermindert [15].

Die Modernisierung eines BHKW bietet sich in der Praxis besonders dann an, wenn die Abschreibungsfrist erreicht bzw. überschritten ist. In diesem Sinne ist der Ersatz durch ein modernes Aggregat mit höherem Wirkungsgrad eine abhängige Maßnahme. Die Wirtschaftlichkeit – gerade für kleinere Anlagen – wurde bisher durch die Förderung nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK-Gesetz) gestützt. Bei Erreichen einer solchen Förderung kann die Modernisierung des BHKW auch eine sinnvolle Sofortmaßnahme darstellen. Da die Fördermöglichkeiten einer dynamischen Entwicklung unterliegen, sind sie zeitnah im Einzelfall zu prüfen.

4.1.3 ZUSÄTZLICHE ENERGIEQUELLEN

Die Technik zur Nutzung von Sonnenenergie in Photovoltaik-Anlagen bietet mittlerweile eine kostengünstige Möglichkeit zur weiteren Stromerzeugung auf Kläranlagen, bei

denen in der Regel ausreichend große Dach- oder Grünflächen zur Verfügung stehen. Obwohl der Strombeitrag im Vergleich zum Gesamtstromverbrauch nur relativ klein ist, leisten PV-Anlagen einen sinnvollen Beitrag, der unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen genutzt werden sollte. Die Errichtung von PV-Anlagen wird oft auch in den Energieanalysen vorgeschlagen.

Treten auf der Kläranlage im Abwasserstrom deutliche Höhendifferenzen auf, kann im Einzelfall ein weiterer Strombeitrag durch eine Wasserkraftanlage erzielt werden. Auch hier ist die Wirtschaftlichkeit unter den lokalen Randbedingungen immer separat zu beurteilen.

Die Nutzung von Abwasserwärme findet bereits Anwendung bei der Wärmenutzung in Sammelkanälen (vor der Kläranlage) zur Beheizung von größeren, öffentlichen Gebäuden oder größeren Wohnanlagen. Auf der Kläranlage bietet sich der Wärmeentzug aus gereinigtem Abwasser besonders an. Mithilfe einer Wärmepumpe kann diese Wärme auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und zur Beheizung von Betriebsgebäuden genutzt werden. Dasselbe gilt für die Abwärmenutzung von Gebläsen. Die Nutzung von Abwärme aus Faulschlamm zur Vorwärmung von Rohschlamm in einem Schlamm/Schlamm-Wärmetauscher stellt eine dritte Möglichkeit der Abwärmenutzung dar.

Wird die Abwärme zur Beheizung von Betriebsgebäuden genutzt, kann dies zur Einsparung von Heizkosten vor allem auf Kläranlagen ohne Faulung genutzt werden. Die Wirtschaftlichkeit muss jedoch auch hier im Einzelfall geprüft werden.

4.2 POTENZIALABSCHÄTZUNG ZUR STROMERZEUGUNG

4.2.1 AUFSTELLUNG VON SZENARIEN

Ausgangssituation

Aus den Daten des DWA-Leistungsvergleichs 2013 geht hervor, dass in Baden-Württemberg bereits in Größenklasse 3 Faulungsanlagen vorhanden sind (16 %, Kapitel 2.3). In Größenklasse 4.1 betreiben 57 % der Kläranlagen und in Größenklasse 4.2 bereits 82 % eine Faulung; ab Größenklasse 4.3 betreiben alle Kläranlagen eine Faulung mit Ausnahme der Kläranlage Karlsruhe, die den anfallenden Klärschlamm direkt verbrennt.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Ausstattung der Faulungsanlagen mit BHKW. In Größenklasse 3 verfügen bereits 65 % der Anlagen über ein BHKW, in Größenklasse 4.1 sind es 72 % und in Größenklasse 4.2 bereits 96 %. Daraus folgt, dass weder durch Verfahrensumstellung auf anaerobe Stabilisierung noch durch Nachrüsten mit BHKW auf vorhandenen Faulungsanlagen ein großes Steigerungspotenzial bezüglich der Eigenstromproduktion zu erwarten ist.

Randbedingungen für die Szenarien

Vor dem Hintergrund der Bestandsanalyse wurden vier Szenarien formuliert (Tabelle 7). Die Abschätzung der Stromerzeugung erfolgt auf der Basis der mittleren Belastung nach Tabelle 4. Eine Zunahme der Schmutzfracht wurde nicht zugrunde gelegt. Ausgehend von der einwohnerspezifischen Stromerzeugung (Median, Tabelle 4) wurde für die Szenarien ein Anstieg auf den 75-Perzentilwert gewählt (17,0 kWh/(E·a) in Größenklasse 4 bzw. 21,0 kWh/(E·a) in Größenklasse 5). Durch Verwendung dieses Parameters erfolgt keine Festlegung auf eine bestimmte Maßnahme zur Steigerung der Stromerzeugung: Ob der Mehrertrag an Eigenstrom durch eine Erhöhung der Faulgasproduktion, einen erhöhten Wirkungsgrad der BHKW-Anlage, den Einsatz eines Co-Substrates oder die Nutzung zusätzlicher regenerativer Energien erfolgt, wird bewusst offen gelassen, da geeignete Maßnahmen unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen jeder Kläranlage getroffen werden müssen.

Tabelle 7: Aufstellung der untersuchten Szenarien

Nr.	Szenarien	Einwohnerspezifische Stromerzeugung [kWh/(E·a)]
1	Nachrüsten von BHKW bei bestehenden Faulungsanlagen GK 3, GK 4.1 und GK 4.2	9,8 (GK 3) 14,5 (GK 4.1, GK 4.2)
2a	Optimierung der Stromausbeute in GK 4	14,5 → 17,0
2b	Optimierung der Stromausbeute in GK 4 und GK 5	14,5 → 17,0 (GK 4) 18,0 → 21,0 (GK 5)
3	Umstellung aerobe auf anaerobe Stabilisierung (Faulung) GK 3, GK 4.1 und GK 4.2	9,8 (GK 3) 14,5 (GK 4.1 und GK 4.2)
4	best case Betrachtung (Kombination aus S1, S2b und S3)	9,8 (GK 3) 17,0 (GK 4) 21,0 (GK 5)

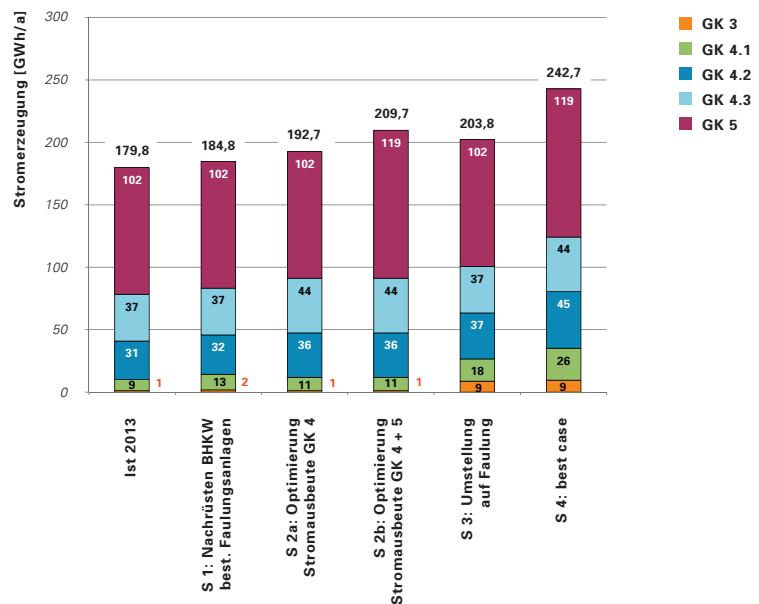
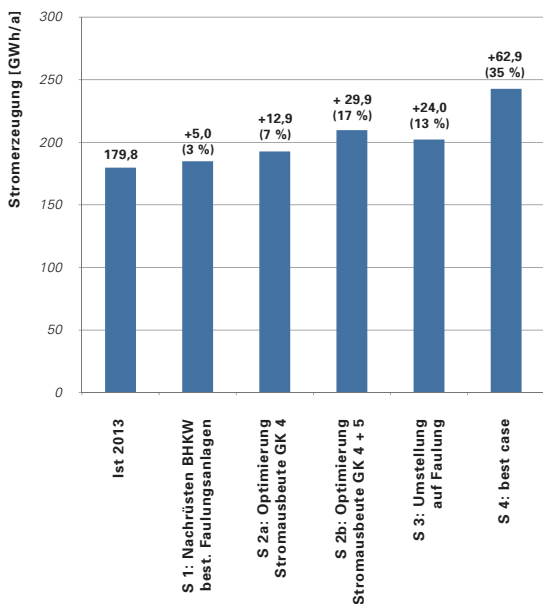


Abb. 19: Theoretische Stromerzeugung nach Szenarien

Szenarien

In Szenario 1 und 2 werden nur bestehende Faulungsanlagen betrachtet. Es wird die zu erwartende Stromerzeugung bei Nachrüsten von BHKW (Szenario 1) und bei Optimierung der Stromaubsbeute (Szenario 2) untersucht. Da die Faulgasausbeute durch verfahrenstechnische Maßnahmen (ohne Co-Fermentation) nur begrenzt zu steigern ist, basiert Szenario 2 im Wesentlichen auf der Modernisierung von BHKW (Austausch/Erweiterung). Dies ist auch in den Energieanalysen die am häufigsten genannte Maßnahme.

In Szenario 3 wird der Stromgewinn untersucht, der durch Umstellung von aerober auf anaerobe Stabilisierung zu erwarten ist (Neubau Faulung, Schlammverbund).

Szenario 4 stellt eine best case Betrachtung (theoretische Obergrenze) dar, welche die Szenarien 1, 2b und 3 beinhaltet. In diesem Szenario wird der gesamte Klärschlamm aus Größenklassen 3 bis 5 ausgefault und mit optimierter Stromaubsbeute (GK 4 und 5) energetisch genutzt. In Größenklasse 3 wird keine Erhöhung der Stromaubsbeute angesetzt, da dies als unrealistische Annahme angesehen wird.

4.2.2 THEORETISCHES STEIGERUNGSPOTENZIAL DER STROMPRODUKTION AUF BASIS DER DWA-DATEN

In Abbildung 19 ist der theoretisch erreichbare Stromzugewinn für jedes Szenario grafisch dargestellt.

Szenario 1: Nachrüsten von BHKW bei bestehenden Anlagen

Durch Nachrüsten von BHKW bei bestehenden Faulungsanlagen kann theoretisch ein Stromzugewinn von 5,0 GWh/a erzielt werden. Betroffen sind 33 Kläranlagen der Größenklassen 3 bis 4.2 mit einer mittleren Belastung von insgesamt 381.540 E. Der Hauptanteil von 3,5 GWh/a entfällt auf 19 Kläranlagen der Größenklasse 4.1. Eine solche Nachrüstung ist jedoch bei stark schwankender Gasausbeute oder -qualität nicht in jedem Fall möglich. Durch Nachrüsten mit BHKW werden auch die Anteile an Faulgas nutzbar gemacht, die bisher nur zur Wärmeerzeugung genutzt und möglicherweise im Sommer abgefackelt werden.

Das Nachrüsten von BHKW bei bestehenden Faulungsanlagen ist für alle Größenklassen wirtschaftlich.

Szenario 2: Optimierung der Stromausbeute

In Szenario 2 werden nur die Kläranlagen betrachtet, die bereits ein BHKW betreiben. Für Szenario 2a ergibt sich durch die Modernisierung der BHKW in Größenklasse 4 ein Stromzugewinn von 12,9 GWh/a. In Szenario 2b (GK 4 und 5) ließe sich die Stromerzeugung um 29,9 GWh/a steigern. Davon entfallen theoretisch 11,3 GWh/a auf die Größenklassen 4.2 und 4.3 und 17 GWh/a auf Größenklasse 5. Der restliche Beitrag von 1,6 GWh/a entfällt auf Größenklasse 4.1.

Die Modernisierung von BHKW kann für die Größenklassen 4.3 und 5 wirtschaftlich darstellbar sein, unter anderem abhängig von der gewährten KWK-Zulage.

Szenario 3: Umrüstung von aerober auf anaerobe

Stabilisierung

Diese Maßnahme betrifft insgesamt 205 Kläranlagen in den Größenklassen 3, 4.1 und 4.2 (Tabelle 8). Geht man von einer unveränderten einwohnerspezifischen Stromerzeugung in den Größenklassen 3 und 4 aus, liegt der Stromgewinn bei 24,0 GWh/a. In Szenario 3 ist auch Größenklasse 3 zu 32,5 % am Stromgewinn beteiligt, allerdings müsste dieser Anteil auf 124 Kläranlagen erwirtschaftet werden. Zudem ist eine Verfahrensumstellung in den Größenklassen 3 und 4.1 zum derzeitigen Stand in der Regel nach wie vor nicht wirtschaftlich. Dies würde sich bei Erhöhung der Betriebskosten (Strompreis, Entsorgungskosten) jedoch ändern. Trotzdem kann auch in kleinen Größenklassen aus Sicht des einzelnen Kläranlagenbetreibers eine Umrüstung durchaus sinnvoll und wirtschaftlich sein. Um landesweit einen nennenswerten Beitrag zur Stromerzeugung zu leisten, müsste jedoch eine große Zahl an Kläranlagen in Größenklasse 3 mit hohem Aufwand umgerüstet werden. Für das landesweite Potenzial zur Stromerzeugung spielt Größenklasse 3 daher keine Rolle.

Tabelle 8: Zusätzliche Stromerzeugung nach Szenarien

Szenario	Zugewinn Eigenstromerzeugung [GWh/a]					Summe Zugewinn in GWh/a und %
	GK 3	GK 4.1	GK 4.2	GK 4.3	GK 5	
1 <i>Nachrüsten BHKW</i>	0,6 9 KA	3,5 19 KA	0,9 5 KA	–	–	5,0 (+3 %)
2a <i>Opt. BHKW (GK 4)</i>	–	1,6 48 KA	5,0 98 KA	6,3 48 KA	–	12,9 (+7 %)
2b <i>Opt. BHKW (GK 4 und 5)</i>	–	1,6 48 KA	5,0 98 KA	6,3 48 KA	17,0 35 KA	29,9 (+17 %)
3 <i>Umstellung auf Faulung</i>	7,8 124 KA	9,4 56 KA	6,8 25 KA	–	–	24,0 (+13 %)
4 <i>best case</i>	8,4 133 KA	16,6 123 KA	14,6 128 KA	6,3 48 KA	17,0 35 KA	62,9 (+35 %)

* Kombination aus Szenario 1, 2b und 3 mit optimierter Stromausbeute ab GK 4

Anders sieht es für die Kläranlagen der Größenklassen 4.1 (56 KA / 9,4 GWh/a) und 4.2 (25 KA / 6,8 GWh/a) aus. Eine überschlägige Kosten-Nutzen-Betrachtung ergibt für Größenklasse 4.2 eine knappe Kostendeckung, so dass für diese Kläranlagen eine Umstellung bereits heute wirtschaftlich darstellbar ist.

Szenario 4: best case

Szenario 4 stellt eine Vision aus Kombination der Szenarien 1, 2b und 3 dar, d.h. alle Kläranlagen der Größenklassen 3 bis 5 betreiben eine anaerobe Faulung, ab Größenklasse 4 mit optimierter Stromausbeute. Dieses best case Szenario berechnet die theoretische Obergrenze des potenziellen Stromgewinns zu maximal 62,9 GWh/a. Dies entspricht einer Steigerung der Stromproduktion um 35 % gegenüber der Stromerzeugung von 2013.

4.3 FAZIT POTENZIALE

ZUR STROMERZEUGUNG

Die durchgeführten Betrachtungen haben gezeigt, dass durch den guten Ausbaustatus in Baden-Württemberg nur durch kurzfristige und abhängige Maßnahmen (K+A-Maßnahmen) eine deutliche Steigerung der Stromerzeugung zu realisieren ist.

Eine begrenzte Möglichkeit zur Steigerung der Faulgasausbeute besteht in der verfahrenstechnischen Optimierung von bestehenden Faulungsanlagen in den Größenklassen 3 bis 5. Die erforderlichen Maßnahmen sind eng verknüpft mit dem Betrieb der Abwasserreinigung, wobei die sichere Einhaltung der wasserrechtlich festgelegten Ablaufwerte Priorität hat.

Ein kurzfristiges Potenzial zur Steigerung der Stromerzeugung um insgesamt 5,0 GWh/a besteht durch Nachrüsten

von BHKW in den Größenklassen 3 bis 4.2. Ein wesentlich größeres Potenzial von 12,9 GWh/a liegt in der Modernisierung von BHKW in der gesamten Größenklasse 4. Entsprechende Maßnahmen in den Größenklassen 4 und 5 erbringen einen theoretischen Zugewinn von 29,9 GWh/a. Diese Maßnahmen sind nach Erreichen der Abschreibungsfrist bestehender Altanlagen oder zur Erlangung der KWK-Zulage sinnvoll, sofern sie sich wirtschaftlich darstellen lassen.

Die Umstellung von aerober auf anaerobe Stabilisierung betrifft vor allem Kläranlagen der Größenklassen 4.1 und 4.2 mit einem Potenzial von 16,2 GWh/a. Ob dieses Potenzial durch Neubau von Faulungsanlagen verfolgt werden sollte oder besser durch Faulung im regionalen Schlammverbund, bleibt im Einzelfall zu prüfen. Als Maßnahme zur Steigerung der Faulgas- und Stromausbeute ist dieses Ziel jedoch langfristig anzustreben. Es ist anzumerken, dass unter den heutigen Rahmenbedingungen eine Wirtschaftlichkeit in erster Linie für Kläranlagen der Größenklasse 4.2 in Verbindung mit weiteren Maßnahmen zur Erweiterung oder Sanierung zu erwarten bzw. im Einzelfall zu prüfen ist (abhängige Maßnahme).

Eine schnelle, flächendeckende Umstellung der aeroben Stabilisierungsanlagen auf anaerobe Stabilisierung ist ohne eine Änderung wesentlicher Faktoren (Förderung, Strompreis, Baukosten) nicht zu erwarten.

Die Vergärung von Co-Substraten zur Steigerung der Faulgasmenge ist zwar sehr effizient, aber nur dann sinnvoll, wenn sowohl in der Faulung als auch in der Belebungsanlage ausreichend Reservekapazitäten vorhanden sind. Die Probleme in der Praxis liegen in der Beschaffung geeigneter Substrate und in der Genehmigung zur Mitbehandlung.



Bei der zusätzlichen Stromerzeugung aus regenerativen Energien können Photovoltaik-Anlagen und, im Einzelfall, die Nutzung von Wasserkraftanlagen einen sinnvollen und wirtschaftlichen Beitrag leisten. Die Handlungsschwerpunkte fasst Tabelle 9 zusammen.

Tabelle 9: Handlungsschwerpunkte nach Szenarien und Größenklassen

Maßnahmen zur Steigerung der Stromerzeugung und Wärmenutzung	Maßnahmen zur Steigerung der Stromerzeugung und Wärmenutzung				
	GK 3	GK 4.1	GK 4.2	GK 4.3	GK 5
Verfahrenstechnische Optimierung bestehender Faulungsanlagen	●	●	●	●	●
Nachrüsten von BHKW bei bestehenden Faulungsanlagen	●	●	●		
Modernisierung von BHKW		●	●	●	●
Umstellung aerobe auf anaerobe Stabilisierung:					
– Neubau Faulung (kompakt / konventionell)	●	●	●		
– Mitbehandlung (Schlammverbund)	●	●	●		
	Abgabe	Abgabe	Abgabe		
			●	●	●
			Annahme	Annahme	Annahme
Vergärung von Co-Substraten			●	●	●
Zusätzliche regenerative Energien:					
Photovoltaik	●	●	●	●	●
Wasserkraft			●	●	●
Abwärme- / Abwasserwärmenutzung	●	●	●	●	●

● Im Einzelfall zu prüfen

● Positiv nach Kosten/Nutzen



5. Beispiele für realisierte Einzelmaßnahmen

Im Folgenden werden einige Beispiele umgesetzter Maßnahmen in Kurzsteckbriefen vorgestellt.

Umstellung von aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung

Ausbaugröße:	18.000 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	20,6 kWh/(E-a) (2012 bis 2014)
Investitionskosten:	639.200 €
Einsparung Stromverbrauch:	ca. 4 kWh/(E-a)
Eigenstromerzeugung:	156.000 kWh/a (ca. 44 %)

Maßnahme:

Auf einer Kläranlage mit bestehender Vorklärung, simultaner aerober Schlammstabilisierung und psychrophiler Faulung („kalte“ Faulung) wurde ein Kombinationsbehälter zur gleichzeitigen anaeroben, mesophilen Schlammstabilisierung und drucklose Gasspeicherung nachgerüstet. Die Integration erfolgte über einen kurzen Leitungsweg vor die bestehende „kalte“ Faulung, welche jetzt als Nacheindicker dient. Über das neue BHKW wird das gewonnene Faulgas zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt.

Austausch Sandfanggebläse

Ausbaugröße:	10.000 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	71,1 kWh/(E-a) (2009)
Investitionskosten:	ca. 12.000 €
Betriebskosteneinsparung:	2.000 €/a
Stromeinsparung:	ca. 10.000 kWh/a

Maßnahme:

Das Drehkolbengebläse zur Sandfangbelüftung wurde im Jahr 2010 durch ein neues, effizienteres Drehkolbengebläse ersetzt.

Anpassung der Gebläsesteuerung

Ausbaugröße:	160.000 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	42 kWh/(E·a) (2013)
Investitionskosten:	70.000 €
Energiekosteneinsparung:	14.800 €/a
Stromeinsparung:	87.080 kWh/a

Maßnahme:

Die Kläranlage verfügt über drei Turboverdichter. Durch den bisherigen Betrieb der beiden größeren Verdichter lag die Sauerstoffbereitstellung teilweise deutlich über dem Sauerstoffbedarf. Durch die Einbindung des kleineren Gebläses konnte zu Schwachlastzeiten deutlich weniger Luft eingetragen und somit der Strombedarf deutlich gesenkt werden.

Austausch Belüfter und Gebläse

Ausbaugröße:	10.000 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	71,1 kWh/(E·a) (2009)
Investitionskosten:	ca. 110.000 €
Betriebskosteneinsparung:	22.000 €/a aus geringerem Stromverbrauch 1.300 €/a aus geringerer Abwasserabgabe
Stromeinsparung:	ca. 110.000 kWh/a

Maßnahme:

Im Jahr 2010 wurden die beiden Drehkolbengebläse durch neue, effizientere Drehkolbengebläse ersetzt. Zeitgleich wurden ebenfalls die alten Keramikbelüfter durch neue Elemente ersetzt. Die gesamten Investitionskosten konnten mit den Abwasserabgaben der Vorjahre rückverrechnet werden. Der Gesamtstromverbrauch der Kläranlage konnte um ca. 34 % gesenkt werden.

Steigerung der Energieeffizienz bei Belüftung und Umwälzung

Ausbaugröße:	19.500 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	44,2 kWh/(E·a) (2014)
Investitionskosten:	160.000 €
Stromeinsparung:	ca. 80.000 kWh/a

Maßnahme:

Auf einer 2-straßig ausgeführten Kläranlage wurde ein kaskadiertes Belebungsbecken (N/DN) mit neuen, effizienten Belüfterelementen ausgerüstet. Zwei der drei Kaskaden (je Straße) werden zumeist als vorgeschaltete Denitrifikationsbecken betrieben. Im Zuge des Belüfteraustausches wurden auch diese mit Belüftern ausgestattet. In unbelüfteten Phasen erfolgt die Umwälzung nun mit Luft. Die Rührwerke wurden demontiert.



Erneuerung BHKW

Ausbaugröße:	215.000 EW
Gesamtstromverbrauch, einwohnerspezifisch:	33 kWh/(E-a) (2011)
Investitionskosten:	1.460.000 €
Betriebskosteneinsparung:	ca. 30.000 €/a
Stromzugewinn:	380.000 kWh/a

Maßnahme:

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsprüfung wurde untersucht, ob eine Überholung der 14 Jahre alten BHKW oder eine Neuanschaffung sinnvoller ist. Da bei einer Neuanschaffung Aggregate mit wesentlich höherem elektrischen Wirkungsgrad installiert werden konnten (42 % statt 35 %), war dieser Schritt wirtschaftlicher. Weitere Maßnahmen in der biologischen Reinigungsstufe werden derzeit umgesetzt.

Vor Umsetzung einer vorgeschlagenen Energiesparmaßnahme sollte in jedem Fall eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden. Über eine Kostenvergleichsrechnung auf Basis von KVR-Leitlinien [18] wird

eine Aussage über die kostenmäßige Vorteilhaftigkeit einer Einzelmaßnahme möglich. Die Wirtschaftlichkeit ist bei der Entscheidungsfindung für oder gegen eine Optimierungsmaßnahme als zentrales Kriterium heranzuziehen.



6. Energiebedarf zur Spurenstoffelimination

Die Entfernung von organischen Spurenstoffen aus dem Abwasser wird zunehmend intensiv diskutiert. So beschärfen sich inzwischen verschiedene europäische Gewässerschutzrichtlinien mit der Belastung von Gewässern durch organische Spurenstoffe.

Besonderes Augenmerk wird hierbei auf anthropogene Spurenstoffe (z. B. Inhaltsstoffe aus Medikamenten und Pflegeprodukten) gelegt, die bei der Produktion und/oder nach der Nutzung durch den Menschen in das gewerbliche und häusliche Abwasser gelangen. Herkömmliche Kläranlagen eliminieren jedoch nur einen Teil dieser Stoffe. Ein weitergehender Abbau ist nur in einer zusätzlichen Reinigungsstufe möglich. Dabei kommen zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren zur Anwendung: Bei dem Verfahren der Ozonung werden die Schadstoffe mit Hilfe von Sauerstoff zerstört (oxidiert). Im Gegensatz dazu werden die Schadstoffe bei Verfahren mit Aktivkohle an dieselbe gebunden (adsorbiert).

Da die Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination jedoch stromintensiv ist, muss zukünftig bei einer Implementierung auch mit einem erhöhten Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen gerechnet werden.

Pulveraktivkohle

Im Land Baden-Württemberg sind mehrere Kläranlagen, die bereits über eine Filteranlage verfügen, zusätzlich mit einer vierten Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle (PAK) ausgestattet worden. Zu einigen dieser Anlagen liegen inzwischen belastbare Daten zu Kosten und Energieverbräuchen vor [19].

Der spezifische Stromverbrauch für die Adsorptionsstufe liegt demnach zwischen 0,016 und 0,044 kWh/m³. Umgerechnet auf die angeschlossenen Einwohner läge der spezifische Stromverbrauch der Adsorptionsstufe somit zwischen 1,30 und 3,98 kWh/(E·a). Hinzu kommen ca. 2,5 bis 6 kWh/(E·a) für den Betrieb einer Raumfiltration,

sofern diese noch nicht vorhanden ist [19]. Daraus ergibt sich eine Erhöhung des Stromverbrauchs durch den Betrieb einer PAK-Stufe inkl. Filtration um etwa 7 kWh/(E·a). Dieser Wert wird auch im Spurenstoffbericht des Landes Baden-Württemberg genannt [20].

Granulierte Aktivkohle

Eine weitere Möglichkeit zur Elimination von Spurenstoffen ist die Verwendung von granulierter Aktivkohle (GAK). In der Literatur finden sich für diesen Prozess Stromverbräuche von 0,01 bis 0,076 kWh/m³. Untersuchungen an bereits in Betrieb befindlichen Anlagen zeigen spezifische Stromverbräuche zwischen 0,025 und 0,063 kWh/m³. Die deutlichen Unterschiede kommen durch die im Einsatz befindlichen Hebewerke zustande, die einen großen Einfluss auf den Stromverbrauch haben [21]. Der Stromverbrauch eines GAK-Filters lässt sich demnach in ähnliche Größenordnungen wie der eines Sandfilters einordnen. Da sich die Aktivkohle je nach Abwasserbeschaffenheit schneller zusetzt als andere Filtermaterialien, sind unter Umständen häufigere Rückspülungen notwendig, was zu einem höheren Stromverbrauch führen kann.

Ozonung

Neben der Adsorption an Aktivkohle lassen sich Spurenstoffe auch durch Oxidation mittels Ozon umwandeln. Hierbei hängt der Stromverbrauch sehr stark von der Dosierung des Ozons ab. Das Ozon wird vor Ort, entweder aus Luftsauerstoff oder aus angeliefertem Reinsauerstoff, hergestellt. Abhängig gewählter Betriebsparameter und verschiedener Randbedingungen schwankt der spezifische Energiebedarf dabei zwischen 0,04 bis 0,48 kWh/m³. Auf Anlagen mit einer Herstellung von Reinsauerstoff vor Ort kann der Energiebedarf deutlich höher liegen. Insbesonde-

re auf größeren Anlagen wird eine Reinsauerstoffherstellung vor Ort daher als unwirtschaftlich angesehen [21].

Eine theoretische Untersuchung für 40 Kläranlagen in der Schweiz zeigte, dass sich der spezifische Stromverbrauch durch eine Ozonung mit 4 bis 6 g Ozon pro m³ um 0,05 bis 0,08 kWh/m³ erhöht (6 bis 9 kWh/(E·a)). Durch einen anschließenden Raumfilter kämen weitere 0,02 bis 0,05 /m³ hinzu (2,5 bis 6 kWh/(E·a)) [22]. In Summe ergäben sich somit 8,5 bis 15 kWh/(E·a) für den Betrieb einer Ozonung inklusive Raumfilter.

Bei der Auswertung von Daten aus in Betrieb befindlichen Anlagen ergaben sich spezifische Stromverbräuche zwischen 0,043 und 0,169 kWh/m³ bei Dosierungen zwischen 2 und 7 g Ozon pro m³ [21].



7. Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden durch das Land Baden-Württemberg viele Energieanalysen auf Kläranlagen gefördert. Diese dienen dazu, das Potenzial zur Energieeinsparung und vermehrten Eigenstromerzeugung zu erkennen und zu nutzen. Somit können Kläranlagen als in der Regel größter kommunaler Stromverbraucher ihrer Vorbildfunktion nachkommen und einen Beitrag zu Klimaschutz und Energiewende leisten. Wichtig ist jedoch, dass eine Energieeinsparung nicht um jeden Preis erfolgen darf. Der Gewässerschutz steht zu jeder Zeit im Vordergrund!

Energieeinsparung

Die Auswertung der Energieanalysen im Rahmen dieser Studie ergab ein abgeschätztes Potenzial zur Energieeinsparung in Baden-Württemberg von etwa 68 GWh/a, dies entspricht etwa 14 % des Gesamtstrombedarfs baden-württembergischer Kläranlagen und dem jährlichen Stromverbrauch von etwa 15.000 Vier-Personen-Haushalten. Über ein Viertel des gesamten Einsparpotenzials ließe sich demnach ohne größere Investitionen durch die Umsetzung von

Sofortmaßnahmen erschließen. Nimmt man zusätzlich auch eine Umsetzung der kurzfristigen Maßnahmen an, so ließen sich etwa drei Viertel des gesamten Potenzials realisieren. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil der Maßnahmen auch wirtschaftlich umgesetzt werden kann.

Schon während der Planungsphase sind für die verschiedenen Systeme über die gesamte Nutzungszeit neben den Investitionskosten auch die Betriebskosten und die Energieeffizienz zu berücksichtigen. Hierzu sollten bereits im Rahmen der Ausschreibung Energieeffizienzkriterien vorgegeben werden.

Energieerzeugung

Neben der Energieeinsparung zeigen die Energieanalysen auch Möglichkeiten auf, wie sich die Eigenstromerzeugung steigern lässt. Die 62 Energieanalysen, die etwa 21 % der gesamten Ausbaugröße in Baden-Württemberg umfassen, kommen hierbei auf ein Potenzial von etwa 10 GWh/a für die darin betrachteten Kläranlagen. Eine Hochrechnung

mit den Zahlen aus dem Leistungsvergleich der DWA Baden-Württemberg zeigt bestenfalls ein Potenzial von 55 bis 63 GWh/a, abhängig davon, ob Größenklasse 3 mitberücksichtigt wird oder nicht.

Zukünftiger Stromverbrauch

Der Stromverbrauch der hier betrachteten Kläranlagen (n=483) liegt aktuell bei 488.500 MWh/a. Durch Ausschöpfung der Potenziale zur Optimierung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung ließe sich dieser zukünftig theoretisch auf 420.100 MWh/a senken. Der Strombezug von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) ließe sich durch Optimierung der Eigenstromerzeugung um 62.900 MWh/a senken (Abbildung 20).

In der aktuellen fachlichen Diskussion spielt die Elimination von Spurenstoffen eine große Rolle. Da die Verfahren Energie benötigen, ist zukünftig von einer Steigerung des Strombedarfs auf Kläranlagen auszugehen. Aktuell benötigt eine Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination mit anschließendem Filter etwa 7 kWh/(E·a). Eventuell ist die Spurenstoffelimination zukünftig durch weitere Verfahrenstechniken energieeffizienter zu leisten. Alternative Verfahren (z. B. Fenton-Prozess, Titandioxid+UV-Bestrahlung) befinden sich jedoch noch am Anfang der Forschung. Unter der Annahme, dass zukünftig alle baden-württem-

bergischen Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 50.000 EW mit einer zusätzlichen Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination und anschließendem Filter ausgestattet werden, ergibt sich ein zusätzlicher Strombedarf von 60.900 MWh/a. Die Betrachtungen im Rahmen dieser Studie zeigen, dass der Strombedarf einer zusätzlichen Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination theoretisch durch das Stromeinsparpotenzial für die Summe der Kläranlagen gedeckt werden könnte (Abbildung 20). Im Einzelfall gilt dies jedoch nur für Kläranlagen mit entsprechendem Einsparpotenzial.

Auch die Verschärfung von Überwachungswerten für Ammonium auf Werte < 5 mg/l NH₄-N in der qualifizierten Stichprobe kann durch zusätzliche Belüftungsenergie oder Aggregateinsatz zur Teilstrombehandlung zu einem tendenziell höheren Energiebedarf führen. Dies kann auch für Maßnahmen zur separaten Filtratwasserbehandlung zur Minimierung des emittierten Gesamtstickstoffs gelten.

Zusätzlich steht die Wertstoffrückgewinnung aus Klärschlamm (Phosphor-Recycling) derzeit im Fokus der politischen Diskussion. Die Behandlung von Fremdschlämmen im Schlammverbund könnte daher an Bedeutung gewinnen, um neben der energetischen Nutzung des Klärschlammes auch die stoffliche Rückgewinnung wirtschaftlich zu betreiben.

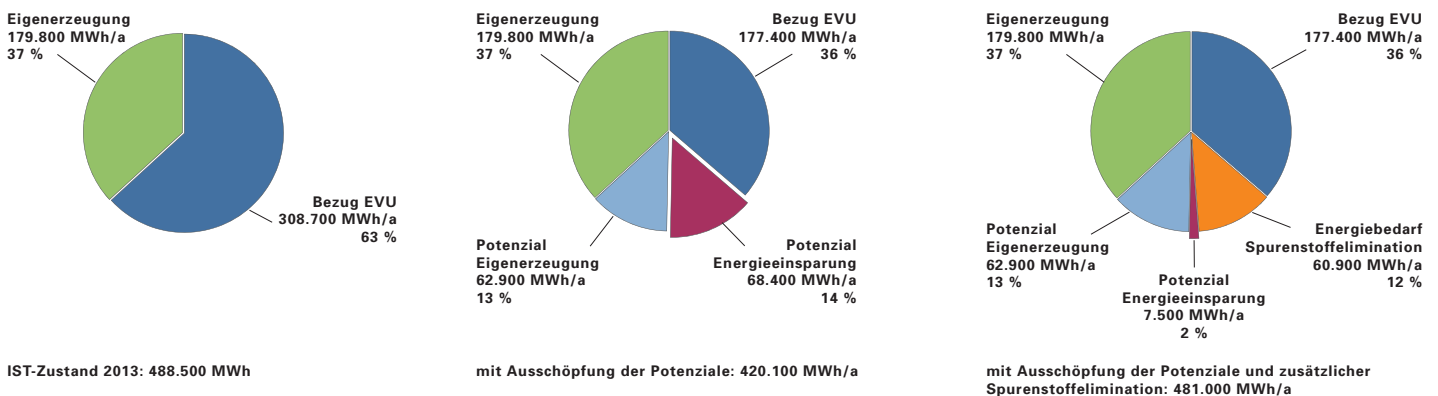


Abb. 20: Jährlicher Stromverbrauch in MWh/a



8. Handlungsempfehlungen

Das energetische Optimierungspotenzial einer Kläranlage kann über einen Energiecheck gemäß dem DWA-Arbeitsblatt DWA-A 216 [3] mit der Aufnahme wesentlicher energierelevanter Anlagendaten ermittelt werden. Der Energiecheck kann auch vom Betriebspersonal durchgeführt werden. Anlagen- und verfahrenstechnische Besonderheiten in Kombination mit den Großverbrauchern sowie Erfahrungswissen des Betriebspersonals zum Betrieb der Verfahrensstufen vervollständigen diese erste Bestandsaufnahme. Aus den erhobenen Daten werden energetische Kennzahlen (Tabelle 10) berechnet, die anhand von Häufigkeitsverteilungen mit den Verbrauchswerten anderer Kläranlagen verglichen werden. Ergibt sich im Energiecheck, dass die betrachtete Kläranlage einen hohen Energieverbrauch hat, begründet dies eine nachfolgende Durchführung der weiterführenden Energieanalyse.

Folgende Daten werden für den Energiecheck benötigt:

- Wassermenge (Q_{PW}), manometrische Förderhöhe (h_{man}) und Stromverbrauch von Pumpwerken (E_{PW})
- Mittlere CSB-Zulaufkraft ($B_{d,CSB,dM}$)
- Organische Schlammfracht im Zulauf zum Faulbehälter ($m_{oTR,zu}$)
- Faulgaserzeugung (Q_{FG})
- Strombezug aus dem Versorgungsnetz und Eigenstromerzeugung im BHKW (E_{KWK})
- Primärenergie für die Wärmebereitstellung (E_{therm})

Die weiterführende Energieanalyse sollte von externen Fachleuten durchgeführt werden, welche umfangreiche Erfahrungen im Bereich Planung und Betriebsoptimierung von Kläranlagen haben. Für die Energieanalyse werden alle Aggregate (z. B. $> 1 \text{ kW}_d$) nach Verfahrensgruppen sortiert in einer Verbrauchermatrix mit ihren Energieverbräuchen zusammengeführt. Die Stromverbrauchswerte werden auf die mittlere Einwohnerfracht (E_{CSB}) bezogen und mit den kläranlagenspezifischen Idealwerten nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [3] verglichen. Hierauf aufbauend werden mögliche Optimierungsmaßnahmen entwickelt und auf ihre technische Machbarkeit und wirtschaftliche Umsetzbarkeit geprüft. Aufgabe des Kläranlagenbetreibers ist die umfassende Bereitstellung der Betriebsdaten und -unterlagen, die Begleitung ggf. erforderlicher Leistungsmessungen und die Mitwirkung an den empfohlenen Maßnahmenpaketen.

Die in der Energieanalyse ermittelten Optimierungsvorschläge sollten anschließend je nach Maßnahme entweder vom Anlagenbetreiber oder durch externe Auftragnehmer umgesetzt werden.

Der Energiecheck sollte regelmäßig wiederholt werden. So lassen sich umgesetzte Maßnahmen auf Erfolg überprüfen und Änderungen im Energieverbrauch entdecken.

Im Anhang finden sich Hinweise zu Fördermöglichkeiten und Steuervergünstigungen. Diese entsprechen dem aktuellen Stand bei Drucklegung. Es wird dringend empfohlen, vor der Umsetzung von Maßnahmen die Aktualität der Fördermöglichkeiten und Steuervergünstigungen zu überprüfen.

Tabelle 10: Erhebungsgrößen zur Durchführung eines Energiechecks, nach [3]

	Einheit	Bezeichnung	Ermittlung
e_{ges}	$kWh/(E \cdot a)$	Spez. Stromverbrauch Gesamt	$e_{ges} = E_{ges} / E_{CSB}$
e_{bel}	$kWh/(E \cdot a)$	Spez. Stromverbrauch Belüftung	$e_{bel} = E_{bel} / E_{CSB}$
Kläranlagen mit Faulung			
$e_{FG,1}$	$l_N / (E \cdot d)$	Spez. Faulgasproduktion	$e_{FG} = Q_{FG} / E_{CSB}$
$e_{FG,2}$	$l_N / kg \text{ oTR}$		$e_{FG} = Q_{FG} / m_{oTR,zu}$
N_{FG}	%	Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	$N_{FG} = (E_{KWK} / E_{FG}) \cdot 100$
V_E	%	Eigenversorgungsgrad Elektrizität	$V_E = (E_{KWK} / E_{ges}) \cdot 100$
e_{ext}	$kWh/(E \cdot a)$	Spez. Externer Wärmebezug	$e_{ext} = E_{therm} / E_{CSB}$
Pumpwerk			
e_{PW}	$Wh/(m^3 \cdot m_{FH})$	Spez. Stromverbrauch Pumpwerk	$e_{PW} = E_{PW} / (Q_{PW} \cdot h_{man})$

9. Literatur

- [1] MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT NORDRHEIN-WESTFALEN: Handbuch Energie in Kläranlagen. 1999
- [2] BAUMANN, P.; MAURER, P.; ROTH, M.: Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen: Systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials. DWA-Leitfaden für das Betriebspersonal, Heft 4, 3. Aufl. Stuttgart: DWA-Landesverband Baden-Württemberg, 2014
- [3] DWA: Arbeitsblatt DWA-A 216 (Entwurf): Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef, 2013
- [4] KOLISCH, G.; OSTHOFF, T.; HOBUS, I.; HANSEN, J.: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen: Eine Energiebetrachtung zu durchgeführten Energieanalysen. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 57 (2010), Nr. 10, S. 1028–1032
- [5] MINISTERIUM FÜR UMWELT, FORSTEN UND VERBRAUCHERSCHUTZ RHEINLAND-PFALZ: Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft – Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Mainz, 2007
- [6] DWA: Arbeitsblatt DWA-A 268 (Entwurf): Automatisierung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef, 2015
- [7] WAGNER, M.; LOOCK, P.: Betriebskosteneinsparung durch Optimierung von Belüftungseinrichtungen. 78. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, Schriftenreihe WAR; Bd. 176, 2006
- [8] ALEX, J.; MORCK, T.; ZETTL, U.: Modelltechnische Überprüfung energieeffizienter Luftverteilerregelungen bei Druckbelüftung, DWA-Fachtagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen (MSR)“. Kassel, 09.06.2015
- [9] ZETTL, U.; BAUMANN, P.; DIEHM, B.; HAUCK, T.: WWTP Stuttgart – Mühlhausen – changeover to air distribution control system (ADC), 12th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants. Prag, Tschechische Republik, 08.09.2015
- [10] DWA: Arbeitsblatt DWA-M 229-1: Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Hennef, 2013
- [11] VERBAND SCHWEIZER ABWASSER- UND GEWÄSSERSCHUTZFACHLEUTE: Handbuch Energie in ARA: Neuauflage des Handbuchs Energie in ARA von 1994. 2010
- [12] LEMBERGER, H.: Energiebedarf zur Homogenisierung, DWA-Fachtagung „Energieeffizienz bei Belüftern und bei der Homogenisierung“. Neuhausen/Fildern, 18.06.2009
- [13] MESSNER, P.: Die Auswirkungen moderner Belüftungstechnik auf die biologische Abwasserreinigung, Fachkonferenz „Die transparente Kläranlage“. Düsseldorf, 06.09.2006
- [14] HABERKERN, B.; MAIER, W.; SCHNEIDER, U.: Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Dessau-Roßlau, Forschungsbericht 205 26 307, UBA-FB 001075, 2008

- [15] MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Energie und Klimaschutz“. 2014
- [16] DWA: Schlammfäulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe: DWA-Themen T 1/2015. Hef, 2015
- [17] MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG, WEINBAU UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ: Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung: Energetisches und ökonomisches Optimierungspotenzial. Mainz, 2014
- [18] DWA: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). 8. überarbeitete Aufl. Hef, 2012
- [19] METZGER, S.; TJOENG, I.; RÖBLER, A.; SCHWENTNER, G.; RÖLLE, R.: Kosten der Pulveraktivkohleanwendung zur Spurenstoffelimination am Beispiel ausgeführter und in Bau befindlicher Anlagen. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 61 (2014), Nr. 11, S. 1029–1037
- [20] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: Anthropogene Spurenstoffe im Gewässer: Spurenstoffbericht Baden-Württemberg 2012. Stuttgart
- [21] PINNEKAMP, J.; MOUSEL, D.; KREBBER, K.; PALMOWSKI, L.; BOLLE, F.-W.; GREDIGK-HOFFMANN, S.; GENZOWSKY, K.; KRÜGER, M.; ECKERS, S.; SIMSHEUSER, C.; LYKO, S.; THÖLE, D.: Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase II: Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. 2014
- [22] ABEGGLEN, C.; SIEGRIST, H.: Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser: Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen, Umwelt-Wissen Nr. 1214. Bern, Schweiz, 2012

Anhang

FÖRDERMÖGLICHKEITEN:

Für die Erstellung und Umsetzung von Energiemaßnahmen werden verschiedene Förderungen gewährt. Die derzeitigen Förderprogramme des Landes Baden-Württemberg und des Bundes werden nachfolgend aufgelistet. Weiterhin werden die möglichen steuerlichen Vergünstigungen vor allem im Bereich der Eigenstromerzeugung aufgezeigt. Diese Fördermöglichkeiten und Steuervergünstigungen entsprechen dem Stand August 2015 und sind unbedingt vor Anwendung auf Aktualität zu überprüfen.

Baden-Württemberg

Förderrichtlinien Wasserwirtschaft – FrWw 2009

- 50 % der Kosten von Energieanalysen, die der Energieeffizienz dienen, werden vom Land übernommen
- Antragstellung jederzeit beim zuständigen Landratsamt möglich

Klimaschutz plus

- Vor Umsetzung von Maßnahmen wird empfohlen, eine mögliche Förderung durch das Programm „Klimaschutz plus“ zu prüfen.
- www.um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/klimaschutz/foerdermoeglichkeiten/klimaschutz-plus/

Bund

Kommunalrichtlinie des BMUB für Klimaschutzprojekte

- Zuschuss von bis zu 50 % der Kosten von Energieanalysen
- Zuschuss von bis zu 25 % der Investitionskosten für Klimaschutztechnologien bei der Stromnutzung, insbesondere Raumluftechnische Anlagen und Beleuchtung
- Antragstellung beim Projektträger Jülich, ggf. auch für mehrere kleine Anlagen möglich
- www.klimaschutz.de/de/programm/kommunalrichtlinie

Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz, NAPE des BMWi

- Bundesweite Förderung von Energieanalysen auf Kläranlagen gemäß DWA-A 216, Laufzeit des Förderprogramms ca. 5 Jahre, genaue Konditionen noch offen
- Veröffentlichung der Verordnung für 2015 geplant
- www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energieeffizienz/nape,did=672254.html

IKU – Energetische Stadtsanierung – Quartiersversorgung der Kreditanstalt für Wiederaufbau

- Verschiedene Programme für zinsverbilligte Kredite für energetische Investitionsmaßnahmen, es wird explizit auf Maßnahmen im Bereich Abwasser hingewiesen
- [www.kfw.de/inlandsfoerderung/Oeffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Energieversorgung/Finanzierungsangebote/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-kommerzielle-Unternehmen-\(202\)/](http://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Oeffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Energieversorgung/Finanzierungsangebote/Energieeffiziente-Quartiersversorgung-kommerzielle-Unternehmen-(202)/)

STEUERVERGÜNSTIGUNGEN:

Rückerstattung der Energiesteuer für

KWK-Brennstoff

Die Energiesteuer wird automatisch beim Bezug von fossilen Energieträgern bezahlt und beträgt für leichtes Heizöl 6,014 Cent/Liter, für Erdgas und andere gasförmige Kohlenwasserstoffe 0,55 Cent/kWh und für Flüssiggas 6,06 Cent/kg.

Bei Einsatz des Brennstoffes in KWK-Anlagen kann ein Antrag auf Rückerstattung beim zuständigen Hauptzollamt gestellt werden. Der Antrag muss im Folgejahr beim Hauptzollamt eingegangen sein. Kurze Abrechnungszeiträume, z. B. monatlich, können beantragt werden. Das Hauptzollamt verlangt einen Nachweis über Brennstoffart und -menge und den Jahres- bzw. Monatsnutzungsgrad.

Für rein wärmegeführte kleine BHKW gibt es ein verein-

fachtes Verfahren. Hier wird die BHKW Energiesteuer aus den technischen Daten der Anlage, der Stromproduktion und/oder den Benutzungsstunden des BHKW berechnet.

BHKW: Befreiung von der Stromsteuer

Die Stromsteuer (StromStG, § 9) ist auf der Stromrechnung ausgewiesen und beträgt 2,05 Cent/kWh.

Von der Stromsteuer befreit sind Betreiber von BHKW mit einer elektrischen Leistung von bis zu 2 MW. Es wird nur der Strom berücksichtigt, der selbst verbraucht wird. Diese Regelung für die BHKW-Stromsteuer bezieht auch Strom ein, der von Dritten innerhalb des Objekts genutzt wird. Ein Beispiel dafür ist BHKW-Contracting, bei dem auch der Endverbraucher von der BHKW-Stromsteuer befreit ist.

KWK-Zulage (gemäß KWK-Gesetz von 2012)

Für selbst genutzten oder eingespeisten Strom aus BHKW wird vom zuständigen Verteilnetzbetreiber eine Zulage gemäß Tabelle 11 bezahlt, sofern die zugehörige Abwärme für die Beheizung von Gebäuden oder als Prozesswärme (hier für die Beheizung von Faultürmen) genutzt wird. Die Anlage muss beim Verteilnetzbetreiber und dem Bundesamt für Außenwirtschaft (BAFA) angemeldet werden. Die Betreiber von BHKW bis 50 kW elektrischer Leistung haben mit Antragstellung bei der BAFA ein Wahlrecht, ob Sie den KWK-Zuschlag für den Zeitraum von 30.000 Betriebsstunden oder 10 Jahren erhalten möchten.

Für Nano-BHKW bis 2 kW kann der KWK-Zuschlag pauschal für 30.000 Stunden bei Inbetriebnahme ausbezahlt werden.

Tabelle 11: Hocheffiziente Neuanlagen nach §5, Abs. 2, KWK-Gesetz

Anlagenklasse	Neu	Förderdauer
	Cent/kWh	Betriebsjahre / Volllaststunden
bis 50 kW	5,41	10 Jahre oder 30.000 h
50 kW – 250 kW	4,00	30.000 h
250 kW – 2 MW	2,40	30.000 h
über 2 MW	1,80	30.000 h

Förderung Wärmenetze und -speicher (gemäß

KWK-Gesetz von 2012)

Wärmespeicher mit mindestens 1 m³ Wasservolumen-äquivalent oder mindestens 0,3 m³ pro Kilowatt installierter elektrischer Leistung werden mit 250 Euro je m³, jedoch maximal 30 % der Investition bezuschusst, sofern die Wärmeverluste unter 15 % liegen, die Wärme überwiegend aus einer KWK-Anlage stammt und die KWK-Anlage auf den Bedarf im Stromnetz reagiert. Die Bemessung von Speichern erfolgt in Wasservolumenäquivalenten, um auch Latentwärmespeicher zu berücksichtigen.

Wärmenetze mit einem Innendurchmesser bis 100 mm erhalten eine Förderung von 100 Euro je laufendem Meter jedoch maximal 40 % der Investitionskosten. Wärmenetze mit einem Innendurchmesser von mehr als 100 mm erhalten eine Förderung in Höhe von 30 % der Investitionskosten.

Förderung nach EEG / Befreiung von EEG-Umlage

nach EEG 2014

A) Einspeisevergütung bei Klärgasnutzung zur Stromerzeugung

Die Einspeisevergütung berechnet sich dabei über die sogenannten „anzulegenden Werte“ (in Cent/kWh), die dann jeweils einer Degression und sonstigen Abzügen

unterliegen. Für Strom aus Klärgas beträgt der anzulegende Wert gemäß § 42 bei Inbetriebnahme bis 01.01.2016 6,69 Cent/kWh für eine Bemessungsleistung bis 500 kW bzw. 5,83 Cent/kWh bis 5 MW. Von diesen Werten wird bei Inbetriebnahme ab 01.01.2016 bei Klärgas 0,2 Cent/kWh abgezogen und dann die Degression für die anzulegenden Werte für Klärgas nach § 27 mit 1,5 % pro Jahr angesetzt.

B) Einspeisevergütung bei Photovoltaikanlagen

Ähnliches gilt für die Vergütung von Strom aus PV-Anlagen. Der anzulegende Wert für Anlagen auf Gebäuden beträgt dabei zunächst bis 10 kW 13,15 Cent/kWh, bis 40 kW 12,8 Cent/kWh und bis 1 MW 11,49 Cent/kWh. Dieser Wert wird aber nach Maßgabe von § 31 je nach Zubau neuer PV-Anlagen einer starken Degression unterworfen: Liegt der Zubau im Zielkorridor von 2.400 bis 2.600 Megawatt pro Jahr, so beträgt die Degression der Vergütung ab 01.09.2014 monatlich 0,5 % im Vergleich zum Vormonat. Dieser Wert erhöht sich bei Überschreitung des Zielkorridors und verringert sich bei Unterschreitung.

Bei den derzeitigen Strompreisen für Kläranlagen ist die erzielbare Einsparung bei Eigenbedarfsdeckung in jedem Fall deutlich höher, so dass auch hier allenfalls eine Einspeisung des Überschussstroms in Frage kommt.

C) EEG-Umlage für eigenerzeugten Strom

Die Verpflichtung zur Zahlung der EEG-Umlage für Letztverbraucher und Eigenversorger gemäß § 61 gilt anteilig auch für den selbst erzeugten und selbst genutzten Strom von BHKW und PV-Anlagen. Dieser Anteil beträgt bei Eigenverbrauch aus neuen Erzeugungsanlagen (Inbetriebnahme ab 01.08.2014):

- 30 % der jeweils aktuellen EEG-Umlage vom 31.7.2014 bis 31.12.2015
- 35 % der jeweils aktuellen EEG-Umlage vom 01.01.2016 bis 31.12.2016
- 40 % der jeweils aktuellen EEG-Umlage ab 01.01.2017
- 100 % der jeweils aktuellen EEG-Umlage, wenn die Stromerzeugung weder aus erneuerbaren Energien noch aus hocheffizienten KWK-Anlagen stammt.

Letzteres gilt vor allem dann, wenn in den Bestandsanlagen in größerem Umfang Strom aus Erdgas erzeugt wird.



IMPRESSUM

Herausgeber:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart
www.um.baden-wuerttemberg.de



Bearbeitung:

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. H. Steinmetz, Dipl.-Ing. T. Reinhardt, Dr.-Ing. J. Gasse, Dipl.-Ing. C. Meyer
Bandtäle 2, 70569 Stuttgart
www.iswa.uni-stuttgart.de



iat-Ingenieurberatung GmbH
Dr.-Ing. W. Maier, Dr. rer. nat. B. Poppe
Friolzheimer Straße 3A, 70499 Stuttgart
www.iat-stuttgart.de



Weber-Ingenieure GmbH
Dr.-Ing. P. Baumann, Dr.-Ing. T. Morck
Bauschlötter Straße 62, 75177 Pforzheim
www.weber-ing.de



Wuppertalverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH
Dr.-Ing. G. Kolisch, Dipl.-Ing. Y. Taudien
Untere Lichtenplatzer Straße 100, 42289 Wuppertal
www.wiwmbH.de

Gestaltung:

Werbeagentur planB GmbH
Melanchthonstraße 34, 75015 Bretten

Bildnachweis:

Fotos: Weber-Ingenieure GmbH
Bauschlötter Straße 62, 75177 Pforzheim

Titelbild: KA Lomersheim; Inhaltsverzeichnis: HKW Stuttgart-Mühlhausen;
Abkürzungsverzeichnis: KA Deißlingen-Mittelhardt; Seite 2: KA Forchheim;
Seite 3: KA Todtnau; Seite 4: KA Jagst-Kessach; Seite 5: KA Untere Hardt;
Seite 14: Blasenbild; Seite 16: KA Friedrichshafen; Seite 22/23: KA Wolfschlugen;
Seite 24: KA Magstadt; Seite 32: KA Obrigheim; Seite 33/47: KW Pforzheim;
Seite 35: KA Stein a. K.; Seite 36: KA Lahr; Seite 38: HKW Stuttgart-Mühlhausen;
Seite 40: KA Neuschöntal

Druck:

e.kurz+co druck und medientechnik GmbH
Kernerstraße 5, 70182 Stuttgart

Bezug:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Kernerplatz 9, 70182 Stuttgart
www.um.baden-wuerttemberg.de

Stand:

Oktober 2015

Auflage:

1.000 Exemplare



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT