



**Arbeitshilfe zur
Verbesserung der Energieeffizienz
von Abwasserbehandlungsanlagen**

**Anforderungen an die Planung
und Durchführung**

Herausgeber: Hessisches Ministerium für Umwelt,
Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Mainzer Str. 80
65189 Wiesbaden
Tel.: 0611 / 815 1301
Fax: 0611 / 815 1941

Bearbeitung: Technische Hochschule Mittelhessen
Zentrum für Energie- und Umweltsystemtechnik (ZEuUS)
Fachbereich Bauwesen
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und anaerobe Verfahrenstechnik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
Prof. Dr.-Ing. Ulf Theilen
Tel.: 0172 511 8256
Fax: 0641 309 2964
E-Mail: ulf.theilen@bau.thm.de

www.hmuelv.hessen.de

- Umwelt
- Gewässerschutz
- Kommunales Abwasser
- Energieeffizienz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Systemgrenzen und grundsätzliches Vorgehen	7
3	Leistungen des Auftraggebers / Betreibers	10
3.1	Zusammenstellung der erforderlichen Daten	10
3.2	Kriterien für fachlich geeignete Bearbeiter und Auswahl des zu beauftragenden Ingenieurbüros	12
3.3	Beauftragung der Energieeffizienzanalyse.....	12
4	Durchführung der Energieeffizienzanalyse, Leistung des Auftragnehmers	14
4.1	Allgemeines.....	14
4.2	Plausibilitätsprüfung der Daten	15
4.3	Anlagenbegehung	15
4.4	Aufnahme des Ist-Zustandes.....	15
4.4.1	Nachrechnung der Kläranlage	15
4.4.2	Bilanzierung des Elektrizitätsverbrauchs	16
4.5	Bewertung des Ist-Zustandes	17
4.6	Vorschläge für einen ersten Maßnahmenkatalog.....	17
4.7	Besprechung der Zwischenergebnisse	18
4.8	Einzelmaßnahmen.....	18
4.9	Bündelung zu Maßnahmenpaketen	18
4.10	Endbericht und Präsentation.....	19
5	Beurteilung der energetischen Effizienz	20
5.1	Beurteilungskriterien zur energetischen Bewertung	21
5.1.1	Anlagenspezifische Korrekturwerte.....	23
5.1.2	Gesamtelektrizitätsverbrauch der Kläranlage (e_{ges}).....	24
5.1.3	Elektrizitätsverbrauch der Belüftung (e_B).....	25
5.1.4	Elektrizitätsverbrauch der Pump- und Hebewerke (e_{PW})	25
5.1.5	Energetische Faulgasnutzung	26
5.1.6	Elektrischer Wirkungsgrad der Faulgasverwertung (η_{elek})	27
5.1.7	Spezifische Faulgasproduktion ($V_{Faulgas\ oTR}$) bzw. ($V_{Faulgas\ EW}$)	28

5.1.8	Eigenversorgungsgrade (EV_{elek}), (EV_{th}).....	29
5.2	Erläuterung und Dokumentation der Kennwerte (Toleranz- und Zielwert).....	30
6	Exemplarische Optimierungsmaßnahmen	35
6.1	Allgemeines, Randbedingungen	35
6.2	Abwasseranfall	35
6.3	Hebe- und Pumpwerk.....	37
6.4	Rechenanlage	38
6.5	Sand- und Fettfang.....	39
6.6	Vorklärung.....	39
6.7	Belebung	39
6.8	Nachklärung	43
6.9	Schlammbehandlung.....	44
6.10	Prozesswasserbehandlung.....	45
6.11	Prozessoptimierung.....	45
6.12	Besondere Ablaufanforderungen	46
6.13	Energielieferverträge	46
7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	47
7.1	Kosten-Nutzen-Analyse	47
7.2	Projektkostenbarwert.....	49
7.3	Sensitivitätsanalyse	50
	Literatur.....	51
A.	Erfassung der Basisdaten.....	52
B	Aggregatliste.....	59

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Charakterisierung von Energiesparmaßnahmen mit unterschiedlichen Realisierungshorizonten.....	19
Tab. 2: Beurteilungskriterien zur energetischen Bewertung einer Kläranlage zusammengestellt aus Haberkern et al. (2008), LfU (1998) und Müller et al. (1999).....	21
Tab. 3: Einwohnerspezifische Frachten nach ATV-DWVK A 131 (ATV-DWVK, 2000).....	22
Tab. 4: Erfahrungswerte zum Schlammanfall in kommunalen Kläranlagen (Haberkern et al., 2008)	22
Tab. 5: Korrekturwerte für die Berechnung von e_{ges} und e_B bei besonderen anlagenspezifischen Randbedingungen (Baumann und Roth (2008), Haberkern (2008) und eigene Daten).....	24
Tab. 6: Beurteilungskriterien und Kennwerte zur Bewertung der energetischen Situation einer Kläranlage [verändert nach (Haberkern et al., 2008; LfU, 1998; Müller et al., 1999)]	34
Tab. 7: Zielwerte für den Wirkungsgrad und den spezifischen Elektrizitätsverbrauch von Pumpen auf Kläranlagen (Baumann und Roth, 2008)	37
Tab. 8: Zielwerte für die Leistungsdichte von Rührwerken (W / m^3) in Belebungsbecken (Baumann und Roth, 2008)	41
Tab. 9: Bildung von Maßnahmenpaketen nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis der Einzelmaßnahmen	49
Tab. 10: Szenarien für eine Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsberechnung	50

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Systemgrenze der Energieeffizienzanalyse	7
Abb. 2: Ablauf der Arbeitsschritte bei einer Energieeffizienzanalyse.....	9
Abb. 3: Energieverbrauch im bundesweiten Bestand der Kläranlagen nach Größenklassen (Haber Kern et al., 2008).....	31
Abb. 4: Statistische Auswertung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanla- gen in Baden-Württemberg, DWA-Leistungsvergleich (Haber Kern et al., 2008).....	32
Abb. 5: Exemplarische prozentuale Verteilung des Energieverbrauchs einer Kläranlage (25.000 EW) mit simultaner aerober Schlammstabilisierung.....	35
Abb. 6: Anpassung des TS Gehaltes im Belebungsbecken an die Abwassertemperatur (qualitativ).....	43

1 Einleitung

Unter der Effizienz (v. lat.: *efficere* „zustande bringen“) versteht man das Verhältnis eines in definierter Qualität vorgegebenen Ziels zu dem Aufwand, der zur Erreichung dieses Ziels nötig ist. Die Effizienz beschreibt dabei das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen (DIN, 2005)

Effizienz bewertet die Angemessenheit einer verfolgten Maßnahme im Sinne einer Aufwand / Nutzen-Relation. Die Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen entspricht dem Verhältnis zwischen dem erreichten Reinigungsziel und der dafür eingesetzten Energie.

Die Energieeffizienzanalyse ermittelt, nach definierter Vorgehensweise, das Einsparpotenzial und schlägt ggf. Maßnahmen zur Energieeinsparung und / oder Steigerung der Energieeigenproduktion vor. Alle Einsparmaßnahmen müssen unter der Prämisse durchgeführt werden, dass die gesetzlich vorgeschriebene oder eine im Bescheid festgelegte weitergehende Reinigungsleistung eingehalten wird.

Die Anforderungen in dieser Arbeitshilfe richten sich an Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen und deren Berater (Ingenieurbüro), die mittels dieser Anleitung bei der Vorbereitung, Beauftragung und Durchführung von Energieeffizienzanalysen unterstützt werden.

Im Interesse des Betreibers, der Kunden und der Ressourcenschonung ist eine nachhaltige Vorgehensweise erforderlich, bei der die erforderliche Reinigungsleistung mit möglichst geringem Energieaufwand bewerkstelligt wird und die eigenen Energieressourcen möglichst vollständig und hochwertig genutzt werden. Durch eine Effizienzsteigerung wird die ökonomische Situation der Abwasserreinigungsanlage verbessert, wobei die ökologische Situation, also vor allem die erreichte Ablaufqualität nicht verschlechtert werden darf.

Ziel der Anforderungen ist es, einheitliche Standards für die Beauftragung und Durchführung von Effizienzanalysen zu setzen. Damit soll zum einen die Vereinfachung der Beauftragung erreicht werden, zum anderen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. Es werden die durchzuführenden Arbeitsschritte definiert und standardisiert.

- Systemgrenzen
- Datenaufnahme
- Beurteilung der Effizienz
- Optimierungsmaßnahmen
- Wirtschaftlichkeit

Das detaillierte Vorgehen bei der Vergabe der Energieeffizienzanalysen wird jedoch immer spezifisch angepasst werden müssen und muss den jeweils gültigen Vergaberichtlinien genügen. Wichtig für einen Vergleich einzelner Anlagen ist die hier definierte, einheitliche Datenaufnahme und Bewertung.

2 Systemgrenzen und grundsätzliches Vorgehen

Die Analyse erfolgt auf Basis einer energetischen Analyse, in der die aufgewendete Energie auf die zu reinigende Schmutzfracht bezogen wird (kWh / (EW · a)). Die Optimierungsmaßnahmen werden in Form einer monetären Kosten- / Nutzenanalyse nach (LAWA, 2005) bewertet. In dieser werden die Aufwendungen für die energetische Optimierung und die laufenden Kosten für deren Unterhalt mit der jetzigen Situation verglichen. Weitere Wirkungskategorien (Treibhauseffekt, Versauerung etc.), wie sie etwa im Rahmen einer Ökobilanz aufgestellt werden, werden bewusst nicht betrachtet, um den Aufwand vertretbar zu halten.

Diese Studie befasst sich im Schwerpunkt mit Belebungsverfahren. Die aufgestellten Kennwerte gelten in erster Linie für diese Anlagen. Alternative Verfahren werden angesprochen jedoch nicht mit individuellen Kennwerten versehen.

Um eine einheitliche Bewertung vornehmen zu können, werden Systemgrenzen definiert. Die energetische Betrachtung beginnt am Zulauf der Kläranlage mit einem möglichen Hebewerk und endet mit der Abgabe des gereinigten Wassers in den Vorfluter, bzw. schlammseitig mit der Schlammbehandlung (inkl. Schlammwässerung und ggf. -trocknung). Aufwendungen im Kanalnetz sowie die weitere Verwertung / Entsorgung des Klärschlammes (landwirtschaftlich, thermisch etc.) werden nicht betrachtet.

Den Aufwendungen wird eine mögliche Energiebereitstellung aus den primären Aufgaben der Abwasserbehandlung gegenübergestellt. Dies trifft für die Nutzung des bei der anaeroben Schlammstabilisierung produzierten Faulgases zu. Andere Möglichkeiten der Erzeugung von erneuerbarer Energie auf Abwasserbehandlungsanlagen wie z.B. Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft oder die Abwärmenutzung aus Abwasser stellen interessante Ansätze dar, sind jedoch kein integraler Bestandteil der Abwasserreinigung und werden daher hier nicht betrachtet.

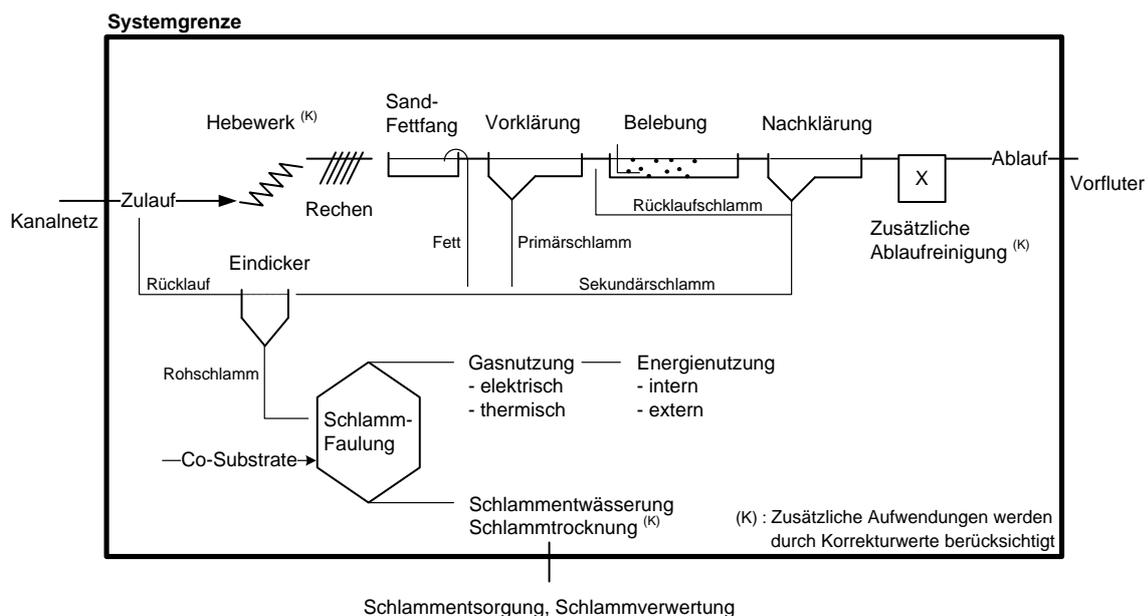


Abb. 1: Systemgrenze der Energieeffizienzanalyse

Die Annahme und Behandlung von Co-Substraten in den Faulbehälter von Abwasserbehandlungsanlagen wird mit in die Energieeffizienzanalyse einbezogen, sofern vorhandenes Faulraumvolumen dadurch effizienter genutzt werden kann. Die Co-Fermentation stellt unter Umständen eine Möglichkeit der umweltgerechten Energieerzeugung durch Nutzung der bestehenden Anlagentechnik dar. Die durch Co-Substrate in die Faulbehälter eingetragene organische Masse (oTR-Fracht) sowie die hierdurch erzeugte Faulgasmenge werden in der Energieeffizienzanalyse berücksichtigt.

Um die für einzelne Kläranlagen ermittelten Energieverbräuche und Energiebereitstellungen zu bewerten, werden Kennwerte herangezogen. Diese Richt- und Idealwerte (Müller et al., 1999) oder Toleranz- und Zielwerte (Haberkern et al., 2008; LfU, 1998) stellen die „Messlatte“ dar.

Ideal- oder Zielwerte stellen weder Grenzwerte noch die minimal erreichbaren Werte dar, sondern lediglich ein unter guter Betriebsweise, Anlagenauslastung und Verfahrenswahl (Stand der Technik) zu erzielendes Betriebsergebnis. Unter optimalen Bedingungen lassen sich auch diese Ideal- oder Zielwerte noch unterschreiten.

Ein gewisser Toleranzbereich, der Anlagen nahe des „Ziels“ bzw. „Ideals“ umfasst, wird durch die zusätzliche Definition von Richtwerten (Müller et al., 1999) bzw. Toleranzwerten (Haberkern et al., 2008; LfU, 1998) festgelegt.

Im Rahmen dieser Anforderungen werden die Begrifflichkeiten aus Haberkern et al. (2008) und LfU (1998) verwendet:

- Zielwert
- Toleranzwert

Diese Kennwerte beziehen sich auf durchschnittliche Randbedingungen hinsichtlich Zulaufmenge, Schmutzfracht, Abwasserzusammensetzung, Topographie etc. Häufig anzutreffende Besonderheiten mit Auswirkungen auf den Energieverbrauch werden durch Korrekturwerte berücksichtigt. Nicht durch Korrekturwerte erfasste Besonderheiten müssen im konkreten Einzelfall in die Energieeffizienzanalyse einbezogen werden.

Der organisatorische und zeitliche Ablauf bei der Durchführung von Energieeffizienzanalysen sowie der Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz ist in Abb. 2 dargestellt und sollte möglichst eingehalten werden.

Eine Energieeffizienzanalyse kann in der Regel nicht über einen Pauschalbetrag abgerechnet werden, da der tatsächliche Aufwand erst im Laufe der Untersuchung ersichtlich wird. Es empfiehlt sich daher eine modulare Vertragsgestaltung, die auch einen möglichen Abbruch (bei geringem Einsparpotenzial) nach der Zwischenbesprechung ermöglicht.

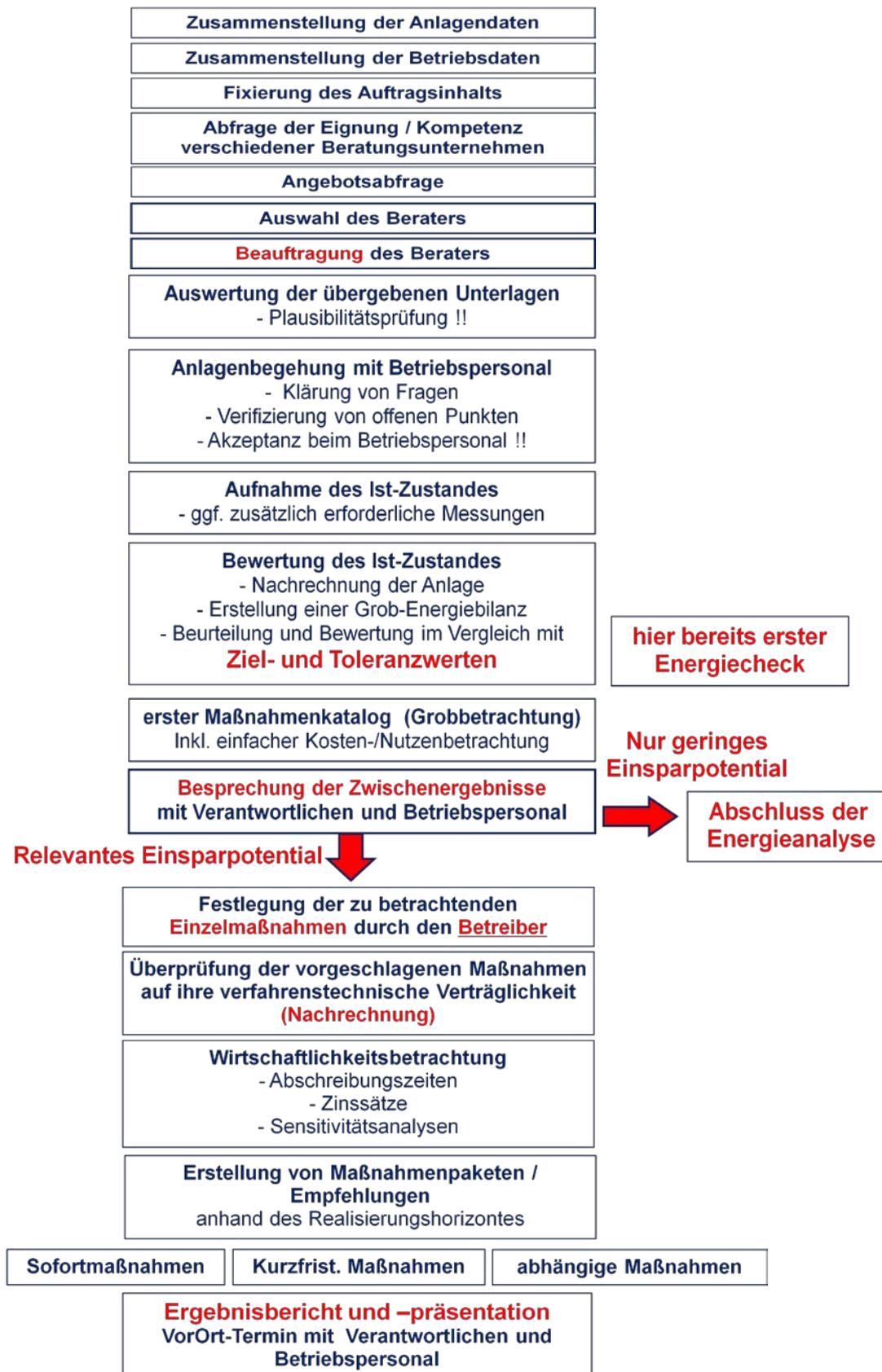


Abb. 2: Ablauf der Arbeitsschritte bei einer Energieeffizienzanalyse

3 Leistungen des Auftraggebers / Betreibers

3.1 Zusammenstellung der erforderlichen Daten

Entscheidend für den Erfolg der Energieeffizienzanalyse sind die Qualität der Datengrundlage und die genaue Dokumentation des Ist-Zustandes. Die Aufgabe des Auftraggebers besteht darin, dem Auftragnehmer einen umfassenden Einblick in die zu betrachtende Kläranlage zu liefern. Nur wenn der Auftragnehmer verlässliche und detaillierte Daten zur Verfügung hat, ist eine schnelle und erfolgreiche Erstellung der Analyse zu realisieren.

Für die Erfassung der Einzeldaten sollte das Datenblatt „Basisdaten“ (Anhang A) verwendet werden. Die Aggregatliste ist entsprechend Anhang B anzufertigen.

Die vom Auftraggeber bereitzustellenden Unterlagen und Daten sind im Folgenden aufgeführt. In der Praxis werden nicht immer alle wünschenswerten Unterlagen und Daten zur Verfügung stehen. In Abstimmung zwischen Auftraggeber und –nehmer wird der tatsächliche Umfang bestimmt. Der Umfang von durch den Auftragnehmer zusätzlich zu erfassenden Daten ist zu definieren.

Verfahrenstechnik:

- Entwurfsunterlagen (Bemessung)
- Bestandsunterlagen
 - Verfahrensschemata (Bestand)
 - R+I-Schemata (Bestand)
 - Baupläne
 - hydraulische Längsschnitte
 - Klärschlamm Entsorgungskonzept
- Bereits geplante Änderungen:
 - Umbaumaßnahmen
 - Betriebsumstellungen
 - Änderungen bei Abwassermenge und -qualität
- Detaillierte Angaben zur E-MSR-Technik
 - NSHV, Unterverteilungen
 - eingesetztes Prozessleitsystem
 - SPS
 - Regelalgorithmen

Betriebsdaten:

- Versorgungsverträge (EVU, Heizöl, Gas)
- Energie- und Betriebsmittelverbräuche
- Wärmebedarf
 - Gebäude (ggf. Angaben zur Bautechnik, Wandaufbau)
 - Faulung (Angaben zum Wandaufbau des Faulbehälters)

- Betriebsdaten / Betriebstagebuch / EKVO-Berichte
 - Zulaufbelastung (Menge, CSB, BSB₅, N, P)
 - Ablaufkonzentrationen
 - interne und externe Analysendaten
 - TS-Gehalte im Belebungsbecken, Rücklaufschlamm, Überschussschlamm
 - O₂-Konzentrationen im Belebungsbecken
 - Schlammengen und Rücklaufverhältnisse (Primär-, Rücklauf-, Überschussschlamm)
- Faulgasproduktion
 - Menge, Zusammensetzung, Nutzung
 - TR-Konzentration und oTR-Fracht im Zulauf des Faulbehälters
 - Hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung
 - Aggregate zur Faulgas-Nutzung, Feuerungsleistung bzw. elektrische und thermische Leistung
 - Wirkungsgrade der Aggregate zur Faulgasnutzung (elektrisch, thermisch)
 - Erzeugung von Eigenenergie (Elektrizität, Wärme)

Aggregatliste

- Liste der wichtigsten Verbraucher und Antriebe
 - Leistungsaufnahme
 - Stromaufnahme
 - Spannung
 - $\cos \varphi$
 - Alter
 - Betriebsstunden
 - Auflistung von Verbrauchszählern

Anlagenbegehung

- Der Auftraggeber führt zusammen mit dem Auftragnehmer eine Anlagenbegehung durch. Dabei ist seitens des Auftraggebers das Betriebspersonal einzubeziehen.
- Besichtigung der relevanten Energieverbraucher, Zustand und Mängel
- Besichtigung der Aggregate zur Energieerzeugung, Zustand und Mängel
- Klärung der Notwendigkeit und Möglichkeit von zusätzlichen Verbrauchsmessungen

Die vom Auftraggeber bereitgestellten Daten und Unterlagen müssen den Auftragnehmer befähigen, den Zustand der Anlage zu bewerten und die Auswirkung von Optimierungsmaßnahmen auf den Betrieb vorherzusehen. Dementsprechend ist eine hohe Datenqualität erforderlich.

Die Betriebsdaten sollten in auswertbarer elektronischer Form (MS Excel o.ä.) vorliegen. Ist dies nicht der Fall, muss der Mehraufwand für den Auftragnehmer vertraglich geregelt werden.

3.2 Kriterien für fachlich geeignete Bearbeiter und Auswahl des zu beauftragenden Ingenieurbüros

Die energetische Analyse einer Kläranlage muss von Fachleuten durchgeführt werden, die über weitreichende Kenntnisse in den Bereichen Energie- und Abwassertechnik verfügen. Im Rahmen der Entscheidung für eine Auftragsvergabe sind vom potentiellen Auftragnehmer ausreichende Erfahrungen in den folgenden Bereichen nachzuweisen:

- Siedlungswasserwirtschaft
- mechanische und biologische Abwasserreinigung
- Schlammbehandlung
- Aggregatetechnik
- Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR)
- Energietechnik
- Reststoffverwertung / -entsorgung

Da keine Zertifizierung bzw. Zulassung für die Durchführung von Energieeffizienzanalysen existiert, muss sich der Auftraggeber an folgenden Angaben bzw. Unterlagen der Anbieter orientieren:

- Referenzlisten
- Detaillierte Angaben zu Kenntnissen und Erfahrungen in den o.g. Bereichen

Können die geforderten detaillierten Angaben nicht vorgelegt werden, sollte der Auftraggeber von einer Beauftragung absehen. Unter Umständen kann ein Anbieter, der nicht über sämtliche Anforderungen verfügt, durch eine Kooperation Kompetenzen bündeln und sich dadurch qualifizieren.

Vor Auftragsvergabe sollten verschiedene Anbieter angefragt werden, deren Angaben bzw. Unterlagen zu den o.g. Bereichen genau geprüft und gegenübergestellt werden sollten. Das Vergaberecht ist zu beachten.

3.3 Beauftragung der Energieeffizienzanalyse

Im Folgenden wird ein standardisiertes Vorgehen bei der Beauftragung einer Energieeffizienzanalyse auf Abwasserbehandlungsanlagen beschrieben. Damit wird zum einen den Betreibern eine Hilfestellung bei der Durchführung und der vertraglichen Fixierung geboten, zum anderen die Grundlage für die Vergleichbarkeit von Energieeffizienzanalysen geschaffen.

Der Auftrag zur Energieanalyse umfasst folgende Teilbereiche:

Leistungen / Aufgaben des Auftragnehmers

1. Plausibilitätskontrolle der zur Verfügung gestellten Daten und Unterlagen
2. Aufnahme der Ist-Situation
 - a. Nachrechnung der Kläranlage
 - b. Bilanzierung des Energieverbrauchs, gegebenenfalls Energieverbrauchsmessungen einzelner Aggregate.
3. Beurteilung der energetischen Ist-Situation der Kläranlage, Vergleich mit den Toleranz- und Zielwerten. Auflistung möglicher Maßnahmen zur Energieeinsparung.
4. Vorschläge für einen ersten Maßnahmenkatalog zur Effizienzsteigerung. Kosten- / Nutzenanalyse der Maßnahmen.
5. Besprechung der Zwischenergebnisse und anschließende Entscheidung des Auftraggebers über das weitere Vorgehen. Bei keinem oder nur geringem Einsparpotenzial kann die Energieeffizienzanalyse an dieser Stelle beendet werden. Hierbei ist zu beachten, dass in der Regel auch bei gut geführten Anlagen noch Potentiale ungenutzt sind.
6. Erarbeitung von Einzelmaßnahmen zur Verbesserung der Energiesituation, Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die erarbeiteten Maßnahmen (Vergleich der Projektkostenbarwerte).
7. Bündelung der Einzelmaßnahmen zu Maßnahmenpaketen mit gleichem Realisierungshorizont, Prognose der energetischen Situation nach Abschluss der einzelnen Maßnahmenpakete.
8. Endbericht und Ergebnispräsentation.

Die Auftragsvergabe sollte in zwei Module unterteilt sein. Zuerst ist der Teil bis zur Zwischenbesprechung (Nr. 5) freizugeben. Nach Besprechung der Zwischenergebnisse und der Feststellung von Optimierungspotenzial dann der zweite Auftragsteil.

4 Durchführung der Energieeffizienzanalyse, Leistung des Auftragnehmers

4.1 Allgemeines

Die Analyse der energetischen Situation einer Abwasserbehandlungsanlage wird ausführlich im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ (Müller et al., 1999) beschrieben und ist vielfach bewährt. Das dort beschriebene Vorgehen wurde hier als Grundlage verwendet. Die dort verwendete Methodik von Grobanalyse und darauf aufbauender Feinanalyse hat sich jedoch in vielen Fällen als zu aufwändig erwiesen. Daher wird hier auf das Erstellen einer Grobanalyse verzichtet und dafür nach erster Aufnahme und Beurteilung des Ist-Zustandes im Rahmen einer Ergebnisbesprechung die Einzelheiten des weiteren Vorgehens festgelegt bzw. bei geringem Einsparpotenzial die Energieeffizienzanalyse abgeschlossen.

Die Zuhilfenahme von externem Sachverstand ist ein entscheidender Erfolgsfaktor bei der Energieeffizienzanalyse. Dadurch können Lösungsansätze erkannt werden, die im Alltagsgeschäft häufig verborgen bleiben. Zudem wird durch den Blick von außen die gewachsene Struktur einer Abwasserbehandlungsanlage besser durchleuchtet. Wichtig ist dabei immer die Zusammenarbeit von Externen und Internen, um das Betreiberwissen und den externen Überblick zusammenzubringen sowie die Akzeptanz für mögliche Veränderungen zu erhöhen. Von besonderer Bedeutung ist die Einbeziehung des Betriebspersonals der Kläranlage vor Ort.

Ziel der Energieeffizienzanalyse ist es, dem Betreiber eine Entscheidungsgrundlage für den weiteren energieoptimierten Betrieb der Kläranlage zu liefern; dabei wird aus Kostengründen der Elektrizitätsverbrauch und nur nachgeordnet der Wärmeverbrauch betrachtet.

Es werden neben Sofortmaßnahmen auch kurzfristig zu realisierende und sog. abhängige Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht und die einzelnen Verbraucher und Verfahrenskonzepte detailliert betrachtet.

Damit die Energieeffizienzanalyse ihren Zweck als Planungswerkzeug und Entscheidungsgrundlage erfüllen kann, müssen die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einer Genauigkeit von mindestens 20 % angefertigt werden. Die Energieeffizienzanalyse ist als Vorplanung zu verstehen und enthält daher keine Anleitung zur Durchführung und keine Vorschläge zum Erwerb bestimmter Produkte. Es werden Maßnahmen (vgl. Kapitel 6) zur Steigerung der Energieeffizienz beschrieben. Diese Maßnahmen müssen auf die Randbedingungen der jeweiligen Abwasserbehandlungsanlage abgestimmt sein.

Die einzelnen Arbeitspakete des Auftragnehmers und deren Reihenfolge werden in diesem Kapitel definiert. Diese sind bei einer Beauftragung detailliert vertraglich festzulegen.

4.2 Plausibilitätsprüfung der Daten

Die vom Auftraggeber zusammengestellten Betriebsdaten und Unterlagen sind auf Vollständigkeit und Plausibilität zu prüfen. Die Einwohnerwerte sind aus allen zur Verfügung stehenden Informationen über Zulauffrachten zu bestimmen, zusätzlich sind die Daten zum Klärschlammfall (Kapitel 5.1.) zu berücksichtigen. Unstimmigkeiten bei den aus den verschiedenen Zulauffrachten ermittelten Einwohnerwerten sind zu untersuchen (einseitige Belastung durch Industrieabwasser, hoher Fremdwasseranteil, Analysefehler) und in der Auswertung zu dokumentieren. Bei zusätzlicher, anlagenspezifischer Belastung der Kläranlage ist dies bei der Berechnung der Kennwerte zu berücksichtigen (Kapitel 5.2)

Eine unzureichende Datenlage zum Energieverbrauch relevanter Aggregate kann zusätzliche Verbrauchsmessungen erforderlich machen. Eine Abstimmung über solche Messungen erfolgt am sinnvollsten bei der gemeinsamen Anlagenbegehung, dabei können vor Ort die Möglichkeiten erörtert werden.

4.3 Anlagenbegehung

Nach der Prüfung der Daten wird eine Anlagenbegehung durchgeführt. Bei der Anlagenbegehung ist das Betriebspersonal mit einzubeziehen. Im Rahmen der Anlagenbegehung ist weiterhin auf allgemeine und energetische Mängel hinzuweisen sowie ggf. die Installation von zusätzlicher Messtechnik zu erörtern und anschließend zu veranlassen.

Die Beteiligten seitens des Auftragnehmers müssen über das in Kapitel 3.2 definierte Fachwissen verfügen. Seitens des Betreibers ist neben den Verantwortlichen das mit dem Betrieb der Anlage unmittelbar betraute Personal einzubeziehen.

Gegebenenfalls kann im weiteren Verlauf der Analyse eine weitere Anlagenbegehung nötig werden.

4.4 Aufnahme des Ist-Zustandes

Die Aufnahme des IST-Zustandes ist für die im Kapitel 5.1 definierten Beurteilungskriterien durchzuführen. Bei der Ermittlung der Kennwerte sind ggf. die dort aufgestellten Korrekturwerte zu berücksichtigen. Anlagenspezifische Erschwernisse, die nicht durch die vordefinierten Korrekturwerte erfasst werden, müssen argumentativ berücksichtigt werden. Alle Berechnungen sind nachvollziehbar darzustellen.

4.4.1 Nachrechnung der Kläranlage

Die gesamte Abwasserbehandlungsanlage ist bezüglich ihrer Schmutzfrachten nachzurechnen. Mittels Bemessungssoftware ist die aktuelle Situation der betrachteten Abwasserbehandlungsanlage durchzurechnen, die Ergebnisse sind mit dem baulichen IST-Zustand zu vergleichen.

Die Hydraulik der Abwasserbehandlungsanlage ist zu betrachten und zu bewerten. Bei zu erwartendem Optimierungspotenzial ist die Abwasserbehandlungsanlage hydraulisch nachzurechnen. Wird die Nachrechnung der Hydraulik nicht durchgeführt, ist dies zu begründen.

4.4.2 Bilanzierung des Elektrizitätsverbrauchs

Ziel der Bilanzierung ist es, den Elektrizitätsverbrauch einzelnen Verbrauchern zuzuordnen. Dadurch wird zum einen ein mögliches Einsparpotential der Einzelaggregate aufgezeigt, zum anderen können „versteckte“ Verbraucher aufgedeckt werden.

Der Schwerpunkt ist auf die Hauptverbraucher zu legen. Das Ziel ist die Optimierungsarbeit. Daher darf die Aufnahme aller Energieverbraucher bis ins Detail nicht zu viele Ressourcen binden. Die Verbräuche der relevanten Aggregate sollten möglichst durch Messungen belegt sein. Bei kleineren Verbrauchern genügen Hochrechnungen und Schätzungen. Für eine möglichst „lückenlose Bilanz“ sollte mindestens 90 % des Energieverbrauchs einzelnen Aggregaten zugeordnet werden können.

Der mit Abstand größte Verbraucher an elektrischer Energie auf einer Kläranlage ist im Regelfall die Belebung. Belüftung und Umwälzung des Belebungsbeckens sind meist für mehr als 50 % des Gesamtverbrauches verantwortlich. Neben diesem Hauptverbraucher gibt es noch eine Vielzahl weiterer Verbraucher. Eine getrennte Erfassung der Stromverbräuche einzelner Verfahrensstufen oder Aggregate findet jedoch meistens nur auf Großanlagen statt, auf kleineren Anlagen wird lediglich ein Hauptzähler verwendet. Um den spezifischen Elektrizitätsverbrauch einzelner Aggregate und Gruppen zu erfassen, gibt es mehrere Möglichkeiten, die im Folgenden nach (Baumann und Roth, 2008) aufgeführt werden:

- Direkte Messung des Stromverbrauchs über einen repräsentativen Zeitraum
- Kurzzeitmessung der elektrischen Leistungsaufnahme
- Überschlägige Berechnung des Stromverbrauchs
- Differenzbildung zu Gruppenzählern
- Multiplikation der Betriebsstunden mit der Leistung (220 / 230 V oder 380 / 400 V Wechselstrom)

Ist kein separater Verbrauchszähler installiert, kann alternativ eine vorübergehende Messung durchgeführt werden. Diese Messung mittels Drehstromzähler muss jedoch über einen ausreichend langen und repräsentativen Zeitraum erfolgen. Im Hinblick auf weitere Optimierungen und die Erfolgskontrolle der durchgeführten Maßnahmen empfiehlt sich der Einbau fester Stromzähler zumindest an den Hauptverbrauchern.

Sind lediglich Kurzzeitmessungen durchführbar, kann mit einer Leistungsmesszange der Verbrauch einzelner Drehstromaggregate ermittelt werden. Der Stromverbrauch berechnet sich aus der Wirkleistung und den Betriebsstunden, bei Aggregaten mit abgestufter Drehzahl sind die jeweiligen Betriebsstunden zu erfassen. Der Verbrauch von stufenlos geregelten Antrieben ist durch die Bestimmung der mittleren Leistungsaufnahme über einen repräsentativen Zeitraum zu ermitteln, mit entsprechenden Unsicherheiten ist zu rechnen.

$$W = P_W * t_B$$

W: Stromverbrauch des Aggregates [kWh / a]

P_W: Wirkleistung [kW]

t_B: Betriebsstunden [h / a]

Eine überschlägige Ermittlung des Stromverbrauchs ist zudem mittels Messung der Stromstärke möglich. Diese Methode ist mit großen Unsicherheiten behaftet und die Ergebnisse sind dementsprechend zu bewerten. Bei stufenlos geregelten Aggregaten ist die Stromstärke vor dem Frequenzumrichter (FU) zu messen, der ermittelte Strombedarf bezieht sich dann auf das Aggregat und den FU. Die Leistungsaufnahme kann nach folgender Formel errechnet werden.

$$P_W = U * I * \sqrt{3} * \cos \varphi$$

P_W: Wirkleistung [kW]

U: Spannung [kV], üblicherweise 0,4 kV

I: Stromstärke [A]

cosφ: Wirkleistungsfaktor des jeweiligen Antriebs (siehe Typenschild bzw. Unterlagen)

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung des Stromverbrauches einzelner geregelter Aggregate bietet sich bei Gruppenzähler für einzelne Bereiche. Durch Differenzbildung zwischen dem Gruppenverbrauch und dem Verbrauch von Aggregaten mit konstanter Leistungsaufnahme kann der gesuchte Einzelverbrauch ermittelt werden.

Relativ einfach kann der Verbrauch in Labor- und Verwaltungsgebäuden ermittelt werden. Die dortigen Verbraucher werden in der Regel mit 220 / 230 V Wechselstrom betrieben, daher kann durch Multiplikation der jeweiligen Leistungsaufnahme mit den entsprechenden Betriebsstunden der betreffende Stromverbrauch bestimmt werden.

4.5 Bewertung des Ist-Zustandes

Die Aufnahme des energetischen Ist-Zustandes wurde in Kapitel 4.4 beschrieben. Durch den Vergleich mit den in Kapitel 5.2 aufgeführten Kennwerten (Ziel- und Toleranzwert) können die Haupteinsparbereiche aufgezeigt werden. Unter Umständen ist jedoch auch an anderer Stelle noch Potenzial vorhanden.

4.6 Vorschläge für einen ersten Maßnahmenkatalog

Anhand der durch den Vergleich mit den Kennwerten aufgezeigten Bereiche mit erhöhtem Einsparpotenzial und den durch die Anlagenbegehung und den Austausch mit dem Betriebspersonal erzielten Erkenntnissen werden durch den Auftragnehmer mögliche Optimierungsmaßnahmen erarbeitet.

Eine Maßnahme zur Optimierung der energetischen Situation bedarf immer auch einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Im Rahmen dieser frühen Phase der Analyse geschieht dies durch einen Vergleich der Kosten und Nutzen (vgl. Kapitel 7.1). Hierzu müssen die Kosten von Alternativen abgeschätzt werden.

Die möglichen Einsparungen durch Realisierung der Einzelmaßnahmen sind aufzuzeigen. Es sind sowohl die energetischen (kWh / a) als auch die monetären Einsparungen (€/ a) zu benennen. Die Berechnung muss nachvollziehbar dargestellt werden.

Es kommen nur Maßnahmen in Betracht, die zu keiner nachteiligen Beeinflussung der bisherigen Leistungsfähigkeit der Abwasserbehandlung oder der Restbelastung im Ablauf der Anlage führen.

4.7 Besprechung der Zwischenergebnisse

Die Bewertung des Ist-Zustandes und der erste Maßnahmenkatalog werden in einer Zwischenbesprechung dem Auftraggeber vorgestellt, sie sind zudem schriftlich festzuhalten. Wird lediglich geringer Optimierungsbedarf festgestellt, kann die Analyse an diesem Punkt abgeschlossen werden. In der Regel werden aber zumindest einzelne Bereiche mit Handlungsbedarf identifiziert werden.

Um die Ressourcen möglichst auf vielversprechende Optimierungsmaßnahmen zu fokussieren, werden die vorgeschlagenen Maßnahmen im Rahmen der Zwischenbesprechung mit dem Auftraggeber erörtert. Dieser entscheidet über näher zu betrachtende Maßnahmen.

4.8 Einzelmaßnahmen

Aufbauend auf der Zwischenbesprechung nach der Aufnahme des Ist-Zustandes werden alle als relevant eingeschätzten Einzelmaßnahmen detailliert beschrieben. Für alle Maßnahmen sind die Kosten im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Kapitel 7.2) zu benennen. Die Projektkostenbarwerte der Optimierungsmaßnahmen werden mit der Weiterführung der Ist-Situation verglichen.

Es sind wiederum die durch die Umsetzung der Einzelmaßnahmen erreichbaren Einsparungen (kWh / a und €/ a) darzulegen.

Es ist darzulegen, dass die Leistungsfähigkeit der Abwasserbehandlung durch die Maßnahmen nicht nachteilig verändert wird und sich die Ablaufbelastung nicht erhöht.

4.9 Bündelung zu Maßnahmenpaketen

Die Einzelmaßnahmen werden zu Maßnahmenpaketen entsprechend Tab. 1 zusammengefügt. Somit können Maßnahmen der gleichen Realisierungsphase gemeinsam betrachtet werden.

Die Energieeinsparungen durch die Realisierung der Maßnahmenpakete ist abzuschätzen und damit der zukünftige energetische Zustand zu prognostizieren. Es ist zwischen den verschiedenen Realisierungshorizonten zu unterscheiden. Die prognostizierten energetischen Zustände sind mit den Kennwerten zu vergleichen.

Für die einzelnen Realisierungsphasen sind folgende Vergleichswerte zu berechnen:

- Energiebilanz (Elektrizität, Wärme), inkl. Verbrauch, Einsparung und Erzeugung,
- Energiekosteneinsparung (kWh / a und € / a) im Vergleich zur Ist-Situation,
- Kennwerte des projektierten Zustandes, Vergleich mit den Beurteilungskriterien.

Tab. 1: Charakterisierung von Energiesparmaßnahmen mit unterschiedlichen Realisierungshorizonten

Maßnahmenpaket	Charakterisierung	Realisierung
Sofortmaßnahme	Sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis (ca. < 0,3) Einfach umzusetzende Maßnahmen ohne größere Investition und Planungsaufwand, ziehen keine betrieblichen, abwassertechnischen, bauphysikalischen oder sonstigen Probleme nach sich	bis 2 Jahre
Kurzfristige Maßnahme	Gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis (ca. 0,3 - 0,7) Maßnahmen, die in der Energieanalyse als wirtschaftlich und technisch machbar eingestuft werden und für eine kurzfristige Bearbeitung und Umsetzung vorgeschlagen werden, auch bei ohnehin vorgesehener energetischer Sanierung der Anlage durchzuführen	bis 5 Jahre
Abhängige Maßnahme	Schlechteres Kosten-Nutzen-Verhältnis, (ca. 0,7 - 1), Maßnahmen, die wegen ungünstigem Kosten-Nutzenverhältnis oder anderen Abhängigkeiten nur im Rahmen von ohnehin fälligen Neu- oder Umbauten realisiert werden können	bis 10 Jahre

4.10 Endbericht und Präsentation

Die Energieeffizienzanalyse schließt mit der schriftlichen Aufbereitung der Ergebnisse in Form eines Berichtes. Dieser Bericht ist in übersichtlicher Form anzufertigen und umfasst die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete. Die einzelnen Berechnungen und Annahmen sind nachvollziehbar darzustellen. Der Bericht ist dem Auftraggeber, möglichst unter Einbeziehung des Betriebspersonals, in einer Sitzung zu präsentieren.

5 Beurteilung der energetischen Effizienz

Um die Energieeffizienz objektiv bewerten zu können, werden im Folgenden Beurteilungskriterien und Kennwerte definiert. Die Beurteilungskriterien beleuchten die energetisch relevanten Verfahrensschritte. Die Kennwerte dienen lediglich der Einordnung der Effizienz einer Abwasserbehandlungsanlage und sind nicht als Grenzwerte zu verstehen.

Die verfahrenstechnischen Unterschiede der Abwasserbehandlungsanlagen im Bestand sind erheblich. Der weitaus größte Teil arbeitet nach dem Belebungsverfahren und führt den zum Abbau der Abwasserinhaltsstoffe notwendigen Sauerstoff durch Gebläse oder Oberflächenbelüfter zu. Daneben existieren, besonders in den Größenklassen 1 und 2, eine Vielzahl von weiteren Verfahren (Tropfkörper, Tauchkörper, Abwasserteiche, Pflanzenkläranlagen etc.). Dazu kommen noch diverse Verfahrenskombinationen.

Im Rahmen dieser Anforderungen ist es unmöglich, jeder Besonderheit gerecht zu werden. Besonders Anlagen mit Tropfkörpern oder Tauchkörpern arbeiten häufig sehr energieeffizient, sind aber oft mit klassischen Belebungsverfahren kombiniert, so dass eine Bewertung erschwert wird. Dazu kommen das Fehlen von belastbaren Daten und die geringe Verbreitung in den höheren Größenklassen.

Tropfkörperanlagen können über den Elektrizitätsverbrauch der Pumpenaggregate bewertet werden (vgl. Kapitel 5.1.4). Bei kombinierten Anlagen ist der Elektrizitätsverbrauch der Belüftung (vgl. Kapitel 5.1.3) auf die anteilig im Belebungsverfahren behandelte BSB₅-Fracht zu beziehen. Auf die Definition von separaten Kennwerten für einzelne Verfahren, Verfahrensausprägungen oder Verfahrenskombinationen wird zu Gunsten der Handhabbarkeit verzichtet.

Die in Kapitel 5.2 vorgestellten Kennwerte beziehen sich auf die Abwasserreinigung unter Standardbedingungen. Die dabei angenommenen Randbedingungen sind:

- Systemgrenzen gemäß Kapitel 2,
- Spezifischer Abwasseranfall von max. ca. 250 l / (EW * d) bei Trockenwetter,
- Abwasserqualität nach ATV-DVWK A 131 (siehe Tab. 3).
- Förderhöhe des Zulaufhebewerkes < 3m,
- Kohlenstoffabbau
- Nitrifikation und Denitrifikation

Die Berechnung der im Folgenden vorgestellten Beurteilungskriterien berücksichtigt anlagen-spezifische Besonderheiten, die zu zwangsläufig höheren Energieverbräuchen führen. Mit Korrekturwerten (Kapitel 5.1.1) werden die ermittelten Energieverbräuche an die Situation vor Ort angepasst und somit mit den Kennwerten vergleichbar. Treten zusätzliche „unabänderliche“ Randbedingungen auf (hoher Fremdwasseranfall etc.), ist der dadurch resultierende Mehrverbrauch zu bestimmen und ebenfalls als Korrekturwert zu verwenden. Die Berechnung dieser Mehraufwendungen ist nachvollziehbar darzustellen.

5.1 Beurteilungskriterien zur energetischen Bewertung

In der Literatur werden verschiedene Beurteilungskriterien verwendet, die die gesamte Abwasserbehandlungsanlage in unterschiedlicher Trennschärfe betrachten. Eine möglichst weite Aufteilung der Gesamtanlage in funktionelle Gruppen vereinfacht die Identifikation von Optimierungspotentialen, erhöht aber auch den Bearbeitungsaufwand. Es gilt abzuwägen und für die relevanten Bereiche Kriterien zu formulieren.

Basierend auf Haberkern et al. (2008), LfU (1998) und Müller et al. (1999) wurden Kriterien ausgewählt, um eine hohe Trennschärfe bei möglichst geringem Aufwand zu gewährleisten (Tab. 2). Diese Kriterien verfügen über einen gewissen Bekanntheitsgrad bei Planern und Betreibern, zudem liegen Vergleichsdaten vor.

Tab. 2: Beurteilungskriterien zur energetischen Bewertung einer Kläranlage zusammengestellt aus Haberkern et al. (2008), LfU (1998) und Müller et al. (1999)

Kriterium	Einheit	Beschreibung
e_{ges}	kWh / (EW · a)	Gesamter spezifischer Elektrizitätsverbrauch = E_{ges} / EW
e_B	kWh / (EW · a)	Spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Belüftung
e_{PW}	kWh / (1.000 · m ³ · m)	Spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Pump- und Hebewerke
Kläranlagen mit anaerober Schlammfäulung		
Faulgasnutzung	%	Anteil des Faulgases, welches energetisch verwertet wird
$V_{Faulgas\ oTR}$ oder $V_{Faulgas\ EW}$	NI / kg oTR _{zu} NI / EW	Spezifische Faulgasproduktion pro kg oTR Spezifische Faulgasproduktion pro EW
η_{elek}	%	Elektrischer Wirkungsgrad der Faulgasverwertung
EV_{elek}	%	Eigenversorgungsgrad an elektrischer Energie durch Verstromung des Faulgas
EV_{th}	%	Eigenversorgungsgrad an thermischer Energie durch Abwärmenutzung sowie direkte thermische Nutzung des Faulgases

Mit diesen Kriterien ist neben dem Gesamtverbrauch der Kläranlage ein Schwerpunkt auf die energieintensive Belebung sowie auf die Pump- und Hebewerke gelegt. Des Weiteren wird die Energiebereitstellung durch Faulgasnutzung abgefragt.

Durch den Vergleich von e_{ges} , e_{PW} und e_B mit den jeweiligen Kennwerten kann entschieden werden, ob der Schwerpunkt der Betrachtung auf die Belüftung, die Pumpaggregate oder auf andere Anlagenteile gelegt werden sollte. So wird der Blick auf die Bereiche mit den vermutlich höchsten Einsparpotentialen fokussiert und der Arbeitsaufwand minimiert.

Der Betrachtungszeitraum für alle Kriterien umfasst jeweils ein Jahr, damit jahreszeitliche Schwankungen ausgeglichen werden.

Die Energieverbräuche werden auf die aktuellen Einwohnerwerte (EW) bezogen, diese berechnen sich aus den Jahresmittelwerten der tatsächlichen Frachten an BSB₅ im Zulauf der Kläranlage. Sollten keine oder nicht belastbare BSB₅-Werte vorhanden sein, sind die Jahresmittelwerte der CSB-Zulauf-Frachten zu verwenden. Die Bestimmung der Zulauffracht hat vor einer eventuell vorhandenen internen Rückbelastung durch Trübwässer aus der Schlammwässerung stattzufinden. Eine erhöhte Rückbelastung durch Co-Vergärung ist im Einzelfall zu prüfen.

Zur Ermittlung der tatsächlich angeschlossenen Einwohnerwerte werden die einwohnerspezifischen Frachten des ATV-DVWK A 131 (ATV-DWVK, 2000) verwendet (Tab. 3). Im Allgemeinen gilt 60 g BSB₅ / (EW · d). Im Ausnahmefall kann die einwohnerspezifische CSB - Fracht mit 120 g CSB / (EW · d) angesetzt werden. Die Ermittlung des Einwohnerwertes ist zu dokumentieren.

Tab. 3: Einwohnerspezifische Frachten nach ATV-DVWK A 131 (ATV-DWVK, 2000)

Parameter	Spez. Frachten, Rohabwasser
BSB ₅	60 g / (EW · d)
CSB	120 g / (EW · d)
TS	70 g / (EW · d)
TKN	11 g / (EW · d)
P	1,8 g / (EW · d)

Von besonderer Bedeutung ist zunächst die Beurteilung der Plausibilität der zur Verfügung stehenden Daten. Um die Plausibilität zu überprüfen, ist der Einwohnerwert zusätzlich aus allen Informationen zu weiteren Zulauf-Frachten zu ermitteln. Zusätzlich ist die Plausibilität der Angaben durch den Vergleich mit Erfahrungswerten zum Klär- bzw. Faulschlammfall zu überprüfen (Tab. 4). Hier existieren aus der Klärschlammbehandlung / -entsorgung meist verlässliche Daten.

Tab. 4: Erfahrungswerte zum Schlammfall in kommunalen Kläranlagen
(nach Haberkern et al., 2008)

Schlammart	g TR / (EW · d)	oTR (% TR)
Simultane aerobe Stabilisierung		
Überschussschlamm	55 g / (EW · d)	55 - 65 %
Vorklämung und anaerobe Stabilisierung (Schlammfäulung)		
Primärschlamm	35 g / (EW · d)	67 %
Überschussschlamm	40 g / (EW · d)	70 %
Faulschlamm	55 g / (EW · d)	50 %

Weichen die aus den unterschiedlichen Zulauf-Frachten ermittelten Einwohnerwerte stark voneinander ab und sind die Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet, ist es notwendig, die Ursachen zu identifizieren. In jedem Fall ist diese Unstimmigkeit zu dokumentieren. Eine Ursache für Unstimmigkeiten bei der Bestimmung der Einwohnerwerte aus den Frachten ist häufig eine erhöhte N-Belastung durch Industrieabwasser. Im Falle eines TKN / BSB₅ Verhältnisses größer 0,25 werden die daraus resultierenden zusätzlichen energetischen Aufwendungen bei der Berechnung des Gesamtelektrizitätsverbrauchs (e_{ges}) und des Elektrizitätsverbrauchs der Belüftung (e_{B}) berücksichtigt.

Neben Abwasserbeschaffenheit haben auch Reinigungsziel und Topographie Einfluss auf den Gesamtelektrizitätsverbrauch und werden daher ebenfalls bei der Berechnung der Kennwerte berücksichtigt.

5.1.1 Anlagenspezifische Korrekturwerte

Die besonderen Randbedingungen einer Abwasserbehandlungsanlage, die zwangsläufig zu einem erhöhten Energieverbrauch führen, werden durch Korrekturen bei der Berechnung der Kennwerte berücksichtigt.

In Tab. 5 sind Korrekturwerte für die Berechnung von e_{ges} und e_{B} aufgeführt. Die Mehrverbräuche durch weitere anlagenspezifische Randbedingungen sind gegebenenfalls zu bestimmen und ebenfalls als Korrekturwert anzusetzen. Die Berechnung ist darzulegen.

Tab. 5: Korrekturwerte für die Berechnung von e_{ges} und e_B bei besonderen anlagenspezifischen Randbedingungen (Baumann und Roth (2008), Haberkern (2008) und eigene Daten).

Randbedingung	Einheit	Kriterium	Korrekturwert
Einlaufhebewerk > 3m	kWh / (EW · a)	e_{ges}	0,5 pro m zusätzlicher Höhendifferenz
Hohe N-Fracht im Zulauf (TKN / BSB ₅ > 0,25)	kWh / (EW · a)	e_{ges} und e_B	1
Hohe N-Fracht im Zulauf (TKN / BSB ₅ > 0,35)	kWh / (EW · a)	e_{ges} und e_B	2
Niedrige N-Fracht im Zu- lauf (TKN / BSB ₅ < 0,1)	kWh / (EW · a)	e_{ges} und e_B	- 1
Flockungs-/ Sandfiltration im Ablauf	kWh / (EW · a)	e_{ges}	2
Klärschlamm-trocknung	kWh / (EW · a)	e_{ges}	2
Abwasserdesinfektion durch UV-Bestrahlung	kWh / 1000m ³	e_{ges}	25

5.1.2 Gesamter spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Kläranlage (e_{ges} bezogen auf einen EW)

Der gesamte Elektrizitätsverbrauch E_{ges} setzt sich zusammen aus dem Strombezug und dem durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auf der Anlage erzeugten Strom.

$$E_{ges} \text{ (Stromverbrauch gesamt)} = \text{Strombezug} + E_{KWK}$$

Der gesamte spezifische Elektrizitätsverbrauch der Kläranlage wird durch das Beurteilungskriterium e_{ges} bewertet. Es sind die Stromverbräuche innerhalb der definierten Systemgrenzen zu summieren (E_{ges}) und auf einen Einwohnerwert (EW) zu beziehen.

Aufwendungen im Kanal oder in angegliederten Arbeitsbereichen werden im Rahmen der Energieeffizienzanalyse nicht bewertet. Dieser Kennwert ist für Belebungsanlagen von Bedeutung; bei Abwasserbehandlungsanlagen, die nach dem Tropfkörperverfahren arbeiten, greift dieser nicht. Bei Tropfkörpern entfällt der Hauptverbrauch auf die Pumpaggregate, daher werden diese Anlagen über den Kennwert e_{PW} (Kapitel 5.1.4) bewertet.

$$e_{ges} = \frac{E_{ges}}{EW} - K$$

e_{ges} : Gesamter spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Kläranlage [kWh / (EW · a)]

E_{ges} : Gesamter Elektrizitätsverbrauch der Kläranlage [kWh / a]

EW: Aktuelle Einwohnerwerte (60 g BSB₅ / (EW · d) im Zulauf

K: Korrektur von anlagenspezifischen Randbedingungen [kWh / (EW · a)] (Tab. 5)

5.1.3 Spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Belüftung (e_B)

Die Belebungsstufe ist auf Kläranlagen, die mit dieser Technologie zur Kohlenstoff- und Stickstoffelimination arbeiten, der Hauptverbraucher an elektrischer Energie. Innerhalb dieser Behandlungsstufe wiederum verbrauchen die Belüftungsaggregate den größten Teil der elektrischen Energie; diese bedürfen daher einer genaueren Betrachtung.

Durch den Parameter e_B wird der spezifische Elektrizitätsverbrauch der Belüftung in der Belebungsstufe bezogen auf einen Einwohnerwert dargestellt. Der Vergleich mit den Kennwerten erlaubt die Beurteilung der energetischen Qualität dieses Verfahrensschrittes. Auf Grund der Bedeutung der Belüftung für den energetischen Zustand einer Kläranlage ist deren jährlicher Elektrizitätsverbrauch möglichst separat zu messen. Bei Abwasserbehandlungsanlagen mit ungewöhnlich hohen oder niedrigen N-Frachten wird dies durch Korrekturen (Tab. 5) berücksichtigt

$$e_B = \frac{E_B}{EW} - K$$

e_B : Gesamter spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Belüftung [kWh / (EW · a)]

E_B : Gesamter Elektrizitätsverbrauch der Belüftung [kWh / a]

EW: Aktuelle Einwohnerwerte (60 g BSB₅ / (EW · d) im Zulauf

K: Korrektur von anlagenspezifischen Randbedingungen [kWh / (EW · a)] (Tab. 5)

5.1.4 Spezifischer Elektrizitätsverbrauch der Pump- und Hebewerke (e_{pw})

Neben der Belebungsstufe entfällt ein weiterer großer Anteil des Energieverbrauchs auf die Pump- und Hebewerke. Diese werden daher mit einem eigenen Kennwert versehen. Dieser Kennwert sollte für alle großen Pump- und Hebewerke separat ermittelt werden (Zulaufhebewerk, interne Kreisläufe, Schlammbehandlung, Tropfkörperbeschickung etc.). Der Energieverbrauch des Förderaggregates wird auf dessen Förderhöhe (h) und das gehobene Abwasser- bzw. Schlammvolumen (Q) bezogen. Bei Tropfkörperanlagen ist dies meist das entscheidende Beurteilungskriterium, da bei diesen Anlagen der Hauptverbrauch auf die Pumpaggregate entfällt.

$$e_{pw} = \frac{E}{Q * h}$$

e_{PW} : Spezifischer Elektrizitätsverbrauch des Förderaggregates [kWh / (1000 m³ · m)]

E: Elektrizitätsverbrauch des Förderaggregates [kWh / a]

Q: Fördervolumen des Förderaggregates [1000 m³ / a]

h: Förderhöhe des Förderaggregates [m]

5.1.5 Energetische Faulgasnutzung

Das durch anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung) erzeugte Faulgas ist ein wertvoller Energieträger und sollte daher vollständig energetisch genutzt werden. Die Faulgasverwertung sollte zudem möglichst zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt werden, wobei die entstehende Abwärme der BHKW's oder Mikrogasturbinen zu Heizzwecken (Faulbehälter, Betriebsgebäude) genutzt werden sollte.

Um eine Vergleichbarkeit der Faulgasproduktion mit anderen Anlagen sowie auch mit den Ziel- und Toleranzwerten zu ermöglichen, muss das Volumen des bei der Faulung entstehenden Gasvolumens normiert werden. Hierzu sind folgende Parameter - als Tagesmittel - erforderlich:

- Gemessenes Betriebsvolumen (m³ bzw. m³/d)
- Gastemperatur
- Gasdruck
- Wasserdampfanteil (Wasserdampfdruck)

Die Normierung erfolgt über die nachfolgende Formel:

$$V_N = V * \frac{(p - p_w) * (T_N + 273,15)}{(T + 273,15) * p_N}$$

V_N = Auf Standardbedingungen normiertes Gasvolumen [Nm³ / d]

V = Vor Ort gemessenes Gasvolumen [m³ / d]

p = Gasdruck, tägliches Mittel [mbar]

p_w = Wasserdampfdruck [mbar]

T_N = Standardtemperatur [0 °C]

T = Gastemperatur, tägliches Mittel [°C]

p_N = Standardluftdruck [1013,25 mbar]

Der Grad der Faulgasnutzung entspricht dem Quotienten aus dem gesamten genutzten Faulgasvolumen (zur Erzeugung elektrischer und thermischer Energie) und der Faulgasproduktion; beide Werte sind normiert.

$$\text{Faulgasnutzung} = \frac{V_N}{V_{\text{ges}}} * 100$$

Faulgasnutzung: Anteil des Faulgases, der energetisch verwertet wird [%]

V_N : Energetisch genutztes Faulgasvolumen [Nm^3 / a]

V_{ges} : Gesamtes produziertes Faulgasvolumen [Nm^3 / a]

5.1.6 Elektrischer Wirkungsgrad der Faulgasnutzung (η_{elek})

Das auf Kläranlagen erzeugte Faulgas ist ein wertvoller Energieträger und hilft fossile Energieträger einzusparen. Um das Faulgas optimal zu nutzen, sollte es vorrangig zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt werden.

Das Maß für diese hochwertige Faulgasnutzung ist der elektrische Wirkungsgrad, dieser belegt den Wartungszustand und den technischen Stand der entsprechenden Aggregate.

$$\eta_{\text{elek}} = \frac{E_{\text{Gas}}}{V_{\text{elek}} * H_i} * 100$$

η_{elek} : Elektrischer Wirkungsgrad der Faulgasnutzung [%]

E_{Gas} : Durch Faulgasnutzung bereitgestellte elektrische Energie [kWh / a]

V_{elek} : Zur Erzeugung von elektrischer Energie genutztes Faulgasvolumen [Nm^3 / a]

H_i : Heizwert des energetisch genutzten Faulgases [kWh / Nm^3] (qualitätsabhängig),
Heizwert Methan: $9,94 \text{ kWh} / \text{Nm}^3$

Die bei der Erzeugung elektrischer Energie über Blockheizkraftwerke oder Mikrogasturbinen anfallende Wärme sollte ebenfalls möglichst weitgehend genutzt werden. Hier bieten sich zunächst die Beheizung des Faulbehälters und dann die Beheizung der Betriebsgebäude sowie ggf. externer Gebäude an.

Der Energiegehalt des Faulgases ist abhängig von dessen Methangehalt. Methan weist einen Heizwert von $9,94 \text{ kWh/Nm}^3$ auf. Ein Normkubikmeter Faulgas einer kommunalen Kläranlage hat daher bei angenommenen 60 % Methan einen Heizwert von $5,96 \text{ kWh}$. Bei abweichender Faulgasqualität ist der Heizwert anzupassen.

5.1.7 Spezifische Faulgasproduktion ($V_{\text{Faulgas oTR}}$) bzw. ($V_{\text{Faulgas EW}}$)

Die wesentliche Energiequelle einer Kläranlage ist die Produktion und Nutzung von Faulgas aus der anaeroben Stabilisierung der Schlämme (Primär- und Überschussschlämme). Damit hängt die Energiebilanz entscheidend von deren Leistungsfähigkeit ab.

Bei der Bewertung der Faulgasproduktion werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze gewählt.

- (Haber Kern et al., 2008) bezieht die Faulgasproduktion auf den ermittelten EW und nennt einen Zielwert von $11 \text{ Nm}^3 / (\text{EW} \cdot \text{a})$.
- (Müller et al., 1999) bezieht dagegen die Faulgasproduktion auf die dem Fermenter zugeführte Menge an oTR, Zielwert: $475 \text{ NI} / (\text{kg oTR}_{\text{zu}})$.

Der Bezug auf die angeschlossenen Einwohnerwerte berücksichtigt die Co-Vergärung nicht und führt daher bei Einsatz von Co-Substraten zu einer falschen Bewertung. Bei Abwasserbehandlungsanlagen ohne Co-Vergärung kommen beide Ansätze zu ähnlichen Ergebnissen. Die Kennwerte von (Haber Kern et al., 2008) liegen aufgrund einer etwas größer angenommenen Abbauleistung ($500 \text{ NI} / \text{kg oTR}$) leicht höher.

Für die vorliegende Studie wird der Ansatz aus (Müller et al., 1999) verwendet, der die spezifische Faulgasproduktion ($\text{NI} / \text{kg oTR}_{\text{zu}}$) bewertet. Der Kennwert wird jedoch auf $500 \text{ NI} / \text{kg oTR}_{\text{zu}}$ erhöht. Sind keine verlässlichen Daten über die oTR-Fracht in den Faulbehältern verfügbar, kann die auf EW bezogene Faulgasproduktion ($\text{Nm}^3 / (\text{EW} \cdot \text{a})$) verwendet werden. In diesem Fall ist die Co-Vergärung gesondert zu betrachten

Als Beurteilungskriterium dient die spezifische Biogasproduktion bezogen auf die in die Faulung eingetragene Fracht an organischem Trockenrückstand (oTR). Es werden sowohl die durch Klärschlamm als auch die durch Co-Substrate eingebrachten oTR-Frachten erfasst.

$$V_{\text{Faulgas oTR}} = \frac{V_{\text{ges}}}{\text{oTR}_{\text{zu}}}$$

Alternativ

$$V_{\text{Faulgas EW}} = \frac{V_{\text{ges}}}{\text{EW}}$$

- $V_{\text{Faulgas oTR}}$: Spezifische Faulgasproduktion pro kg der Faulung zugeführtem oTR [$\text{NI} / \text{kg oTR}_{\text{zu}}$]
- V_{ges} : Gesamtes produziertes Faulgasvolumen [Nm^3 / a]
- oTR_{zu} : Der Faulungsanlage zugeführte Menge an oTR [$\text{Mg oTR} / \text{a}$]

$V_{\text{Faulgas EW}}$: Spezifische Faulgasproduktion pro EW [$\text{Nm}^3 / (\text{EW} \cdot \text{a})$]
EW: Aktuelle Einwohnerwerte ($60 \text{ g BSB}_5 / (\text{EW} \cdot \text{d})$) im Zulauf

Die spezifische Faulgasproduktion zeigt den Umwandlungsgrad der in die Faulung eingetragenen organischen Masse in nutzbares Faulgas. Durch unvollständigen anaeroben Abbau wird Faulgas und damit Energie verschenkt.

5.1.8 Eigenversorgungsgrade (EV_{elek}), (EV_{th})

Durch die Schlammfäulung und die energetische Verwertung des Faulgases besteht für größere Kläranlagen die Möglichkeit der Eigenproduktion von elektrischer und thermischer Energie. Die vollständige Eigenversorgung mit Wärmeenergie ist relativ leicht zu erreichen, aber auch eine weitgehende Eigenversorgung mit Elektrizität ist für größere Anlagen realistisch. Beim elektrischen Eigenversorgungsgrad wird die erzeugte elektrische Energie dem elektrischen Gesamtverbrauch gegenübergestellt.

Neben der energetischen Güte der Anlage haben auch anlagenspezifische Randbedingungen wie Abwasserzusammensetzung und notwendige Hebewerke Einfluss auf den Gesamtelektrizitätsverbrauch und damit auf die möglichen Eigenversorgungsgrade. Diese Besonderheiten werden analog zu der Berechnung von e_{ges} durch Korrekturwerte (Kapitel 5.1.1) berücksichtigt. Eine 100-prozentige Eigenversorgung ist in der Regel nur mit Co-Vergärung zu erreichen.

Beim thermischen Eigenversorgungsgrad zählt sowohl die durch Kraftwärmekopplung (KWK) im BHKW erzeugte thermische Energie als auch die durch Direktverfeuerung des Faulgases in Kesselanlagen erzeugte thermische Energie. Die selbsterzeugte thermische Energie wird mit dem thermischen Gesamtverbrauch (inkl. Zukauf von Heizöl, Erdgas, Fernwärme) verglichen.

$$EV_{\text{elek}} = \frac{E_{\text{Gas}}}{E_{\text{ges}}} * 100 ; \quad EV_{\text{th}} = \frac{W_{\text{Gas}}}{W_{\text{ges}}} * 100$$

;

$EV_{\text{elek}} ; EV_{\text{th}}$: Elektrischer / thermischer Eigenversorgungsgrad der Kläranlage (%)

$E_{\text{Gas}} ; W_{\text{Gas}}$: Durch Faulgasnutzung bereitgestellte elektrische / thermische Energie (kWh / a)

$E_{\text{ges}} ; W_{\text{ges}}$: Gesamter Elektrizitäts-/ Wärmeverbrauch der Kläranlage (kWh / a)

EW: Aktuelle Einwohnerwerte ($60 \text{ g BSB}_5 / (\text{EW} \cdot \text{d})$) im Zulauf

5.2 Erläuterung und Dokumentation der Kennwerte (Toleranz- und Zielwert)

Eine Bewertung der Energieeffizienz anhand der oben beschriebenen Beurteilungskriterien ist nur anhand von Kennwerten möglich, die einen bei optimierter Betriebsweise zu erreichenden Wert vorgeben.

Bei der Aufstellung von Idealwerten (Müller et al., 1999) oder Zielwerten (Haberkern et al., 2008; LfU, 1998) kann grundsätzlich zwischen verschiedenen Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Herleitung anhand einer Modellkläranlage mit „Standardbedingungen“
- Statistische Auswertung von Betriebsergebnissen realer Kläranlagen
- Bestimmung der Best-Practice durch Benchmarking

Ein gewisser Toleranzbereich, der Anlagen nahe des „Ziels“ bzw. „Ideals“ umfasst, wird durch die zusätzliche Definition von Richtwerten (Müller et al., 1999) bzw. Toleranzwerten (Haberkern et al., 2008; LfU, 1998) festgelegt.

Im Rahmen dieser Anforderungen werden die Begrifflichkeiten aus Haberkern et al. (2008) und LfU (1998) verwendet:

- Zielwert
- Toleranzwert

Der Zielwert trifft sprachlich besser als der Idealwert einen unter derzeitigen Bedingungen zu erreichenden Kennwert. Dieser stellt kein Ideal dar, sondern lediglich ein unter guter Betriebsweise, Anlagenauslastung und Verfahrenswahl (Stand der Technik) zu erzielendes Betriebsergebnis. Auch der Zielwert lässt sich unter Ausschöpfung verschiedenster Maßnahmen und Optimierungen noch unterschreiten.

Der Toleranzwert beschreibt einen Bereich, in dem die Energieeffizienz durch optimierende Maßnahmen weiter verbessert werden könnte. Inwieweit diese Maßnahmen vor Ort tatsächlich realisierbar sind, ist Aufgabe der Bewertung in der Energieeffizienzanalyse.

Die Aufstellung von Ziel- und Toleranzwerten ermöglicht es, die betrachtete Abwasserbehandlungsanlage hinsichtlich ihrer Energieeffizienz einzuordnen.

Die 1998 und 1999 publizierten Kennwerte (LfU, 1998; Müller et al., 1999) wurden 2008 von Haberkern et al. überarbeitet und angepasst. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Größenklassen 4 und 5 gelegt, da 91 % der EW auf diesen Kläranlagen behandelt werden und daraus 86 % des gesamten Energieverbrauchs der Abwasserbehandlung resultieren (Abb. 3).

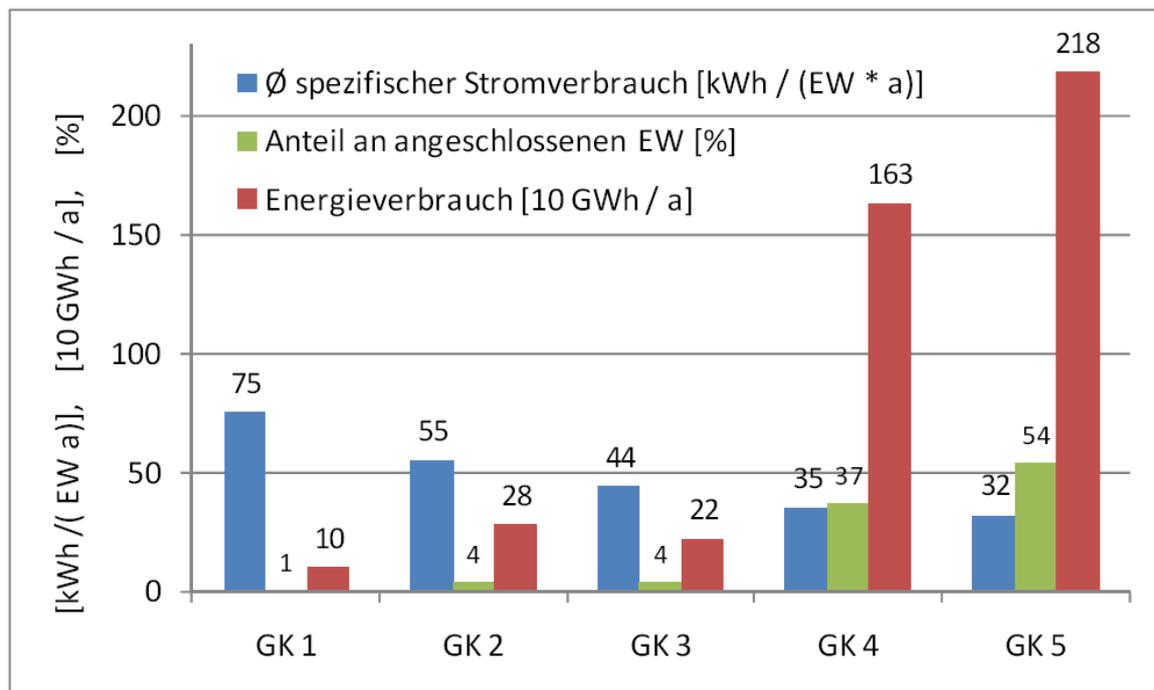


Abb. 3: Energieverbrauch im bundesweiten Bestand der Kläranlagen nach Größenklassen (Haber Kern et al., 2008)

Die Verwendung von Kennwerten ermöglicht die Bewertung der Gesamtanlage oder einzelner Teilbereiche. Es ist somit leicht möglich, die Bereiche mit dem vermeintlich größten Energieeinsparungspotential zu identifizieren und die Optimierungsarbeit auf diese zu fokussieren. Die im Rahmen der Anforderungen zusammengetragenen Beurteilungskriterien und Kennwerte sind in Tab. 6 aufgeführt.

Grundsätzlich wird bei den Kennwerten differenziert nach Reinigungskonzept und Größenklasse.

Die Aufteilung aufgrund des Reinigungskonzeptes unterscheidet zwischen Anlagen mit:

- simultaner aerober Schlammstabilisierung
- getrennter anaerober Schlammstabilisierung.

Eine tiefgehende Differenzierung der Kennwerte nach Verfahren oder Verfahrenskombinationen wird nicht durchgeführt (vgl. Kapitel 5).

Tropfkörper erhalten keine eigenen Kennwerte zugewiesen. Ihr wesentlicher Energieverbrauch ergibt sich aus der Pumpenergie zur Beschickung des Tropfkörpers, die bereits durch das Beurteilungskriterium e_{PW} erfasst wird.

Beim Energieverbrauch im Bestand der Abwasserbehandlungsanlagen fallen Schwankungen in Bezug auf die Mittelwerte der unterschiedlichen Größenklassen (Abb. 3) auf. Allerdings schwanken die Energieverbräuche innerhalb der Größenklassen ebenfalls stark (Abb. 4).

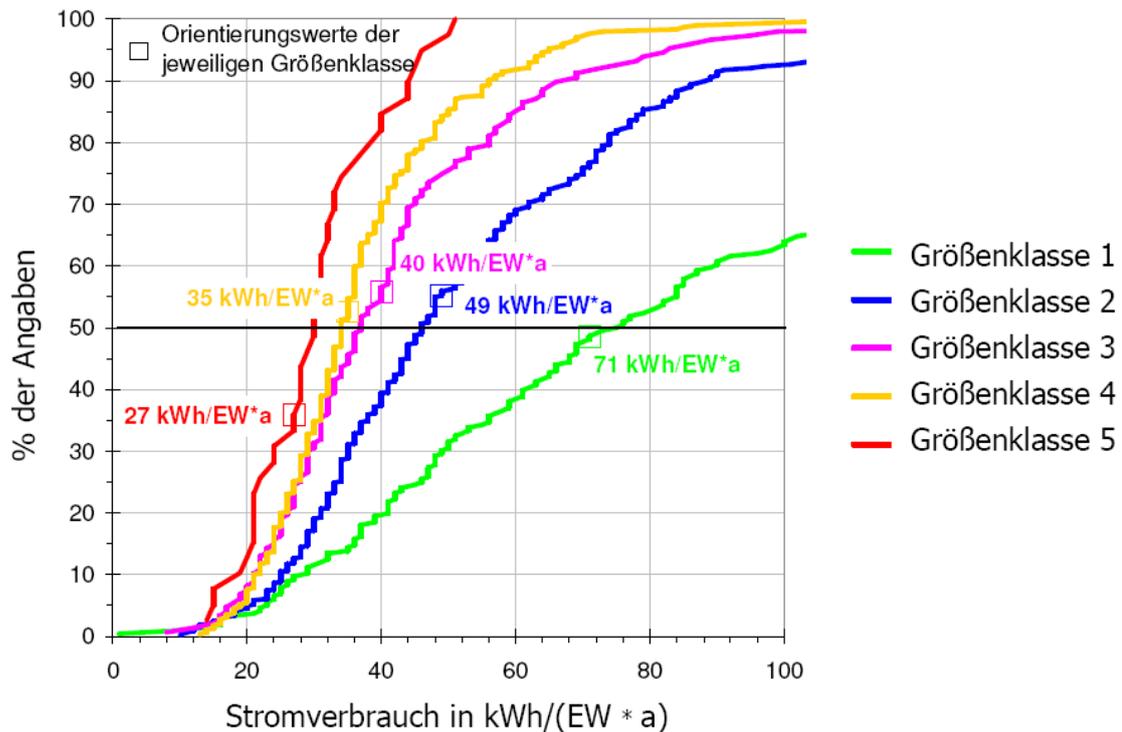


Abb. 4: Statistische Auswertung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen in Baden-Württemberg, DWA-Leistungsvergleich (Haberkern et al., 2008).

Betrachtet man die 10 % der Anlagen der einzelnen Größenklassen mit den jeweils geringsten Energieverbräuchen, ist festzustellen, dass diese mit einem spezifischen Elektrizitätsverbrauch von ca. 20 – 28 kWh / (EW*a) so dicht zusammen liegen, dass von vergleichbaren Potenzialen ausgegangen werden kann.

Dennoch kann festgestellt werden, dass kleinere Anlagen der Größenklassen 1 und 2 meist einen höheren spezifischen Energieverbrauch haben als Anlagen der Größenklassen 3 bis 5. Dies wird durch angepasste Kennwerte berücksichtigt. Die Schwankung innerhalb der Größenklasse 1 sind aufgrund der vielfältigen Konzepte bei kleinen Kläranlagen sehr hoch. Die Schwankungsbreite reicht von Abwasserteichen bis hin zu Membrananlagen dementsprechend können die Kennwerte in dieser Größenklasse lediglich als Orientierung dienen.

In Tab. 6 sind die Beurteilungskriterien und Kennwerte für eine Energieeffizienzanalyse auf Abwasserbehandlungsanlagen dargestellt. Die Tabelle unterscheidet nach folgenden Kriterien:

1. Größenklassen

Gemäß der statistischen Auswertung der Energieeffizienz von Abwasserbehandlungsanlagen in Baden-Württemberg (siehe Abb. 4) können die Größenklassen 1 und 2 sowie 3 bis 5 für die Bewertung zusammengefasst werden:

- Größenklasse 1 + 2 (≤ 5.000 EW bzw. ≤ 300 kg BSB₅/ d)
- Größenklasse 3 - 5 (> 5.000 EW bzw. > 300 kg BSB₅/ d)

2. Schlammstabilisierung

Je nach eingesetzter Prozesstechnik der Schlammstabilisierung sind deutliche Unterschiede im Energieverbrauch und der Energiebereitstellung festzustellen:

- Anlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung benötigen grundsätzlich mehr Energie für die Belüftung. Dies ist bedingt durch eine höhere organische Fracht im Zulauf zur Belebung (keine Vorklärung) sowie durch ein höheres Schlammalter und damit durch eine größere endogene Grundatmung.
- Anlagen mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung (Faulung) werden in der Regel mit Vorklärung (Abzug von Primärschlamm) sowie geringerem Schlammalter betrieben und benötigen dadurch deutlich weniger Belüftungsenergie. Durch die Schlammfaulung besteht die Möglichkeit der Energiebereitstellung

Tab. 6: Beurteilungskriterien und Kennwerte zur Bewertung der energetischen Situation einer Kläranlage
[verändert nach (Haber Kern et al., 2008; LfU, 1998; Müller et al., 1999)]

Beurteilungskriterium	GK 1 und 2		GK 3 bis 5	
	Zielwert	Toleranzwert	Zielwert	Toleranzwert
	≤ 5.000 EW; ≤ 300 kg BSB ₅ /d		> 5.000 EW; >300 kg BSB ₅ /d	
Gesamter Elektrizitätsverbrauch [kWh / (EW a)]^(a) e _{ges}				
anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung)	25	35	18	30
simultane aerobe Stabilisierung	30	40	24	35
Elektrizitätsverbrauch Belüftung [kWh / (EW a)]^(a) e _B				
anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung)	14	20	10	16
simultane aerobe Stabilisierung	16	22	12	18
Elektrizitätsverbrauch Pumpwerke [Wh / (m³ m)] e _{PW}	4	6	4	6

Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung (alle GK)		Zielwert	Toleranzwert
Grad der gesamten Faulgasnutzung [%]	Faulgasnutzung	100	95
Elektrischer Wirkungsgrad der Faulgasverwertung [%]	η _{elek}	35	30
Spezifische Faulgasproduktion [NI / kg oTR _{zu}] (in Klammern: alternativ [Nm ³ / (EW a)])	V _{Faulgas oTR} (V _{Faulgas EW})	500 (11)	450 (9)
Eigenversorgungsgrad-Elektrizität [%] ^(a)	EV _{elek}	100 ^(b)	60
Eigenversorgungsgrad-Wärme [%]	EV _{th}	100	95

Grau hinterlegte Werte stehen für selten realisierte Anlagenkonzepte;

(a) Anlagenspezifische Randbedingungen wie topografisch bedingte Hebewerke, dichtes TKN / BSB₅-Verhältnis oder besondere Reinigungsanforderungen werden bei der Berechnung der Kennwerte berücksichtigt (Kapitel 5).

(b) 100 % sind in der Regel nur mit Co-Vergärung zu erreichen.

6 Exemplarische Optimierungsmaßnahmen

6.1 Allgemeines, Randbedingungen

In der Regel ist das Abwasserreinigungsverfahren durch die vorhandenen Bauwerke weitestgehend vorgegeben. Trotzdem ist zu untersuchen, inwieweit durch verfahrenstechnische Änderungen energetische Einsparungen erzielt werden können.

Die Überlegungen zur Optimierung müssen alle Verfahrensstufen umfassen. Auf Grund des hohen Energieverbrauchs der Belebung und der durch die Möglichkeit der Energieerzeugung herausragenden Rolle der Schlammbehandlung ist diesen beiden Verfahrensschritten ein Schwerpunkt bei den Überlegungen der verfahrenstechnischen Optimierung einzuräumen.

Da jede Kläranlage ein Einzelfall ist, kann der Maßnahmenkatalog nicht verallgemeinert werden sondern muss jeweils vor Ort in Zusammenarbeit mit dem Betreiber individuell erstellt werden. Die nachfolgend aufgezählten Maßnahmen sind daher lediglich exemplarisch sowie als Anregung zu verstehen.

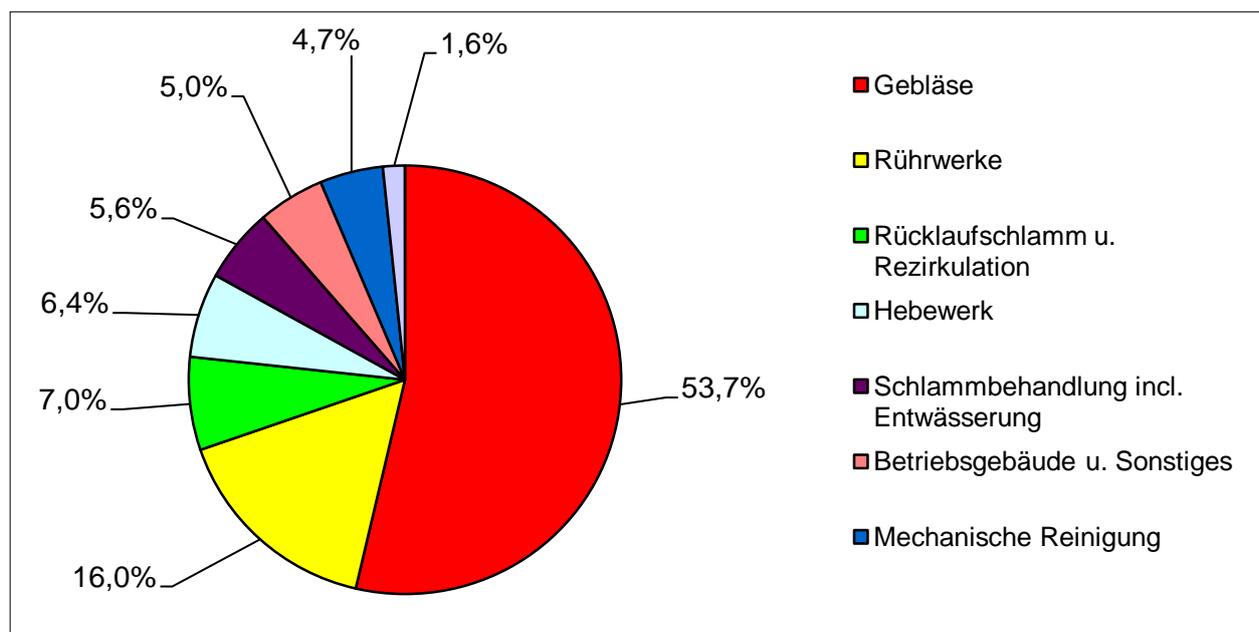


Abb. 5: Exemplarische prozentuale Verteilung des Energieverbrauchs einer Kläranlage (25.000 kW) mit simultaner aerober Schlammstabilisierung

6.2 Abwasseranfall

Der Abwasseranfall im Zulauf der Kläranlage setzt sich zusammen aus:

- Schmutzwasser (inkl. Fremdwasser nach § 54, Abs. 1, WHG 2009)
- Niederschlagswasser

- Prozesswasser aus Schlammeindickung und –entwässerung (interner Kreislauf)
- Ggf. getrennt angenommene Schlämme, Industrieabwässer in Chargen sowie Co-Substrate

Der Anfall von Schmutz-, Fremd- und Niederschlagswasser ist weitestgehend durch das Kanalsystem vorgegeben.

Reduzierungen der Abwassermengen aus dem Kanalnetz sind ggf. möglich durch

- Realisierung eines Trennsystems, insbesondere in Neubaugebieten
- Sanierung von undichten Kanälen
- Abtrennen von angeschlossenen Außengebieten
- Abtrennen von befestigten Flächen, Drainagen, Gräben und Bächen

Derartige Maßnahmen sind in vielen Fällen möglich und bieten zum Teil erhebliche Potentiale, insbesondere im Hinblick auf die erforderliche Pumpenergie, werden aber in dieser Studie nicht betrachtet. Der Focus liegt auf dem Bereich der Abwasserreinigung. Die Optimierung des Kanalsystems ist gesondert zu betrachten.

Die Menge und Zusammensetzung des zu behandelnden Abwassers wird durch das Prozesswasser verschiedener Verfahrensstufen beeinflusst:

- Überschussschlammeindickung/ -entwässerung
- Schlammeindickung/ -entwässerung (vermehrt bei Co-Vergärung)
- Entwässerung von Fremdschlämmen
- Kondensat aus der Klärschlamm-trocknung

Grundsätzlich ist zu überprüfen, an welcher Stelle die Prozesswässer in den Hauptstrom integriert werden bzw. ob sie im Nebenstrom behandelt werden können. Dabei ist zu beachten, dass Prozesswässer abhängig von ihrer Beschaffenheit nicht die gesamte mechanisch-biologische Reinigung durchlaufen müssen, da dies lediglich die hydraulische Belastung erhöht und zu einem erhöhten Energieverbrauch in folgenden Bereichen führt.

- Pumpenergie in sämtlichen Hebe- und Pumpwerken
- Belüftungsenergie im Sandfang und in der Belebung
- Betriebsmittelbedarf

Die Zuführung von Prozesswasser hat so zu erfolgen, dass das Auftreten von Belastungsspitzen minimiert wird.

Die Möglichkeit der Einsparung von Energie in oben genannten Bereichen durch

- separate Prozesswasserbehandlung im Nebenstrom,
- eine veränderte Prozesswasserführung

ist zu prüfen.

Weitere Einflüsse auf Abwassermenge und –zusammensetzung ergeben sich durch die Einleitung von Industrieabwasser sowie angenommenes Abwasser bzw. Schlämme aus abflusslosen Gruben.

6.3 Hebe- und Pumpwerk

Die am Zulauf- bzw. im Zwischenhebewerk sowie an internen Kreisläufen installierten Pumpen sollten mit den Leistungen und Wirkungsgraden in Tab. 7 verglichen werden. Eine Verbesserung der Energieeffizienz ist grundsätzlich durch Änderung des gesamten Systems oder durch Optimierung von einzelnen Aggregatkomponenten möglich.

- Pumpe
- Motor und Getriebe
- Regelung

Tab. 7: Zielwerte für den Wirkungsgrad und den spezifischen Elektrizitätsverbrauch von Pumpen auf Kläranlagen (Baumann und Roth, 2008)

Pumpenart	Fördermedium	Laufgrad	Wirkungsgrad	Wh / (m ³ · m)
Schnecken- trog- pumpe	Rohabwasser		50 – 60	5,4 – 4,5
	Rücklaufschlamm, int. Kreislauf, Ablauf (Filterbeschickung)		60 – 70	4,7 – 3,9
Kreiselpumpe	Rohabwasser	Wirbelrad	45 – 55	6,0 – 4,9
		Einkanalrad	50 – 60	5,4 – 4,7
	Rücklaufschlamm, int. Kreislauf, Ablauf (Filterbeschickung)	Mehrkanalrad	65 – 75	4,2 – 3,6
		Spiralrad	65 – 75	4,2 – 3,6
Propellerpumpe	Int. Kreislauf		65 – 80	4,2 – 3,4
Exzentrerschne- ckenpumpe	Schlämme		50 – 65	5,4 – 4,2

Um die Optimierungsmöglichkeiten zu bestimmen, müssen folgenden Fragen betrachtet werden:

- a) Eignung der installierten Verfahrenslösung
- b) Möglichkeiten, das bestehende System zu optimieren

- Abwasserhebwerke: Erhöhung des Einstauniveaus um die zu überwindende Höhendifferenz zu verringern (verbunden mit wasserspiegelabhängiger Drehzahlregulierung). Beseitigung eines möglichen Einstaus von nachfolgenden Verfahrensschritten (Rechenanlage), um eventuellen Rückstau zu verhindern
 - Rücklaufschlammpumpe: Erhöhung des TS-Gehaltes im Rücklaufschlamm, um die zu fördernde Schlammmenge zu reduzieren
 - Wartungszustand überprüfen
- c) Eignung der installierten Pumpen
- Passende Pumpe für das zu fördernde Medium
 - Bei abgestuften Pumpengrößen für verschiedene Lastfälle: Eignung dieser für die auftretenden Lastfälle
- d) Eignung der installierten Motoren und Getriebe
- Betriebspunkt(e) bzw. Betriebsbereich nahe des Optimums
 - Wirkungsgrad im Vergleich zu heute verfügbarer Technik
- e) Eignung der Regelung
- Art der Anpassung der Nutzleistung
 - Eignung der installierten Leistung bzw. der durch Regelung der Drehzahl erreichbaren Leistungen, um den lastabhängigen Abwasseranfall effizient zu heben
 - Regelung durch Zu- bzw. Abschalten redundanter Pumpen
 - Abgestufte Pumpengrößen für verschiedene Lastfälle
 - Möglichkeit der Regelung durch Frequenzumrichter

6.4 Rechenanlage

Der Energieverbrauch der Rechenanlage ist im Regelfall von untergeordneter Bedeutung. Zu beachten ist jedoch die Abluftbehandlung eingehauster Rechengebäude, die in der Regel mit einem sehr hohen Luftwechsel und entsprechend hohem Energiebedarf für die Lüftungsanlage betrieben wird. In diesen Fällen ist zu untersuchen:

- Notwendigkeit einer dauerhaften Absaugung
- Reduzierung der Luftwechselrate für die Rechenhalle durch die Installation einer Punktabsaugung an der Geruchsquelle
- Verzicht auf die Abluftbehandlung oder deren Reduzierung durch den Einsatz einer Rechengutpresse mit Absackeinrichtung

Die Regelung der Rechenreinigung durch die Wasserspiegeldifferenz ist Stand der Technik. In Einzelfällen kann es aber trotzdem zu einem Rückstau und damit zu einer Zusatzbelastung des Hebewerkes kommen; diese ist möglichst gering zu halten.

6.5 Sand- und Fettfang

Der Energieverbrauch von Sandfängen wird durch die Intensität der Belüftung bestimmt. Ein hoher Lufteintrag bewirkt eine gute Trennung von mineralischen und organischen Partikeln; diese ist bei nachgeschaltetem Sandklassierer oder Sandwäscher jedoch nicht zwingend nötig. Die notwendige Abtrennung der organischen Inhaltsstoffe aus dem Sand wird effizienter durch Klassierer bzw. Wäscher realisiert.

Daher ist häufig die Reduzierung des Lufteintrags in den Sandfang möglich. Dies kann entweder durch ein angepasstes Belüftungsaggregat oder durch eine angepasste Steuerung erfolgen. Der Einsatz von Frequenzumrichtern ist zu prüfen.

Des Weiteren ist bei separater Druckluftbereitstellung zu überprüfen, ob diese nicht gegebenenfalls durch die Aggregate der Belebung zu decken ist und damit auf ein zusätzliches Aggregat verzichtet werden kann. Die i.d.R. unterschiedlichen Druckniveaus sind zu beachten.

Ein weiterer zu untersuchender Punkt ist die Notwendigkeit von Fettfangkammern, bei einem geringen Anteil an Fetten und anderen Leichtstoffen im Abwasserstrom kann ggf. auf sie verzichtet werden und so Belüftungsenergie eingespart werden.

6.6 Vorklärung

Der Verbrauch an elektrischer Energie in der Vorklärung ist von untergeordneter Bedeutung und ergibt sich überwiegend durch die Räumleinrichtung. Einsparungen ergeben sich höchstens durch die bedarfsgerechte Steuerung von Reinigungs- und Heizeinrichtungen (Beckenkronenheizung).

Weitergehende Auswirkungen auf die Gesamt-Anlage und damit auf deren Energieverbrauch hat die Vorklärung durch die Reduzierung der Kohlenstofffracht (Entlastung der Belebung). Zu beachten ist, dass durch eine lange Aufenthaltszeit der Vorklärung kein C-Mangel für Denitrifikation und biologische P-Elimination entstehen darf.

Soweit möglich ist eine Aufteilung des Vorklärvolumens zu untersuchen, um unterschiedliche Lastfälle gezielt zu behandeln.

6.7 Belebungsanlage

Die Belebungsstufe stellt die Anlagenstufe mit den Haupt-Energieverbrauchern auf kommunalen Kläranlagen dar. Die zu betrachtenden Komponenten gliedern sich in:

- Druckbelüftungseinrichtung inklusive

- Gebläse / Verdichter
- Druckluftleitungen mit Regelorganen
- Belüfterelemente
- Oberflächenbelüfter (alternativ zur Druckbelüftung)
- Rührwerke (Zielwerte vgl. Tab. 8)
- Regelung des Sauerstoffeintrags

Der energetische Aufwand für die Belüftung ist direkt abhängig vom Sauerstoffeintrag ins Belebungsbecken. Der Sauerstoffeintrag muss den Sauerstoffbedarf für folgende Teilbereiche decken:

- Abbau der Kohlenstoffverbindungen (durch Abwasserzusammensetzung und die Vorklä- rung definiert)
- Nitrifikation
- Grundatmung des belebten Schlammes (abhängig von Feststoffgehalt, Schlammalter und Temperatur)
- einen gewissen Sauerstoffüberschuss, um auch in der Schlammflocke eine ausreichende Sauerstoffversorgung gewährleisten zu können.

Nachfolgend werden Hinweise zur Optimierung der einzelnen Aggregate gegeben:

Druckbelüftung

Der Wartungszustand der Druckluftherzeugung, -leitungen und des Sauerstoffeintrags ist regelmä- ßig durch Manometer auf Luft- und Druckseite sowie durch laufende Überprüfung des Energiebe- darfs zu überprüfen, um das

- Zusetzen von Filtern,
- Entstehen von Leckagen,
- Zusetzen, Verspröden und Verschleißen von Belüfterelementen und
- andere Betriebsbeeinträchtigungen

rechtzeitig zu erkennen.

Sauerstoffeintragsversuche unter Reinwasser- oder Betriebsbedingungen geben Auskunft über die Leistungsfähigkeit der gesamten Belüftungseinrichtung.

Der ggf. erforderliche vorzeitige Austausch von Belüfterelementen kann aus wirtschaftlichen Grün- den sinnvoll sein. Dies trifft häufig beim Verspröden der Belüfterelemente auf und kann den erfor- derlichen Druck, den die Gebläse bereitstellen müssen, erhöhen. Risse in Belüfterelementen füh- ren zu sehr großen Luftblasen und damit zu einem verschlechterten Sauerstoffeintrag ins Bele- bungsbecken. Bei rissigen Belüftern werden große Luftmengen nicht genutzt. Der Austausch der Belüfter ist dann wirtschaftlich oft sinnvoll.

Das Zusetzen der Belüfterelemente mit organischen und anorganischen Verbindungen führt zu erhöhtem Druckverlust, die Ablagerungen in den Poren können jedoch meist durch die Eindüsung von Ameisensäure gereinigt werden.

Die Druckluftherzeugung durch Gebläse ist ebenfalls zu betrachten. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Regelbarkeit und damit der Möglichkeit zur Anpassung an verschiedene Lastfälle.

Oberflächenbelüftung

Bei Oberflächenbelüftern ist im Betrieb eine regelmäßige Säuberung und Wartung erforderlich. Im Rahmen der Energieanalyse ist eine Überprüfung der Dimensionierung und der Art der Regelung durchzuführen.

Rührwerke

Die installierten Rührwerke sind hinsichtlich folgender Kriterien zu überprüfen:

- Dimensionierung
- Drehzahl
- Eignung zur Beckengeometrie
- Möglichkeit des intermittierenden Betriebs

Die nachfolgende Tabelle gibt Hinweise auf zu erreichende Leistungsdichten von Rührwerken in Belebungsbecken.

Tab. 8: Zielwerte für die Leistungsdichte von Rührwerken (W / m^3) in Belebungsbecken (Baumann und Roth, 2008)

Beckenvolumen	Zielwert [W / m^3]
200 – 500 m^3	4,0 – 2,5
500 – 1000 m^3	2,5 – 2,0
500 – 1000 m^3	2,0– 1,5
1000 – 2000 m^3	1,5

Der Sauerstoffeintrag dient immer auch der Durchmischung und damit der Gewährleistung des Kontaktes von Abwasserinhaltsstoffen, Bakterien und Sauerstoff. Es muss überprüft werden, inwieweit die Belüftung lediglich zur Aufrechterhaltung der Durchmischung eingesetzt wird. Dies gilt besonders bei hohem Fremd- und Niederschlagswasseranteil, sowie gegen Ende des Belebungsbeckens, um eine Sauerstoff-Verschleppung in Richtung der Denitrifikation oder der biologischen Phosphorelimination zu verhindern. In Teilbereichen ist eventuell lediglich eine Durchmischung nö-

tig, die effizienter durch Rührwerke bewerkstelligt werden kann. Die Belüftung kann dann abgestellt oder reduziert werden.

Neben den Aggregaten der Belebungsstufe ist die Prozessführung von entscheidender Bedeutung für den Energieverbrauch. Hier sind vor allem der Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken sowie die Steuerung von Nitrifikation und Denitrifikation zu beachten.

Eine früher übliche Regelung der Sauerstoffzufuhr mit einer Sauerstoffkonzentrationen im Belebungsbecken von 2 mg / l ist in der Regel für einen stabilen Prozess des Abbaus organischer Abwasserinhaltsstoffe und der Nitrifikation nicht erforderlich. In der Regel sind Sauerstoffkonzentrationen von ca. 1 mg / l für eine stabile Nitrifikation ausreichend.

Die Regelung des Lufteintrages sollte über den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt, den O_2 -Gehalt und / oder über das Redoxpotential erfolgen. Hierbei ist auf repräsentative Messpunkte (evtl. mehrere) und kalibrierte Sonden zu achten.

Große Energieeinsparpotentiale sind häufig durch die Anpassung von Biomassenkonzentration (TS-Gehalt) und Schlammalter auf tatsächlich für die Reinigung erforderliche Werte zu erzielen.

Häufig wird in Belebungsbecken eine deutlich zu hohe TS-Konzentration eingestellt unter dem Motto „Viel hilft viel“. Dabei wird nicht beachtet, dass diese Biomasse auch mit Sauerstoff versorgt werden muss und der Sauerstoffeintrag nicht nur für den Abbau der Abwasserinhaltsstoffe, sondern auch für die endogene Atmung bereitgestellt werden muss.

Bei Reduzierung des Feststoffgehaltes und des Schlammalters auf tatsächlich für die Reinigungsleistung erforderliche Werte kann die Grundatmung (endogene Atmung) verringert werden. Die Reinigungsleistung und die Betriebsstabilität sind dabei immer zu gewährleisten. Bei Anlagen mit simultaner aerober Stabilisierung ist ebenfalls eine ausreichende Schlammstabilisierung zu erreichen.

Der TS-Gehalt im Belebungsbecken sollte also nicht anhand der maximal durch die Nachklärung zu realisierenden Rücklaufschlammförderung, sondern anhand des tatsächlich erforderlichen Schlammalters in Verbindung mit der Abwassertemperatur eingestellt werden. Dies kann bedeuten, dass in den Sommermonaten häufig TS-Konzentrationen von < 3 g / l ausreichen. Abb. 6 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Abwassertemperatur und erforderlichem Schlammalter im Belebungsbecken.

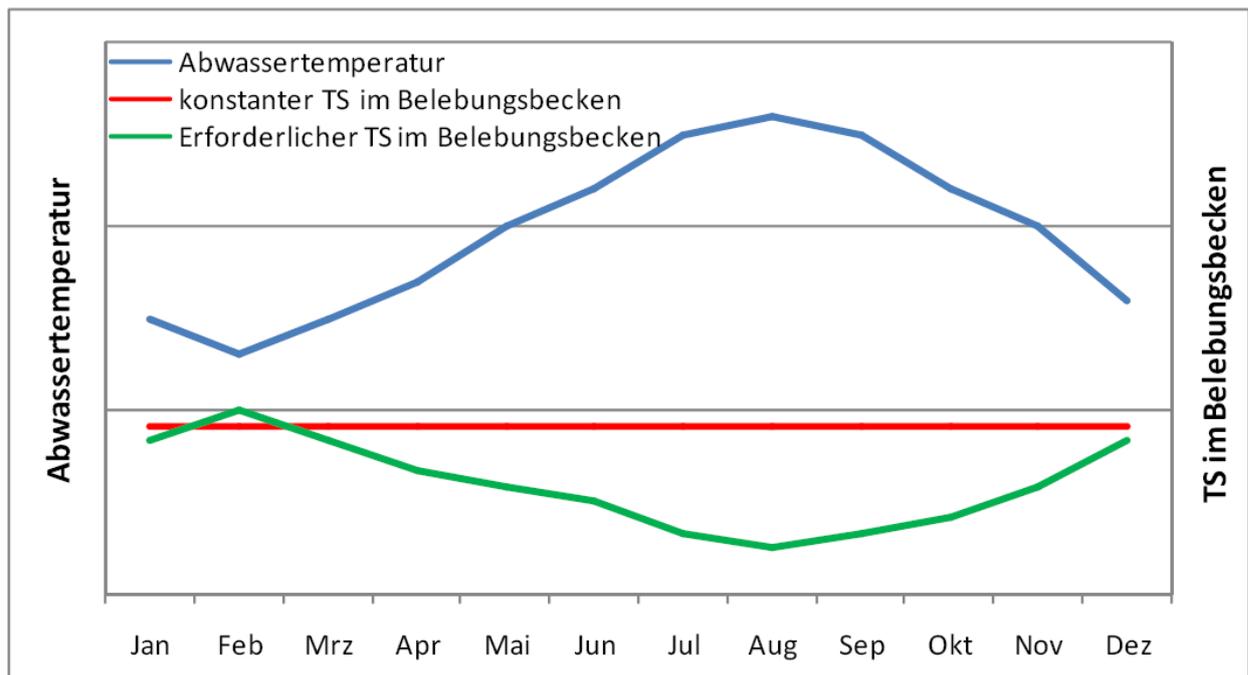


Abb. 6: Anpassung des TS Gehaltes im Belebungsbecken an die Abwassertemperatur (qualitativ)

Eine Anpassung der Rücklaufschlammförderung, des Überschussschlammabzugs und damit des TS-Gehaltes an die tatsächlichen Verhältnisse in der Belebungsphase spart häufig sehr viel Belüftungsenergie.

6.8 Nachklärung

Der Energieverbrauch der Nachklärung ist ähnlich dem der Vorklärung gering. Zu überprüfen ist auch hier die bedarfsgerechte Steuerung von Räum- und Reinigungseinrichtungen sowie der Rücklaufschlammförderung.

Der Hauptverbraucher in der Nachklärung ist die Rücklaufschlammpumpe, deren Verbrauch ist abhängig vom Rücklaufschlammverhältnis. Eine Energieeinsparung ohne Beeinträchtigung der Reinigungsleistung ist unter Umständen möglich durch:

- Verstärkte Eindickung durch reduziertes Rücklaufschlammverhältnis (zusätzliche Einsparung bei der maschinellen Eindickung)
- Regelung der Rücklaufschlammmenge proportional zu Belastung und Abwassertemperatur.

6.9 Schlammbehandlung

Bei Kläranlagen mit lediglich aerober Stabilisierung ist die Wirtschaftlichkeit einer anaeroben Schlammfäulung mit entsprechender Gasnutzung zu überprüfen. Dies kann bereits bei Ausbaugrößen ab 10.000 EW sinnvoll sein.

Besteht bereits eine anaerobe Schlammfäulung sind folgende Punkte zu betrachten:

- Ausnutzung des Faulraumes
- Verweilzeit im Faulbehälter überprüfen; häufig ist die tatsächliche Verweilzeit des Schlammes im Faulbehälter deutlich höher als die sinnvolle Zeit von ca. 20 - 25 Tagen
- Stilllegung einzelner Faulbehälter prüfen (bei mehreren parallelen Faulbehältern), wenn die Fäulung nicht ausgelastet ist.
- Erhöhung der Verweilzeit bei zu kleinen Faulbehältern realisieren durch zusätzliche maschinelle Überschussschlammeindickung
- Freie Kapazitäten für Co-Vergärung oder Behandlung von Fremdschlämmen prüfen, vgl. (HMUELV, 2009)
- Die Realisierung von zusätzlichem Faulbehältervolumen ist nur sinnvoll, wenn das vorhandene Volumen nachweislich zu klein ist und andere Maßnahmen (wie Überschussschlammeindickung) nicht greifen.
- Beschickung der Faulbehälter
 - Optimierung der Voreindickung des Rohschlammes
 - Möglichst kontinuierliche sowie schnelle Einmischung in die Faulbehälter
 - Ggf. Zerkleinerung (z.B. durch Mazerator) vor Beschickung
- Klärschlamm-Desintegration
 - Sinnhaftigkeit der Desintegration anhand Kosten-Nutzen-Betrachtung feststellen
 - Betriebszeit der Desintegrationsaggregate nur während der Beschickung
- Umwälzaggregate
 - Dimensionierung der Motoren
 - Art der Regelung (Intervallschaltung)
 - Laufzeit von Schwimmdeckenzerstörern
- Faulbehälterheizung
 - Optimierung der Faulraumtemperatur in Abhängigkeit von den konkreten Randbedingungen
 - Wärmeübertrag prüfen, ggf. Inkrustierung von Schlammleitungen und Wärmetauschern beheben (Fließgeschwindigkeit, Vorlauftemperatur)

- Kopplung von Beschickungs-/ Umwälzpumpe und Wärmetauscher
- Effizienz der vorhandenen Faulgasnutzung verbessern (neue BHKW-Aggregate haben i.d.R. einen deutlich verbesserten elektrischen und thermischen Wirkungsgrad), Prüfung von Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen
- Nutzung von überschüssiger Wärmeenergie
 - Schlammbehandlung (Trocknung, energetische oder stoffliche Verwertung)
 - Auskopplung von Wärmeenergie in Nah- oder Fernwärmenetze
 - Nutzung von Wärmeenergie in ORC-Anlagen oder Kalina-Cycle-Anlagen zur Erhöhung der elektrischen Stromproduktion

6.10 Prozesswasserbehandlung

Das Schlammwasser aus Vor- und Nacheindicker sowie aus der Schlammmentwässerung trägt zum Teil erheblich zu der Belastung der Kläranlage mit organischen Stoffen und insbesondere mit Stickstoff- und Phosphor-Verbindungen bei. Zur Elimination dieser Stoffe wird sehr viel Energie benötigt (z.B. für die Nitrifikation), zudem steht häufig nicht genügend organischer Kohlenstoff für eine weitergehende Stickstoffelimination, insbesondere Denitrifikation zur Verfügung.

Eine optimierte Schlammwasserbehandlung ist häufig ein wesentlicher Bestandteil einer energetischen Optimierung bei Anlagen, insbesondere mit anaerober Schlammstabilisierung.

Der Bau einer getrennten Schlammwasserbehandlungsanlage, ggf. als Annamox- / Deammonifikations-Anlage kann insbesondere unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll sein und sollte überprüft werden.

6.11 Prozessoptimierung

Eine wesentliche Einsparmöglichkeit liegt in der Prozessgestaltung und der Prozesssteuerung. Auf einige Aspekte wurde bereits oben hingewiesen. Hier sind zu nennen:

- Optimierung des Sauerstoffgehalts
- Optimierung des Schlammalters
- Optimierung der Schlammbelastung / Raumbelastung
- Optimierung der Phosphat-Elimination (Fällmitteldosierung, Bio-P-Steuerung)
- Optimierung der E-MSR-Technik
- Optimierung der Prozesssteuerung zur Stickstoffelimination

Einzelheiten über die Optimierung der Prozesssteuerung sind zum Beispiel bei Baumann und Roth (2008) nachzulesen.

6.12 Besondere Ablaufanforderungen

Besondere Anforderungen an die Ablaufqualität können zusätzliche Reinigungsmaßnahmen erforderlich machen. Es kommen vor allem folgenden Verfahren zum Einsatz:

- Abwasserfiltration
- Hygienisierung mittels UV, Ozon, Chlor
- Membranfiltration

Die Reinigungsleistungen dieser Verfahren sind in der Regel allein durch eine herkömmliche Belüftung nicht zu erzielen, die Notwendigkeit ist daher durch die jeweiligen Ablaufanforderungen gegeben. Diese Technologien erfordern aber i.d.R. einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf, so dass diese Behandlungsstufen einer genauen Betrachtung zu unterziehen sind. Mögliche Einsparpotenziale liegen bei der Filtration beispielsweise in der:

- Notwendigkeit einer Vorbelüftung
- Außerbetriebnahme einzelner Filterkammern bei geringem Zufluss
- Anpassung von Spülzyklen
- Optimierung von Pumpen und Gebläsen

Beim Einsatz getauchter Ultra- oder Mikrofiltrationsmembranen sind energetisch folgende Aspekte zu beachten:

- Belüftungsenergie für die Crossflow-Belüftung
- Belüftungsenergie zur Versorgung des belebten Schlammes, ggf. erhöhter Bedarf durch erhöhte TS-Konzentration sowie geringeren α -Wert (Sauerstoff-Übertragungsfaktor)
- Energie für Umwälz- und Permeat-Saug-Pumpen sowie Rückspülpumpen

Detaillierte Hinweise auf Energieeinsparpotenziale bei Membranfiltrationsanlagen werden hier nicht gegeben. Es wird verwiesen auf eine Studie, die derzeit (2010) in Nordrhein-Westfalen im Auftrag des MUNLV zu diesem Thema bearbeitet wird.

6.13 Energielieferverträge

In der Ausgestaltung von Energielieferverträgen existiert ein gewisser Spielraum, so dass diese unterschiedlich ausfallen können, in der Regel erfolgt die Abrechnung nach

- Vorhalteleistung (zur Abdeckung von Leistungsspitzen) und
- Arbeitspreis.

Neben den dargestellten Möglichkeiten zur Einsparung von Energie besteht eine weitere Möglichkeit der Kostenreduktion, abhängig vom jeweiligen Vertrag, durch die Glättung von Leistungsspitzen

zen. Die Tages- und Jahresganglinien der Verbrauchslast sind vom EVU zu beziehen. Die Lastspitzen können leicht durch Änderung der Intervallschaltung reduziert werden, so können beispielsweise Umwälzeinrichtungen in den Faulbehältern alternierend betrieben werden.

Nach Auswertung der Ganglinien der Verbrauchslast kann mit Hilfe von Softwarelösungen ein automatischer Lastabwurf oder ein Energiemanagementsystem realisiert werden. Derartige Maßnahmen sind unter Vorbehalt der Betriebssicherheit und Reinigungsleistung durchzuführen und im Einzelfall auf Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, den aus Faulgas erzeugten elektrischen Strom in das Netz einzuspeisen. Die Vergütung durch den Netzbetreiber wird durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) geregelt. Die aktuellen Vergütungssätze liegen bei 7,11 Cent pro kWh, bei Anlagen bis zu 500 kW, bei einer Anlagengröße von bis zu 5 MW, bei 6,16 Cent. Die Wirtschaftlichkeit der Einspeisung ist vom Energieliefervertrag abhängig und daher im Einzelfall zu prüfen.

Nach den Regelungen des EEG 2009 kann eine Vergütung für Klärgas (7,11 Cent pro kWh oder 6,16 Cent pro kWh) nur durch den Technologiebonus (z.B. Mikrogasturbine) aufgewertet werden. Der Einsatz von Co-Fermenten führt zu keiner Aufwertung.

7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ein entscheidendes Kriterium für die Umsetzung einer Energiesparmaßnahme ist die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme. Voraussetzung ist, dass die Reinigungsleistung und Betriebssicherheit der Abwasserbehandlungsanlage nicht nachteilig beeinflusst wird. In der Praxis werden Energiesparmaßnahmen in der Regel nur realisiert werden, wenn sie sich wirtschaftlich darstellen lassen. Dabei sind neben den Investitionen auch die Betriebskosten zu betrachten. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird anhand der Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (LAWA, 2005) durchgeführt.

Neben einer realistischen Betrachtung der Betriebskosten ist hier eine ebenso realistische Betrachtung der angesetzten Nutzungsdauer von besonderer Bedeutung.

Für die erste Analyse nach der Aufnahme des Ist-Zustandes wird das Verfahren der Kosten-/Nutzenanalyse verwendet. Die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen, die im Rahmen der Zwischenbesprechung als besonders Erfolg versprechend identifiziert wurden, ist mit entsprechend abgesicherten Daten im Rahmen einer Projektkostenbarwert-Ermittlung detailliert zu untersuchen.

7.1 Kosten-Nutzen-Analyse

Für Verfahrensstufen mit aufgezeigtem Optimierungsbedarf sind die Alternativen darzustellen. Die zusätzlich nötigen jährlichen Kapital- und Betriebskosten der Maßnahme, zusammengefasst als Jahreskosten, sind dem Jahresnutzen in Form von jährlicher Energie- und Betriebskosteneinsparung gegenüberzustellen. Unterschreiten die jährlichen Kosten den jährlichen Nutzen, so handelt

es sich um eine wirtschaftliche Investition, deren Umsetzung im Rahmen der weiteren Analysen weiter zu prüfen ist.

Kosten (€/ a):

- durch Mehr-Investitionen entstehende zusätzliche Kapitalkosten,
- zusätzlicher Mehraufwand für Wartung und Unterhalt
- ggf. erforderliche zusätzliche oder andere Betriebskosten

Nutzen (€/ a):

- Einsparung an Energiekosten
- Einsparung von Betriebs- und Wartungskosten

Die Kosten-Nutzen-Betrachtung wird in Form einer Vergleichsrechnung durchgeführt und vernachlässigt mögliche Preissteigerungen bei den laufenden Kosten (Betriebs- und Energiekosten).

Die jährlichen Kapitalkosten der Maßnahme werden mittels des Kapitalwiedergewinnungsfaktors (auch Annuitätenfaktor) unter Berücksichtigung der spezifischen realistisch anzusetzenden Nutzungsdauer und des anzusetzenden Zinssatzes berechnet.

$$\text{KFAKR}_{(i;n)} = \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

KFAKR: Kapitalwiedergewinnungsfaktor (-)

i: Zinssatz (%)

n: Nutzungsdauer (a)

$$K_i = I_e * \text{KFAKR}$$

K_i : Kapitalkosten bedingt durch energetische Mehr-Investition (€/ a)

I_e : Energetische bedingte Mehr-Investition (€)

KFAKR: Kapitalwiedergewinnungsfaktor (-)

Die durch die Energiesparmaßnahme verursachten jährlichen Kapitalkosten (K_i) fließen zusammen mit den übrigen Kosten sowie den Einsparungen in die Kosten-Nutzen-Analyse ein und bestimmen die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme.

$$\frac{K}{N} = \frac{K_i + K_u}{N_e + N_b}$$

K: Mehrkosten einer Energiesparmaßnahme (€/ a)

- N: Nutzen einer Energiesparmaßnahme durch Einsparungen (€/ a)
- K_i: Kapitalkosten bedingt durch energetische Mehr-Investition (€/ a)
- K_u: Zusätzliche Unterhalts- und Betriebskosten einer Energiesparmaßnahme (€/ a)
- N_e: Nutzen einer Energiesparmaßnahme durch Einsparung von Energiekosten (€/ a)
- N_b: Nutzen einer Energiesparmaßnahme durch Einsparung von Betriebskosten (€/ a)

Anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses wird die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme deutlich. Je weiter die jährlichen Kosten den Nutzen unterschreiten bzw. umso kleiner der Faktor ist, desto wirtschaftlicher ist die geplante Maßnahme. Im Rahmen der Energieeffizienzanalyse werden die Einzelmaßnahmen, soweit keine betriebstechnischen Probleme einer Umsetzung im Wege stehen, nach ihrem Kosten-Nutzen-Verhältnis gruppiert (Tab. 9).

Tab. 9: Bildung von Maßnahmenpaketen nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis der Einzelmaßnahmen

Kosten-Nutzen-Verhältnis	Maßnahmenpaket
< 0,3	Sofort zu realisierende Maßnahme
0,3 - < 0,7	Kurzfristige zu realisierende Maßnahme
0,7 - ≤ 1	Maßnahme mit einer langfristigen Wirtschaftlichkeit
≥ 1	Maßnahme unwirtschaftlich, nur bei besonderem Interesse realisierbar

7.2 Projektkostenbarwert

Die im Rahmen der Zwischenbesprechung als besonders Erfolg versprechend aufgezeigten Maßnahmen werden einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen. Diese ist durch eine Sensitivitätsanalyse zu ergänzen (vgl. Kapitel 7.3). Um verlässliche Aussagen zu treffen, müssen die Daten, die in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fließen, mindestens die Qualität einer Kostenschätzung im Rahmen der Vorplanung aufweisen.

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wird anhand der Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (LAWA, 2005) durch die Analyse der Projektkostenbarwerte vorgenommen. Dabei wird die Ist-Situation kostenmäßig mit möglichen Alternativen verglichen. Voraussetzung für den Kostenvergleich ist, dass die geforderte Leistung von allen Alternativen (inkl. der Ist-Situation) über die gleiche Nutzungsdauer gewährleistet wird. Es sind daher auch planbare Ersatzinvestitionen zu berücksichtigen.

Der Untersuchungszeitraum ist unter Berücksichtigung der zu vergleichenden Varianten festzulegen, dabei darf keine Variante durch Nicht-Ausnutzung ihrer zu erwartenden Nutzungsdauer benachteiligt werden. Die Verwendung von unrealistisch langen Untersuchungszeiträumen und dadurch bedingten vielfachen Ersatzinvestitionen ist ebenfalls unzulässig, da dadurch eine Weiterentwicklung (technisch, rechtlich etc.) außer Acht gelassen würde.

7.3 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hängen immer auch von den getroffenen Annahmen ab. Das Erstellen einer Sensitivitätsanalyse ist anzuraten, um die Abhängigkeit der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von getroffenen Annahmen bezüglich der Preisentwicklung zu überprüfen. Parameter für die Sensitivitätsanalyse sind:

- Energiekosten
- Unterhaltungskosten (Personal- und Sachkosten)
- realer Zinssatz
- Nutzungsdauer

Die Entwicklung der Energiekosten ist mit großen Unwägbarkeiten behaftet, eine weitere Steigerung ist zu erwarten, in welcher Höhe diese ausfällt, ist offen. Daher empfiehlt es sich, die Energiekosten einer separaten Betrachtung zu unterziehen. Für die gesamten laufenden Kosten (Mischindex aus Personal-, Sach-, und Energiekosten) sind nach (LAWA, 2005) maximale reale Preissteigerungen von 3 % p. a. anzunehmen, „realistische und begründbare Prognosewerte“ werden im Bereich von 0 – 1 % p. a. gesehen. Als langfristiger realer Zinssatz wird nach (LAWA, 2005) 3 % p. a. als Standardwert empfohlen (Bandbreite zwischen 2 und 5 % p. a.). Besonders die Prognose der Preisentwicklung bei den Energiekosten hat einen großen Einfluss auf die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von energiesparenden Verfahren und damit auf deren Umsetzung.

Aus einer Sensitivitätsanalyse lassen sich kritische Werte ableiten, bei deren Über- bzw. Unterschreitung das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kippt. In Tab. 10 sind Szenarien für eine Sensitivitätsanalyse aufgeführt

Tab. 10: Szenarien für eine Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Parameter	geringe Steigerung	moderate Steigerung	starke Steigerung
Energiekosten	+ 1 % p. a.	+ 3 % p. a.	+ 5 % p. a.
Unterhaltungskosten	-	+ 1 % p. a.	+ 3 % p. a.
realer Zinssatz	2 % p. a.	3 % p. a.	5 % p. a.
	Veränderung der angesetzten Nutzungsdauer		
Nutzungsdauer	- 10 %		+ 10 %

Literatur

- ATV-DWVK (2000): Arbeitsblatt 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, ATV-DWVK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.,.
- ATV-DWVK (2003): Arbeitsblatt 198 Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, ATV-DWVK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.,.
- Baumann, P. und M. Roth (2008): Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen (Heft 4,), Leitfaden für das Betriebspersonal DWA Landesverband Baden-Württemberg.
- DIN (2005): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005), e.V., DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Haberkern, B. ; W. Maier und U. Schneider (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen, in: Umweltbundesamt Texte 11/08.
- HMUELV (2009): Arbeitshilfe - Co-Vergärung organischer Materialien in Faulbehältern von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden;
(www.hmuelv.hessen.de -> Umwelt -> Gewässerschutz -> Kommunales Abwasser -> Energieeffizienz)
- LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen 7. Auflage, (LAWA), Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin. (siehe www.LAWA.de -> Publikationen)
- LfU (1998): Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen, 1. Auflage, Handbuch Wasser 4, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Müller, E. A.; B. Kobel; T. Künti; J Pinnekamp; G. Seibert-Erling; R. Schaab und K. Böcker (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

A. Erfassung der Basisdaten

Name der Anlage und Anschrift:

Betreiber:

Verantwortlich für die Datenerfassung:

Einzugsgebiet:

Daten	Einheit	Wert
Ausbau		
Einwohnerwerte Ausbau 85%-Wert	EW _{60, 85-Perc.}	
Einwohnerwert Ausbau Mittelwert	EW _{60, Mittel}	
Angeschlossene natürliche Einwohner	Einwohner	
Abwasseranfall am Zulauf ¹ , aktueller Jahreswert	m ³ / a	
Jahresschmutzwassermenge	m ³ / a	

Aktuelle Zulaufbelastung ¹,	Jahr	
BSB₅ im Zulauf, Mittelwert	mg / l	
BSB ₅ -Fracht im Zulauf, Mittelwert	kg / d	
Einwohnerwert Mittelwert bez. auf 60 g BSB ₅ / (EW*d)	EW _{60, Mittel}	
BSB ₅ im Zulauf, 85-Percentilwert	mg / l	
BSB ₅ -Fracht im Zulauf, 85-Percentilwert	kg / d	
Einwohnerwert 85%-Perc. bez. auf 60 g BSB ₅ / (EW*d)	EW _{60, 85-Perc.}	

¹ Ohne interne Rückbelastung

	Einheit	Wert
CSB im Zulauf, Mittelwert	mg / l	
CSB-Fracht im Zulauf, Mittelwert	kg / d	
Einwohnerwert Mittelwert bez. auf 120 g CSB / (EW*d)	EW _{120, Mittel}	
CSB im Zulauf, 85-Percentilwert	mg / l	
CSB-Fracht im Zulauf, 85-Percentilwert	kg / d	
Einwohnerwert 85-%-Perc. bez. auf 120 g BSB / (EW*d)	EW _{120, 85-Perc.}	
N_{ges} im Zulauf (N _{anorg.} + N _{org.}), Mittelwert	mg / l	
N _{ges} - Fracht im Zulauf (N _{anorg.} + N _{org.}), Mittelwert	kg / d	
Einwohnerwert Mittelwert bez. auf 11 g N / (EW*d)	EW _{11, Mittel}	
P_{ges} im Zulauf, Mittelwert	mg / l	
P _{ges} - Fracht im Zulauf, Mittelwert	kg / d	
Einwohnerwert Mittelwert bez. auf 1,8 g P / (EW*d)	EW _{1,8, Mittel}	

Besonderheiten:

(z.B. stark voneinander abweichende EW-Werte bei den verschiedenen Parametern)

bitte erläutern

Prozess		
Hebewerke, Förderhöhe der Einlauf und Zwischenhebewerke bezogen auf die gesamte Abwassermenge (ohne Filtration)	m	
Vorklärung	ja / nein	
Verweilzeit bei Regenwetter	h	
Nitrifikation	ja / nein	
Verfahren		
Denitrifikation	ja / nein	
Verfahren		
Festbettverfahren	ja / nein	
Verfahren		
Schlammalter in der Belebung	d	
Schlammbelastung	kg BSB ₅ / (kg TS * d)	
TS im Belebungsbecken	g / l	
O ₂ -Gehalt im Belebungsbecken	mg / l	
Anaerobe Schlammbehandlung (Faulung)	ja / nein	
Flockungsfiltration, Sandfilter im Ablauf	ja / nein	
Membranfiltration als Ablauffiltration	ja / nein	
Membranbelebungsanlage	ja / nein	
Klärschlamm-trocknung	ja / nein	
Verfahren		
Abwasserdesinfektion	ja / nein	
Verfahren		
Abluftbehandlung	ja / nein	
Verfahren		

Schlammengen		
Rohschlammanfall, aktueller Jahreswert	m ³ / a	
TR im Rohschlamm,	Mg TR / a	
oTR im Rohschlamm	Mg oTR / a	
Primärschlammanfall, aktueller Jahreswert	m ³ / a	
TR im Primärschlamm	Mg TR / a	
oTR im Primärschlamm	Mg oTR / a	
Überschussschlammanfall, aktueller Jahreswert	m ³ / a	
TR im Überschussschlamm	Mg TR / a	
oTR im Überschussschlamm	Mg oTR / a	
Schlammverwertung / Entsorgung		
Schlammmentwässerung	ja / nein	
Landwirtschaftliche Verwertung	ja / nein	
Menge pro Jahr	m ³ / a bzw. t/a	
TS-Gehalt	%	
Landschaftsbau / Kompostierung	ja / nein	
Menge pro Jahr	m ³ / a bzw. t/a	
TS-Gehalt	%	
Verbrennung	ja / nein	
Menge pro Jahr	m ³ / a bzw. t/a	
TS-Gehalt	%	
Sonstige Verwertung / Entsorgung (bitte beschreiben)		
Menge pro Jahr	m ³ / a bzw. t/a	
TS-Gehalt	%	

Anaerobe Schlammbehandlung (Faulung)		
Faulbehältervolumen	m ³	
Anzahl Faulbehälter	-	
Aufenthaltszeit t _R	d	
TR-Gehalt im Zulauf der Faulbehälter	TR [%]	
Eintrag an oTR durch Rohschlamm in die Faulbehälter	Mg oTR / a	
Faulschlammanfall, aktueller Jahreswert	m ³ / a	
Eintrag von Co-Substraten in die Faulbehälter	ja / nein	
Co-Substrat 1,	Bezeichnung	
Menge von Co-Substrat 1, aktueller Jahreswert	[Mg / a]; [m ³ / a]	
Trockenrückstand	TR [%]	
Glühverlust	GV [% TR]	
Organischer Trockenrückstand	oTR [%]	
Co-Substrat 2,	Bezeichnung	
Menge von Co-Substrat 2, aktueller Jahreswert	[Mg / a]; [m ³ / a]	
Trockenrückstand	TR [%]	
Glühverlust	GV [% TR]	
Organischer Trockenrückstand	oTR [%]	
Weitere Co-Substrate bitte auf separatem Blatt		
Desintegration	ja / nein	
Verfahren		

Faulgas / Klärgas		
Gesamte Faulgasproduktion, aktueller Jahreswert	m ³ / a	
Gesamte Faulgasproduktion normiert , aktueller Jahreswert	Nm ³ / a	
Heizwert des Faulgases, Messwert (falls vorhanden)	kWh / Nm ³	
CH ₄ -Gehalt des Faulgases, Jahresmittel	Vol.-%	
Faulgasnutzung zur Elektrizitätserzeugung	ja / nein	
Eingesetzte Technik zur Elektrizitätserzeugung (BHKW, Mikrogasturbine, Brennstoffzelle etc.)		
Hersteller, Modell		
Elektrische Leistung	kW	
Eingesetzte Faulgasmenge (normiert) zur Elektrizitätserzeugung	Nm ³ / a bzw. m ³ / a	
Faulgasnutzung (Faulgasmenge normiert) durch Heiz- kessel zur Erzeugung thermischer Energie, aktueller Jahreswert	Nm ³ / a bzw. m ³ / a	
Faulgasverkauf, aktueller Jahreswert	Nm ³ / a	
Erlös durch Faulgasverkauf, aktueller Jahreswert	€ / Nm ³	
Abfackelung von Faulgas, aktueller Jahreswert	Nm ³ / a bzw. m ³ / a	
Elektrizität		
Gesamter Elektrizitätsverbrauch der Kläranlage, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Elektrizitätsproduktion, die intern genutzt wird, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Ankauf von Elektrizität beim EVU, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Verkauf von Elektrizität an den EVU, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Elektrizitätsverbrauch der Belüftung, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Kosten für Elektrizität gemäß Rechnung des EVU, aktueller Jahreswert	€ / a	
Kosten für Elektrizität gemäß Vertrag mit dem EVU	€ / kWh	

Wärmeenergie		
Wärmeproduktion durch Heizkessel, die intern genutzt wird, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Wärmeproduktion durch BHKW, die intern genutzt wird, aktueller Jahreswert	MWh / a	
Wärmeabgabe an externe Verbraucher	MWh / a	
Erlös durch Wärmeabgabe an externe Verbraucher	€/ a	
Einkauf von Fremdenergie zur Wärmeproduktion (Erdöl, Erdgas, etc.), aktueller Jahreswert	MWh / a	
Kosten für den Einkauf von Wärmeenergie (Erdöl, Erdgas, etc.)	€/ a	

Weitere Unterlagen:

- Betriebstagebuch
- Energieliefervertrag mit dem EVU
- ggf. Einspeisevertrag mit dem EVU
- ggf. Wärmelieferungsvertrag

B Aggregatliste

Verfahrensstufe:

Motoren mit konstanter Drehzahl

Aggregat [Bezeichnung, Hersteller]	Installierte Leistung [kW]	Betriebsstunden [h/a]	Verbrauch [MWh/a]	Anschaffungsjahr [Datum]	Art der Messung [Zähler, Kurzzeit, Überschlag]

Motoren mit Drehzahlsteuerung durch Frequenzumrichter

Aggregat [Bezeichnung, Hersteller]	Installierte Leistung [kW]	mittlere Leistung [kW]	Betriebsstunden [h/a]	Verbrauch [MWh/a]	Anschaffungsjahr [Datum]	Art der Messung [Zähler, Kurzzeit, Überschlag]

Motoren mit abgestufter Drehzahl

Aggregat [Bezeichnung, Hersteller]	Installierte Leistung [kW]	abgestufte Leistung [kW]	Betriebsstunden [h/a]	Verbrauch [MWh/a]	Anschaffungsjahr [Datum]	Art der Messung [Zähler, Kurzzeit, Überschlag]