



Zentrum für Innovative
AbWassertechnologien
an der TU Kaiserslautern



Siedlungswasser-
wirtschaft und
Wasserbau

Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwas- serreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz



- ZEBRAS -

im Auftrag des
*Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes
Rheinland-Pfalz*


Schlussbericht

Juli 2018

Projektpartner

	Zentrum für innovative AbWasser- technologien an der Technischen Universität Kaiserslautern Paul-Ehrlich-Str. 14 67663 Kaiserslautern	Dr.-Ing. Henning Knerr Dipl.-Ing. Timo Dilly Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt
	Fachgebiet Siedlungswasserwirt- schaft und Wasserbau Universität Luxembourg Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation Campus Kirchberg L-1359 Luxembourg	Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen Dr.-Ing. Sebastian Hien

Im Unterauftrag

	Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH Segbachstr. 9 56743 Thür	Dr.-Ing. Klaus Siekmann Dipl.-Ing. Jürgen Jakob Dr.-Ing. Thomas Siekmann
---	--	--

Zitiervorschlag

Schmitt, T. G.; Knerr, H.; Dilly, T. C.; Hansen, J.; Hien, S.; Siekmann, T.: „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS“. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz. Deutschland. Schlussbericht 2018.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes „**Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS**“ wurden Ansätze entwickelt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt "Faulung" bei bestehenden Kläranlagen mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung (sogenannte Faulungsanlagen) optimiert werden kann.

Grundlage des Projektes **ZEBRAS** stellt eine detaillierte **Bestandsaufnahme** der Basisdaten der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz (RLP) dar. In die Auswertung sind Daten aus insgesamt 64 von insgesamt 84 Faulungsanlagen (Bezugsjahr 2014) eingeflossen. Da sich alle großen Anlagen an der Befragung beteiligt haben, sind bezogen auf die Gesamtausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen 88 % der Ausbaugröße erfasst. Für eine Klassifizierung der Anlagen wurde eine Einteilung nach mittlerer Anschlussbelastung, basierend auf einer einwohnerspezifischen CSB-Fracht von 120 g/(E·d), vorgenommen.

Die resultierenden **Kennwerte** der Raumbelastungen, der Faulzeiten und Faulraumvolumina zeigen, dass der überwiegende Teil der Faulungsanlagen in RLP freie Faulraumkapazitäten aufweist. Zudem zeigt die Analyse des Ist-Zustandes, dass auch in den Bereichen Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Faulgasverwertung Ansätze für eine Optimierung zu erkennen sind. Die Ergebnisse der Bestandsanalyse sind im Sachstandsbericht 2016 (Knerr et al. 2016) veröffentlicht.

Das daraus erschließbare **Potenzial zur Steigerung der Stromproduktion** im Bestand wurde im Rahmen einer Potenzialabschätzung ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen ein beachtliches Potenzial zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung und damit der Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen in RLP erkennen (siehe Abbildung 1).

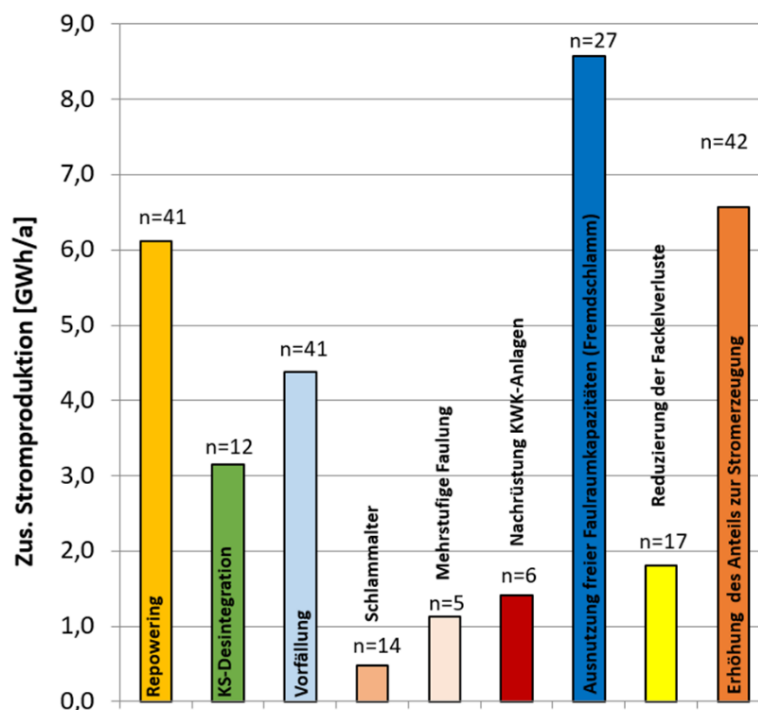


Abbildung 1: Vergleich der verschiedenen Maßnahmen

Die **Potenzialabschätzung** zeigt, dass die Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen in RLP deutlich gesteigert werden kann. Das größte Potenzial ist mit 8,6 GWh_{el}/a bei der Ausnutzung der freien Faulraumkapazitäten vorhanden. Durch Repowering alter KWK-Anlagen könnte die Stromerzeugung um 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden. Eine vollständige Verwertung des Klärgases zur Stromerzeugung würde theoretisch eine Steigerung der Stromerzeugung um 6,6 GWh_{el}/a ermöglichen. Für die Maßnahmen Anpassung des Schlammalters, Etablierung einer Mehrstufigen Faulung, die Nachrüstung von KWK-Anlagen, die Reduzierung von Fackelverlusten und die Implementierung einer Klärschlamm-Integration oder einer Vorfällung lassen sich Potenziale zwischen 0,5 und 4,4 GWh_{el}/a abschätzen.

Ziel bei der **Optimierung von Faulungsanlagen** sind die energetische Optimierung der Anlagen, die Reduzierung der Schlammengen für die Entsorgung und die Sicherstellung der Abwasserreinigung auf einem hohen Niveau. Bei der Entwicklung von Optimierungsstrategien für Faulungsanlagen ist es wichtig, die Auswirkungen von Umstellungen auf die Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung zu berücksichtigen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verfahrensstufen bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen zu beachten. Die einzelnen Optimierungsansätze bei der **Abwasserreinigung**, der **Schlammbehandlung** und der **Gasverwertung** (Abbildung 2) werden daher nicht losgelöst voneinander betrachtet. Insgesamt wurden 16 Optimierungsansätze berücksichtigt.

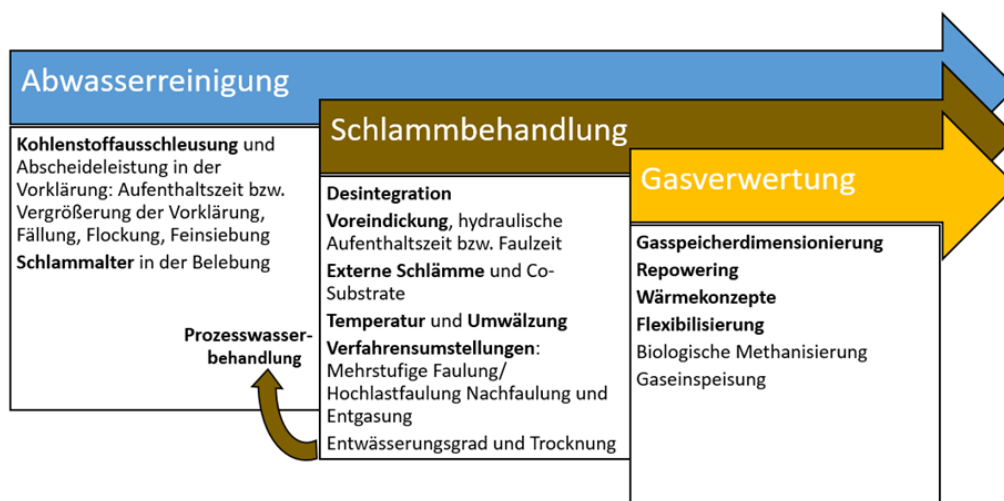


Abbildung 2: Optimierungsansätze in der Verfahrenskette von Faulungsanlagen (Dilly et al. 2017)

Es wurden 13 **Checklisten** erarbeitet, die den handelnden Personen (z. B. Kläranlagenbetreibern, Planern und Entscheidungsträgern) die Optimierungspotenziale der eigenen Anlage aufzuzeigen und eine Vorgehensweise zur **Identifizierung der Potenziale** an die Hand geben. Diese können als Grundlage für eine Optimierung dienen. Der Aufbau der Checklisten wird im Detail dargestellt und die Entwicklung der Checklisten am Beispiel „Abscheideleistung in der Vorklärung“ verdeutlicht.

Mit Hilfe der Checklisten und dem entwickelten Datenkatalog kann ein individuelles Konzept zur Optimierung einer Faulungsanlage erstellt werden.

Folgende Checklisten werden vorgestellt und erläutert:

- Abscheideleistung in der Vorklärung
- Schlammalter in der Belebung
- Desintegration von Überschussschlamm
- Verbesserung der Überschussschlammeindickung
- Faulraumkapazität
- Gasanfall und -verwertung
- Durchmischung der Faulbehälter
- Gasspeicher
- KWK-Anlage
- Flexibilitäts- und Speicherkonzept
- Schlammverwertung
- Wärmemanagement
- Faulbehälter als Wärmespeicher

Die **Anwendung der Checklisten** wurde an vier rheinland-pfälzischen Faulungsanlage beispielhaft durchgeführt. Abgesehen von der Darstellung der Vorgehensweise bei der Identifizierung des Optimierungspotenzials werden die Praxistauglichkeit sowie die Potenziale und Grenzen bei der Nutzung der Checklisten aufgezeigt.

Bereits existierende Instrumente zur energetischen Optimierung von Abwasseranlagen, werden mit den hier entwickelten Checklisten um einen weiteren Schritt ergänzt. Die entwickelten Checklisten zeigen systematisch Ansatzpunkte zur energetischen und verfahrenstechnischen Optimierung der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung und Faulgasverwertung auf. Für Faulungsanlagen, die beim Energiecheck und der Energieanalyse bereits sehr gut abschneiden, bieten die entwickelten Checklisten die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen, da auch Umstellungen der Verfahrensführung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden.

Die erzielten **Ergebnisse** stellen eine gute Grundlage zur Umsetzung einer zukunftsfähigen Gestaltung der Schlammbehandlung und Faulgasverwertung dar, womit eine konsequente Fortschreibung des in Rheinland-Pfalz eingeschlagenen Weges erfolgt, eine ökologische und energieeffiziente Abwasserbehandlung weiter voranzutreiben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Bestandsanalyse	4
2.1 Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags	6
2.2 Faulgasverwertung	8
2.3 Energetische Kenngrößen	10
3 Potenzialabschätzung in Rheinland-Pfalz	12
3.1 Ausnutzung von Kapazitätsreserven der Faulung	13
3.1.1 Grundlagen	13
3.1.2 Potenzial	16
3.2 Steigerung der Primärschlammmentnahme	18
3.2.1 Grundlagen	18
3.2.2 Potenzial	18
3.3 Senkung des Schlammalters in der Belebung	19
3.3.1 Grundlagen	19
3.3.2 Potenzial	19
3.4 Nachrüstung mit effizienten KWK-Anlagen	20
3.4.1 Grundlagen	20
3.4.2 Potenzial	20
3.5 Repowering vorhandener KWK-Anlagen	21
3.5.1 Grundlagen	21
3.5.2 Potenzial	21
3.6 Klärschlammdeintegration	22
3.6.1 Grundlagen	22
3.6.2 Potenzial	23
3.7 Mehrstufiger Betrieb	24
3.7.1 Grundlagen	24
3.7.2 Potenzial	26
3.8 Optimierte der Faulgasverwertung zur Stromerzeugung	27

3.8.1	Grundlange	27
3.8.2	Potenziale Faulgasverwertung zur Stromerzeugung.....	27
3.9	Maßnahmenvergleich	29
4	Entwicklung von Optimierungsstrategien	32
4.1	Ansätze	32
4.1.1	Abwasserreinigung	32
4.1.2	Schlammbehandlung.....	33
4.1.3	Gasverwertung	34
4.2	Checklisten	35
4.2.1	Einsatz von Checklisten und deren allgemeiner Aufbau	35
4.2.2	Einheitliche Ermittlung der Eingangsdaten	37
4.2.3	Erkennen des Optimierungspotenzials.....	38
4.2.4	Aufzeigen von Maßnahmen zur Optimierung	38
4.2.5	Darstellung von Auswirkungen auf die Verfahrenskette	39
4.2.6	Umsetzung der Optimierungsstrategie	40
5	Checklisten zur Optimierung von Kläranlagen mit Faulung	41
5.1	Abscheideleistung in der Vorklärung	41
5.1.1	Eingangsdaten	43
5.1.2	Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung	44
5.1.3	Auswirkungen auf die Verfahrenskette.....	45
5.2	Schlammalter in der Belebung	49
5.3	Desintegration von Überschussschlamm	51
5.4	Verbesserung der Überschussschlammeindickung.....	54
5.5	Faulraumkapazität.....	56
5.6	Gasanfall und -verwertung.....	58
5.7	Durchmischung der Faulbehälter	60
5.8	Gasspeicher	62
5.9	KWK-Anlage.....	64
5.10	Flexibilitäts- und Speicherkonzept	67
5.11	Schlammverwertung	70
5.12	Wärmemanagement	72
5.13	Faulbehälter als Wärmespeicher.....	74
6	Anwendung der Checklisten an Beispielanlagen.....	75
6.1	Kläranlage Mayen.....	76

6.1.1	Allgemein.....	76
6.1.2	Checkliste A: Abscheideleistung in der Vorklärung.....	77
6.1.3	Checkliste B: Schlammalter in der Belebung.....	79
6.1.4	Checkliste F: Faulraumkapazitäten.....	85
6.1.5	Checkliste G: Gasanfall und -verwertung.....	92
6.2	Kläranlage Kaiserslautern.....	95
6.2.1	Checkliste D: Desintegration von Überschussschlamm.....	96
6.2.2	Checkliste E: Eindickung von Überschussschlamm.....	99
6.3	Kläranlage Oberkyll.....	101
6.3.1	Variante 1: Ausgangsszenario 0,75 – 1 h Aufenthaltszeit.....	106
6.3.2	Variante 2: Aufenthaltszeit auf 1,5 – 2 h erhöhen.....	106
6.3.3	Variante 3: Aufenthaltszeit auf über 2,5 h erhöhen.....	107
6.3.4	Vergleich der Varianten.....	107
6.3.5	Betrachtung einer Anlage mit Zulaufbedingungen nach DWA.....	108
6.4	Kläranlage Untere Selz.....	112
6.4.1	Allgemein.....	112
6.4.1.1	Abwasserweg.....	112
6.4.1.2	Schlammweg.....	113
6.4.2	Checkliste A: Aufenthaltszeit in der Vorklärung.....	114
6.4.3	Checkliste M: Durchmischung Faulbehälter.....	115
6.4.4	Checkliste S: Gasspeicher.....	117
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	118
8	Anhang.....	121
8.1	Datenkatalog.....	121
8.1.1	EW_{120} : Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht (A.1).....	121
8.1.2	$b_{TM,PS,d}$: Einwohnerspezifischer Primärschlammfall (A.1).....	122
8.1.3	t_{VK} : Aufenthaltszeit in der Vorklärung (A.1).....	123
8.1.4	C:N-Verhältnis im Zulauf zur Belebung (A.4).....	124
8.1.5	$B_{TM,PS,NEU}$: Primärschlammfall (A.4).....	126
8.1.6	$t_{TS,vorh.}$: Vorhandenes Schlammalter in der Belebung (B.1).....	127
8.1.7	$t_{TS,erf.}$: Erforderliches Schlammalter (B.2).....	128
8.1.8	Überschlägige Ermittlung des benötigten Feststoffgehalts in der Belebung (B.2).....	132
8.1.9	t_{FB} : Faulzeit (D.2/F.1).....	133
8.1.10	Y_{FG} : spezifische Faulgasproduktion (D.1).....	135

8.1.11	η_{oTM} : Abbaugrad der organischen Feststoffe bei der Faulung (D.4)	136
8.1.12	Bestimmung des max. Inputs zur Ausnutzung der freien Kapazitäten (F.2)	137
8.1.13	Bestimmung der organischen Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe (F.3)...	138
8.1.14	Faulgasproduktion (G.1)	140
8.1.15	Max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage (G.2)	141
8.1.16	$\eta_{KWK,el}$, g_{CH_4} und E_{Bedarf} (G.3)	142
8.1.17	Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrads:.....	143
8.2	Faulgasanfall und CSB-Bilanz	144
8.3	Prozesswasserbehandlung: Deammonifikation	145
9	Literaturverzeichnis	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau des Berichtes.....	3
Abbildung 2.1:	Klassierung der KA nach mittlerer Anschlussbelastung (Knerr et al. 2016)	4
Abbildung 2.2:	Jährliche Gasproduktion der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen in m ³ /a (n = 64)	8
Abbildung 2.3:	Anteil der zur Stromerzeugung verwerteten Faulgasmenge (n = 61)	9
Abbildung 2.4:	Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch der Faulungsanlagen in RLP im Vergleich zu den Kennwerten des Arbeitsblattes DWA-A 216 (DWA 2015d)	10
Abbildung 3.1:	Konzept des Kommunalen Klärschlammbehandlungszentrums Selters (DWA 2015a)	15
Abbildung 3.2:	Co-Substratzugabe und Gasanfall, KA-Bitburg-Ost (Stadtwerke Bitburg ohne Datum).....	16
Abbildung 3.3:	Kapazitätsreserven der Faulung zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen	17
Abbildung 3.4:	Anteil der Fackelverluste je Faulungsanlage der jährlichen Gasproduktion (n= 61)	27
Abbildung 3.5:	Potenziale der untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Stromproduktion der Faulungsanlagen in RLP	30
Abbildung 3.6:	Vergleich der verschiedenen Maßnahmen	31
Abbildung 4.1:	Optimierungsansätze in der Verfahrenskette von Faulungsanlagen	32
Abbildung 4.2:	Übersicht und Verknüpfung der Checklisten.....	36
Abbildung 4.3:	Checkliste Abscheideleistung in der Vorklärung und deren Verknüpfungen.....	37
Abbildung 4.4:	Ermittlung der Eingangsdaten - Checklistenbeispiel	38
Abbildung 4.5:	Erkennen des Optimierungspotenzials - Checklistenbeispiel.....	38
Abbildung 4.6:	Maßnahmen zur Optimierung - Checklistenbeispiel	39
Abbildung 4.7:	Auswirkungen auf die Verfahrenskette - Checklistenbeispiel.....	40
Abbildung 4.8:	Umsetzung der Optimierungsstrategie – Checklistenbeispiel	40
Abbildung 5.1:	Checkliste A - Abscheideleistung in der Vorklärung.....	42
Abbildung 5.2:	Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung	45
Abbildung 5.3:	Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette und Umsetzung der Optimierungsstrategie.....	48
Abbildung 5.4:	Checkliste B – Schlammalter in der Belebung	50
Abbildung 5.5:	Checkliste D – Desintegration von Überschussschlamm.....	53
Abbildung 5.6:	Voreindickung des Überschussschlammes, bezogen auf Einwohnerwerte (EW) Datenbasis: 97 Mio. (DWA 2007)	54
Abbildung 5.7:	Checkliste E – Eindickung von Überschussschlamm.....	55
Abbildung 5.8:	Checkliste F - Faulraumkapazitäten.....	57
Abbildung 5.9:	Checkliste G – Gasanfall und -verwertung	59
Abbildung 5.10:	Checkliste M – Durchmischung des Faulbehälters.....	61
Abbildung 5.11:	Checkliste S - Gasspeicher	63
Abbildung 5.12:	Checkliste K – KWK-Anlage.....	66
Abbildung 5.13:	Checkliste FS – Flexibilität und Speicherkonzept	69
Abbildung 5.14:	Checkliste V – Schlammverwertung	71

Abbildung 5.15:	Checkliste W - Wärmemanagement.....	73
Abbildung 5.16:	Checkliste WS – Faulbehälter als Wärmespeicher	74
Abbildung 6.1:	Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Mayen.....	76
Abbildung 6.2:	Eingangsdaten in die Checkliste A: „Abscheideleistung in der Vorklärung“	77
Abbildung 6.3:	Beispiel „ Abscheideleistung in der Vorklärung“ für die Kläranlage Mayen	79
Abbildung 6.4:	Tägliche Belüftungszeit im Jahr 2016 der Kläranlage Mayen.....	80
Abbildung 6.5:	Diagramm zu Bestimmung des erforderlichen aeroben Schlammalters (siehe Anhang Abbildung A).....	81
Abbildung 6.6:	Diagramm zu Bestimmung des erforderlichen Gesamtschlammalters (siehe Anhang Abbildung D).....	82
Abbildung 6.7:	Erkennung des Optimierungspotenzials bezogen auf das Schlammalter in der Belebung.....	82
Abbildung 6.8:	Überschlägige Ermittlung des benötigten TS-Gehalts.....	84
Abbildung 6.9:	Maßnahmen zur Optimierung - Entscheidungsfindung	85
Abbildung 6.10:	Ermittlung der Faulzeit zur Erkennung des Optimierungspotenzials bei der Checkliste Faulraumkapazitäten.....	86
Abbildung 6.11:	Kläranlagenstandorte inklusive der Anschlussgröße (Einwohner + Einwohnergleichwert) im Umkreis der Kläranlage Mayen (Quelle: geoportal-wasser.rlp.de).....	87
Abbildung 6.12:	Anwendung der Checkliste F (Faulraumkapazitäten).....	88
Abbildung 6.13:	Bestimmung der täglich zufühbaren Substratmenge	89
Abbildung 6.14:	Kapazitätsreserven im Jahresverlauf.....	90
Abbildung 6.15:	Anwendung der Checkliste G: Gasanfall und -verwertung	92
Abbildung 6.16:	Elektrischer Wirkungsgrad im Jahresverlauf	93
Abbildung 6.17:	Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Kaiserslautern.....	95
Abbildung 6.18:	Fließschema der Faulung der KA KL im Jahr 2014 (Dilly 2015).....	96
Abbildung 6.19:	Eingangsdaten in die Checkliste D: Desintegration	96
Abbildung 6.20:	Faulgasanfall der Kläranlage Kaiserslautern im Jahresverlauf des Jahres 2014 (Dilly 2015).....	98
Abbildung 6.21:	Anwendung der Checkliste D: Desintegration von Überschussschlamm.....	98
Abbildung 6.22:	TR-Gehalt des Überschussschlammes nach der Voreindickung.....	99
Abbildung 6.23:	Anwendung der Checkliste E: Eindickung von Überschussschlamm.....	100
Abbildung 6.24:	Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Obere Kyll (Hien et al. 2017)	101
Abbildung 6.25:	Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette und Umsetzung der Optimierungsstrategie (siehe Abbildung 5.3, S. 41).....	102
Abbildung 6.26:	Darstellung der Wege zu den Optimierungsstrategien für die Beispielkläranlage (gestrichelter Pfeil) und fiktive Kläranlage (gepunkteter Pfeil).....	104
Abbildung 6.27:	Ausgangsszenario mit einer Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei Trockenwetter Zufluss von 0,75 - 1h.....	106
Abbildung 6.28:	Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf 1,5 - 2h	107
Abbildung 6.29:	Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf über 2,5h.....	107
Abbildung 6.30:	Ergebnisse der Anwendung des Flussdiagramms für eine 60 000 EW Abwasserreinigungsanlage nach DWA-A 131.....	110

Abbildung 6.31:	Blockschema der Beispielanlage Untere Selz (Siekmann und Weisrock 2017)	112
Abbildung 6.32:	Fließschema und wesentliche Verfahrensstufen (Siekmann und Weisrock 2017)	113
Abbildung 6.33:	Auszug aus Checkliste M „Durchmischung Faulbehälter“	115
Abbildung 6.34:	Tagesgang des Faulgasanfalls für ausgewählte Tage	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenngößen der Faulung und des Gasertrags (Medianwerte), Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen	6
Tabelle 2:	Energetische Kenngößen (Medianwerte) des Ist-Zustandes, Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen	10
Tabelle 3:	Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in %	47
Tabelle 4:	Gasbehältertypen und deren Eigenschaften.....	62
Tabelle 5:	Auflistung elektrischen und thermischen Wirkungsgrade von KWK-Anlagen (DWA 2015d; ASUE 2014)	64
Tabelle 6:	Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für Verbrennungsmotoranlagen (BMU 2002)	65
Tabelle 7:	Mittlere CSB-Anschlussbelastung der KA Mayen	76
Tabelle 8:	CSB-, BSB ₅ - und Nges- Konzentration im Zulauf und im Zulauf der biologischen Stufe nach Mikrosiebung in Kombination mit Fällung/Flockung (MS+F)	78
Tabelle 9:	Abscheideleistungen (η_{VK}) in der Vorklärung für den BSB ₅	83
Tabelle 10:	Spezifische Schlammproduktion $\dot{U}_{C,BSB}$ [kg TS/kg BSB ₅] bei 10 bis 12°C (ATV-DVWK 2000).....	83
Tabelle 11:	Klärschlammanfall der Kläranlagen im Umkreis der Kläranlage Mayen	87
Tabelle 12:	Empfohlene Raum- und Schlammbelastung nach Merkblatt DWA-M 368 (2014) in Abhängigkeit von der Anlagengröße	90
Tabelle 13:	Anteil der leicht abbaubaren Stoffe bezogen je organischer Trockenmasse (DWA 2014)	91
Tabelle 14:	Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens basierend auf Tabelle 3	105
Tabelle 15:	Gasertrag der Schlämme im Jahresmittel bei einem technischen Abbaugrad der leicht abbaubaren organischen Trockenmasse von $\eta_{abb} = 85\%$ (nach DWA 2014)).....	106
Tabelle 16:	Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlammanfall, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zur Ausgangsvariante	108
Tabelle 17:	Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens basierend auf Tabelle 3	109
Tabelle 18:	Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlamm-, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zum Ausgangsszenario	110
Tabelle 19:	Abwassermengen und Aufenthaltszeiten in der Vorklärung	114
Tabelle 20:	Spezifischer Schlammanfall auf der KA Untere Selz und Referenz (DWA 2014).....	114
Tabelle 21:	Umwälzung und Gaseinpressung – IST- und Soll-Werte	116

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius (Einheit)
µm	Mikrometer (Einheit)
a	Jahr (Einheit)
BB	Belebungsbecken
B _{d,BSB,Z}	BSB ₅ -Tagesfracht im Zulauf zur Kläranlage in kg /d
B _{d,BSB,ZB}	BSB ₅ -Tagesfracht im Zulauf der biologischen Stufe in kg/d
B _{d,TS,ZB}	Trockensubstanzfracht im Zulauf zur biologischen Stufe in kg/d
BHKW	Blockheizkraftwerk
B _{I.oTMN,FB}	Schlammbelastung in der Faulung durch leicht abbaubare organische Stoffe in kg oTM _{abb} /(kg oTM·d)
BOD	biochemical oxygen demand (entspricht BSB ₅)
B _{oTM,Fremd(ÜSS)}	organische Trockenmasse im Fremdschlamm (Satellitenanlage ohne Vorklärung) in kg oTM/d
B _{R.I.oTM,FB}	Raumbelastung in der Faulung durch leicht abbaubare organische Stoffe in kg oT-M _{abb} /(m ³ ·d)
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
b _{TM,E,PS,d}	einwohnerspezifische Primärschlammanfall in g TM/(E·d)
b _{TM,E,ÜSS,d}	einwohnerspezifische Überschlammproduktion in g TM/(E·d)
B _{TM,PS,d}	tägliche Primärschlamm-Fracht angegeben als Trockenmasse in kg/d
B _{TM,ÜSS,d}	tägliche Überschussschlamm-Fracht angegeben als Trockenmasse in kg/d
C:N-Verhältnis	Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff
C _{CSB,24h,Z}	CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben im Zulauf der Kläranlage in mg/l
C _{CSB,ZB}	Konzentration des CSB in der homogenisierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C _{P,ZB}	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe als Phosphor im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB _{ZB}	Chemischer Sauerstoffbedarf im Zulauf zur Belegung in mg/l
C _{TKN,ZB}	Konzentration des Kjeldahlstickstoffs in der homogenisierten Probe
d	Tag (Einheit)
DESI	Desintegration
E	Einwohner (Einheit)
E _{Bedarf}	Gesamtstrombedarf der Kläranlage
E _{Bel}	Energieverbrauch der Belüftung
e _{Bel}	einwohnerspezifischer Energieverbrauch der Belüftung
e _{FG}	einwohnerspezifische Faulgasanfall
E _{ges}	Gesamtstromverbrauch der Kläranlage
e _{ges}	einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch
E-Klär	Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende
E _{KWK,el}	jährliche elektrische Stromproduktion der KWK-Anlage
E _{Prim}	Primärenergiegehalt
ESiTI	Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch
EV _{el}	Elektrischer Eigenversorgungsgrad
EW	Einwohnerwert in E
EW ₁₂₀	Einwohnerwerte bezogen auf 120 CSB g/(E·d)

g	Gramm (Einheit)
g_{CH_4}	Volumenanteil des Methans am Biogasvolumen
GK	Größenklasse
GV	Glühverlust in %
GWh_{el}	Gigawattstunde elektrischer Strom (Einheit)
h	Stunde (Einheit)
$Input_{Substrat}$	Input zum Faulbehälter in m^3 (Primärschlamm + Überschussschlamm + Fremdschlamm + Co-Substrate)
KA	Kläranlage
kW_{el}	Kilowatt (Einheit)
kWh	Kilowattstunde (Einheit)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter (Einheit)
m^3	Kubikmeter (Einheit)
mg	Milligramm (Einheit)
$M_{TS, BB, erf.}$	erforderliche Masse Feststoffe im Belebungsbecken in kg
MUEEF	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz
MÜSE	Mechanische Überschussschlamm Entwässerung
MW	Megawatt (Einheit)
n	Anzahl
N_2	Stickstoff
NAwaS	Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz
$\eta_{elektrisch}$	elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
N_{ges}	Gesamtstickstoff
NH_4^+	Ammonium
$\eta_{KWK, el}$	elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
NO_2	Nitrit
NO_3^-	Nitrat
$\eta_{thermisch}$	thermischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
η_{VK}	Abscheideleistung in der Vorklärung in %
N_{ZB}	Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
oTM	Organische Trockenmasse in kg/d
oTM_{abb}	Organische Trockenmasse (abbaubar) in kg/d
oTM_{zu}	Organische Trockenmasse im Zulauf zur Faulung in kg/d
oTR	Organischer Trockenrückstand in %
oTR_{zu}	Organischer Trockenrückstand im Zulauf zur Faulung in %
OV_d	tägliche Sauerstoffbedarf in kg/d
P_{ges}	Gesamtphosphor
PS	Primärschlamm
$Q_{d, Z}$	Zufluss im Zulauf der Kläranlage in m^3/d
$Q_{FG, a}$	jährliche Faulgasanfall in m^3
$Q_{FG, d}$	täglicher Faulgasanfall in m^3
$Q_{FS, d}$	mittlere tägliche Fremdschlammmenge in m^3/d
$Q_{PS, d}$	mittlere tägliche Primärschlammmenge in m^3/d
$Q_{RoS, d}$	mittlere tägliche Rohschlammmenge in m^3/d
$Q_{T, d, aM}$	täglicher Abwasserabfluss bei Trockenwetter im Jahresmittel in m^3/d
$Q_{ÜSS, d}$	mittlere tägliche Überschussschlammmenge in m^3/d
$Q_{V, KWK, max.}$	max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage in m^3/d
rd.	rund
RLP	Rheinland-Pfalz
RoS	Rohschlamm

SBC	Semizentralen Schlammbehandlungszentren
$S_{BSB,ZB}$	Konzentration des gelösten BSB in der mit 0,45 μm filtrierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
$S_{CSB,ZB}$	Konzentration des gelösten CSB in der mit 0,45 μm filtrierten Probe im Zulauf zur biologischen Stufe in mg/l
$S_{NH_4,ZB}$	Konzentration des Ammoniumstickstoffs in der filtrierten Probe als Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
$S_{NO_3,ZB}$	Konzentration des Nitratstickstoffs in der filtrierten Probe als Stickstoff im Zulauf der biologischen Stufe in mg/l
t_{FB}	Faulzeit (hydraulische Aufenthaltszeit) in d
TKN	Kjedahl-Stickstoff
TM	Trockenmasse bzw. Trockenmasse in kg
t_N	Belüftungsdauer für die Nitrifikation bei einer intermittierenden Belüftung in h
TR	Trockenrückstand in %
TS	Trockensubstanz (Masse des Trockenrückstands, filtrierte Probe) in g
TS_{BB}	Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken in kg/m^3
TSS	total suspended solid (entspricht Trockensubstanz)
$t_{TS,(gesamt)vorh.}$	Vorhandenes Gesamtschlammalter in d
$t_{TS,aerob,erf.}$	Erforderliches aerobes Schlammalter in d
$t_{TS,Bem}$	Bemessungsschlammalter in d
$t_{TS,erf.}$	erforderliches Schlammalter in d
$t_{TS,vorh.}$	vorhandenes Schlammalter in d
t_{VK}	Aufenthaltszeit in der Vorklärung in h
$\dot{U}_{C,BSB}$	spezifische Überschussschlammproduktion nach ATV-DVWK A 131 (2000)
ÜSS	Überschussschlamm
V_{BB}	Belebungsbeckenvolumen in m^3
$V_{BB,erf.}$	erforderliches Belebungsbeckenvolumen in m^3
$V_{FB,ges}$	Gesamtvolumen der Faulbehälter in m^3
V_{GS}	Volumen des Gasspeichers in m^3
V_{VK}	Volumen des Vorklärbeckens in m^3
$X_{TS,ZB}$	Konzentration der mit 0,45 μm Membranfilter abfiltrierbaren Stoffe nach Trocknung bei 105°C
Y_{FG}	spezifische Faulgasproduktion in $\text{NI}/\text{kg oTR}_{Zu}$
ZEBRAS	Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz

1 Einleitung

Ein Großteil der in Rheinland-Pfalz (RLP) entsorgten Klärschlämme stammt aus Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung (sogenannte Faulungsanlagen). Deren Bestand ist überwiegend durch Altanlagen charakterisiert, wodurch mittelfristig mit einer flächendeckenden Sanierung bzw. Erneuerung dieser Anlagen zu rechnen ist. Die verstärkte Umstellung von Kläranlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung auf einen anaeroben Stabilisierungsprozess und die aus der Energiewende resultierenden Handlungsoptionen zur Faulgasnutzung und -verwertung werden zudem den Bau neuer Faulungsanlagen, ggf. ergänzt um neue Technologien, vorantreiben. Die Klärschlamm Entsorgung in RLP erfolgt derzeit noch überwiegend über den landwirtschaftlichen Verwertungsweg. Vor dem Hintergrund der rechtlichen Begrenzungen, die sich aus der derzeit gültigen Düngemittelverordnung und der Novellierung der Klärschlammverordnung ergeben, wird dieser Entsorgungsweg zunehmend infrage gestellt. Mit Blick auf eine zukunftssichere Gestaltung des Prozesses der Klärschlammbehandlung und -verwertung stellt sich also die Frage nach dem Optimierungs- und Verbesserungspotenzial des Bestandes sowie nach sinnvollen Verfahrensabläufen der Abwasser- und Klärschlammbehandlung. Der Prozess der Faulung ist dabei von zentraler Bedeutung, da er mit der Reduzierung der organischen Stoffe im Schlamm und einer Verbesserung der Schlammwässerbarkeit einen wesentlichen Prozessschritt in der Gesamtkette der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung darstellt.

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (MUEEF) wurden im Rahmen des Projektes „**Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS**“ Ansätze entwickelt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt "Faulung" bei bestehenden Kläranlagen mit anaerober Klärschlammstabilisierung optimiert werden kann. Wesentliche Ziele sind die energetische Optimierung der Anlagen, die Reduzierung der Schlammengen für die Entsorgung und die Sicherstellung der Abwasserreinigung auf einem hohen Niveau. Die rheinland-pfälzischen Lösungsansätze und Projekte zur „Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen“, zu "Semizentralen Schlammbehandlungszentren - SBC" und zur "Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation - NAWaS" werden mit dem Projekt ZEBRAS aufgegriffen und durch dessen Ergebnissen erweitert und ergänzt. Somit wird eine nachhaltige Entwicklung in der Wasserwirtschaft befördert. Durch die Analyse der Faulungsanlagen mit einem Schwerpunkt auf der Schlammbehandlung und -verwertung ergeben sich auch Synergieeffekte mit dem Kooperationsprojekt „Regionale Klärschlammstrategien für Rheinland-Pfalz“.

In den letzten Jahren wurden bereits zahlreiche Studien im Themenfeld der Klärschlammfaulung sowie der Entsorgung des ausgefaulten Schlammes veröffentlicht. So werden von Horn et al. (2009) im Forschungsvorhaben „Kläranlage der Zukunft“ Möglichkeiten zur Erhöhung der Faulgasproduktion beschrieben und unterschiedliche anaerobe Verfahrenskonzepte vorgestellt. Die Studien von MULEWF RLP (2012), MKULNV NRW (2014) und MUKW BW (2015) beschreiben generelle Maßnahmen zur Energieeinsparung auf Kläranlagen und Optimierungsansätze für Kläranlagen mit Faulung. In diesem Zusammenhang wird bereits explizit auf Möglichkeiten zur Erhöhung der Eigenstromerzeugung bei Faulungsanlagen eingegangen (MKULNV NRW 2014). Von Hansen et al. (2009) werden Faulungsanlagen als Zentren von Klärschlammverbundkonzepten beschrieben. Dieser Ansatz ist auch vom MLUV MP (2013) in der Studie zur zukünftigen Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm mit aufgenommen. In RLP wurde die Idee, mehrere Kläranlagen in einem Verbund zusammenzuschließen, um die

Entsorgung des Klärschlammes zentral sicherzustellen, ebenfalls weiterverfolgt. Die Projekte Klärschlammkonzept für den Rhein-Hunsrück-Kreis (Siekman et al. 2016) und für die Region Trier (Guggenmos und Taudien 2016; Taudien und Kolisch 2017) unterstreichen dabei die zentrale Rolle der Faulungsanlagen als Schlammbehandlungszentren. Des Weiteren wurden aktuell in den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS geförderten Verbundprojekten - „Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende“ (E-Klär) und „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch“ (ESiTI) Maßnahmen zur Optimierung der Verfahrenskette von Kläranlagen mit Faulung untersucht. Im Projekt E-Klär wurden innovative Verfahren zur Ausschleusung von chemisch gebundener Energie aus dem Abwasserstrom (Rechengutpresse, Vorfällung, Feinsiebung anstatt Vorklärung) und die Desintegration von Überschussschlamm mit einer Thermodruckhydrolyse erprobt. Im Projekt ESiTI wurde eine Faulung mit Biomasseanreicherung (Hochlastfaulung) und ebenfalls eine Thermodruckhydrolyse betrieben. Außerdem wurde in diesem Projekt die bedarfsorientierte Zugabe von Co-Substraten zur Erhöhung der Gasproduktion untersucht. Ferner wurden von Schmitt et al. (2017a) im Projekt „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligente Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung“ (arrivee) Möglichkeiten aufgezeigt, wie Faulungsanlagen als Energieverbraucher und -erzeuger zukünftig am Energiemarkt teilnehmen und in Flexibilität- und Speicherkonzepte integriert werden können (Schmitt et al. 2017a). Die Klärschlammfaulung und die anschließende Verwertung des Faulgases sind dabei die Grundlage für die Entwicklung von Zukunftskonzepten, wie die Integration von Power-to-Gas auf Kläranlagen, dem Verfahren der biologischen Methanisierung oder die Einspeisung von aufbereitetem Gas ins Erdgasnetz.

Grundlage des Projektes **ZEBRAS** stellt eine detaillierte Bestandsaufnahme der Basisdaten der Faulungsanlagen in RLP dar (siehe Knerr et al. 2016), anhand derer die erschließbaren Potenziale zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung im Bestand abgeschätzt wurden (Knerr et al. 2017). Die Ergebnisse dieser Arbeitsschritte werden in **Kapitel 2** zusammenfassend dargestellt und diskutiert. Die im Projekt durchgeführte Bestandsanalyse und die Potenzialabschätzungen zur Steigerung der Faulgasproduktion und -verwertung zeigen deutlich, dass bei Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz erhebliche Optimierungspotenziale vorhanden sind (siehe **Kapitel 3**). Positive Maßnahmenumsetzungen zur Optimierung werden in ebenfalls aufgegriffen. Davon ausgehend wird in **Kapitel 4** erörtert, durch welche verfahrenstechnischen Umstellungen, Verbesserungen der Anlagentechnik und Sanierungsmaßnahmen die theoretisch ermittelten Potenziale nutzbar gemacht werden können. Ziel war es Optimierungsstrategien für die Faulung und Faulgasverwertung abzuleiten und aufzuzeigen. Dabei wurden die Auswirkungen der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung sowie die unterschiedlichen Wechselwirkungen berücksichtigt. Als Ergebnis wurden Handlungsempfehlungen in Form von insgesamt 13 Checklisten zum Vorgehen bei der Identifizierung von Optimierungspotenzialen der Faulung und Faulgasverwertung erarbeitet, die in **Kapitel 5** vorgestellt werden. Die Adressaten dieser Handlungsempfehlungen sind Kläranlagenbetreiber, Planer und Entscheidungsträger, die mit Hilfe der Checklisten ein individuelles Konzept zur Optimierung erstellen können. Parallel zu dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise wird in **Kapitel 6** die Anwendung der Checklisten an Beispielanlagen dargestellt. Die Struktur und der Aufbau des Berichts sind in Abbildung 1.1 illustrierend dargestellt.

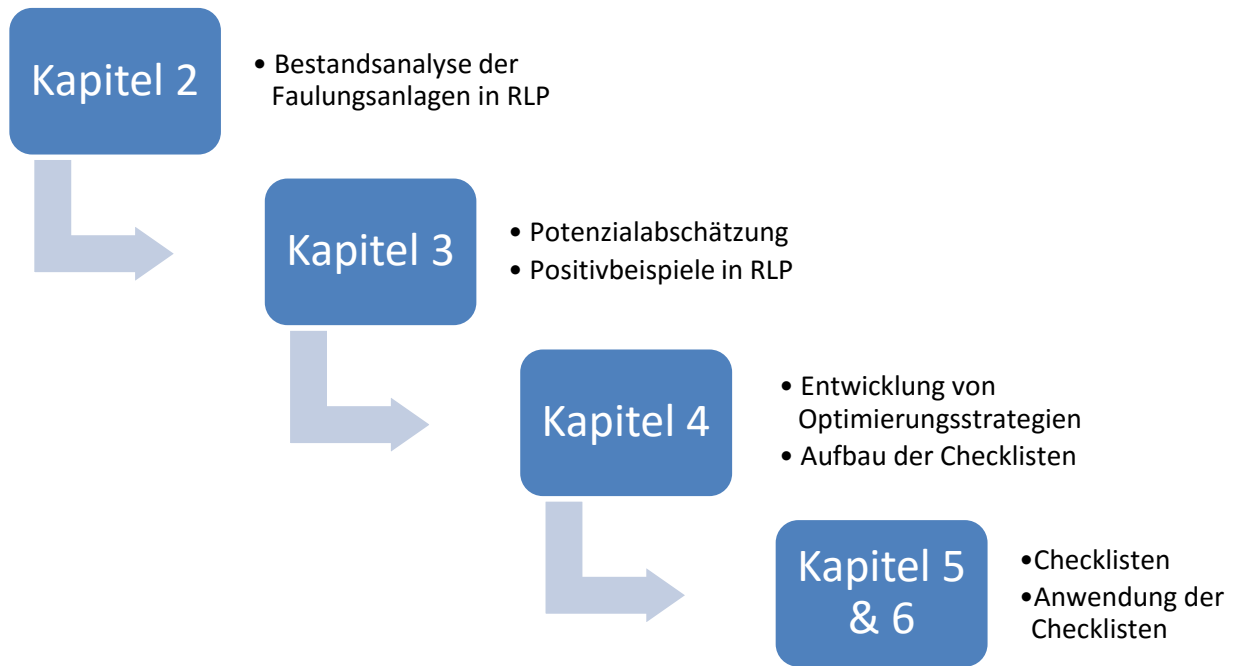


Abbildung 1.1: Aufbau des Berichtes

2 Bestandsanalyse¹

Die detaillierte Bestandsanalyse der Basisdaten der Faulungsanlagen in RLP wurde im ZEBRAS-Zwischenbericht (siehe Knerr et al. 2016) veröffentlicht. Im Folgenden werden die wesentlichsten Kenndaten zusammenfassend dargestellt. Für eine Klassifizierung der Anlagen wird anstatt einer Einteilung in Größenklassen nach der Abwasserverordnung (Bundesregierung 2004) eine Einteilung nach tatsächlicher mittlerer Anschlussbelastung vorgenommen. In Anlehnung an das Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) wurde als Bezugsgröße die mittlere CSB-Zulaufkraft der 24 h-Mischproben gewählt und die Anschlussbelastung wurde mit einer einwohnerspezifischen CSB-Fracht von 120 g/(E·d) ermittelt. Die Einteilung der Anlagen erfolgt nach den folgenden Kriterien in fünf Klassen:

- $EW_{120} \leq 10.000$ E
- 10.000 E < $EW_{120} \leq 20.000$ E
- 20.000 E < $EW_{120} \leq 50.000$ E
- 50.000 E < $EW_{120} \leq 100.000$ E
- $EW_{120} > 100.000$ E

Als Grenzen für die Klassifizierung wurde die Größenklassengrenze zwischen GK 3 und GK 4 sowie zwischen GK 4 und GK 5 gewählt. Außerdem wurden weitere Grenzen eingeführt, um die mit 50 von 84 Anlagen stark dominierenden Anlagen der GK 4 in drei Klassen zu unterteilen. Da sich nach Gretzschel et al. (2012) die Wirtschaftlichkeitsgrenze für eine Verfahrensumstellung von simultan aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung bei Einwohnerwerten in etwa zwischen 10.000 und 20.000 EW bewegt, wurde diese Zwischen-Abstufung eingeführt. Die Zwischenstufe bei Einwohnerwerten bis 50.000 EW wurde gewählt, um ein differenzierteres Bild bei der Auswertung der Anlagen zu erhalten. Die sich daraus ergebende Verteilung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

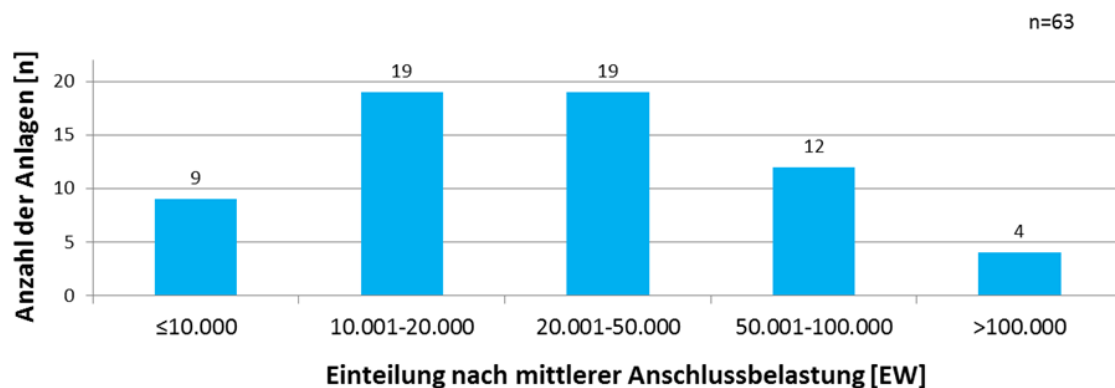


Abbildung 2.1: Klassierung der KA nach mittlerer Anschlussbelastung (Knerr et al. 2016)

¹ Kapitel 2 wurde im Tagungsband der Fachtagung „Faulung optimieren & Flexibilität wagen“ veröffentlicht. Zitiervorschlag: Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

Bezüglich der detaillierten Vorgehensweise wird auf Knerr et al. (2016) verwiesen. In die Auswertung sind Daten aus insgesamt 64 Faulungsanlagen eingeflossen. Den Daten liegt das Bezugsjahr 2014 zugrunde. Bezogen auf die angefragten 84 Anlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung wurde eine Rücklaufquote von 76 % erreicht. Da sich alle großen KA in Rheinland-Pfalz an der Befragung beteiligt haben, wurde bezogen auf die Gesamtausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen 88 % der Ausbaugröße erfasst.

2.1 Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags

Die ermittelten einwohnerspezifischen Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags sind in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags (Medianwerte), Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen

Kennwert	Einheit	Kläranlagenklasse					
		I	II	III	IV	V	Alle
Schlammalte in der Belegung		15 (9)	17 (19)	15 (19)	12,6 (12)	16 (4)	16 (63)
Rohschlammfracht	[g TM/(E·d)]	83,0 (3)	75,5 (11)	78,1 (7)	84,6 (7)	64,0 (3)	76,8 (31)
Faulschlammfracht	[g TM/(E·d)]	57,1 (5)	49,8 (16)	52 (14)	45,6 (10)	44,5 (4)	48,5 (49)
Faulzeit	[d]	30 (9)	30 (19)	27 (19)	36 (12)	29,5 (4)	30,0 (63)
Faulraumvolumen (inkl. Fremdschl.)	[l/E]	135 (8)	70,1 (18)	58,3 (17)	54,6 (12)	47,9 (4)	64,0 (59)
Faulraumvolumen (ohne Fremdschl.)	[l/E]	117,4 (8)	70,1 (18)	52,2 (17)	54,1 (12)	47,4 (4)	63,0 (59)
Raumbelastung	[kg oTR / (m ³ ·d)]	1,0 (5)	1,15 (12)	1,1 (12)	1,17 (9)	3,0 (1)	1,14 (39)
oTM-Abbau	[%]	37,1 (2)	60,9 (9)	57,7 (6)	64,5 (4)	58,3 (2)	60,6 (23)
Faulgasanfall (inkl. Fremdschl.)	[l/(E·d)]	29,9 (7)	29,2 (18)	24,5 (17)	26,5 (12)	25,9 (4)	27,5 (56)
Faulgasanfall (ohne Fremdschl.)	[l/(E·d)]	29,9 (7)	29,2 (18)	22,3 (17)	26,5 (12)	24,9 (4)	27,4 (56)
Gasertrag (bez. oTM _{zu})	[l/kg oTM _{zu}]	800 (3)	502 (14)	414 (9)	449 (7)	520 (1)	495 (34)
Gasertrag (bez. oTM _{abb})	[l/kg oTM]	1.464 (3)	705 (11)	711 (6)	669 (4)	781 (3)	744 (27)

- Rohschlamm- und Faulschlammfrachten

Aus den erhobenen Daten können im Median Rohschlammfrachten zwischen 64 und 84,6 g TM/(E·d) abgeleitet werden. Die niedrigsten Kennwerte ergeben sich für die Anlagen der Klasse V. Die Rohschlammfrachten der Anlagen der Klassen I - IV liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Die resultierenden Faulschlammfrachten liegen zwischen 44,5 und 57,1 g TM/(E·d). Die größeren Kläranlagen weisen dabei deutlich geringere Trockenmassegehalte gegenüber den kleineren Anlagen auf. Der Glühverlust des Faulschlammes liegt unabhängig von der Anschlussbelastung im Median bei 55 %. Mit 48,5 g TM/(E·d) liegt die spezifische Faulschlammfracht aller Anlagen unter dem von Imhoff und Imhoff (2007) für

Belebungsanlagen mit Simultanfällung häufig veranschlagten Wert von 60 g TR/(E·d), der jedoch auf 85-Perzentil-Ansätzen für die Rohabwasserzusammensetzung beruht (DWA 2015c).

- Faulzeiten und Faulraumvolumen

Die resultierenden Faulzeiten betragen, ohne erkennbare Abhängigkeit von der Größenklasse der Anlagen, im Median zwischen 27 und 36 Tagen. In Einzelfällen werden jedoch, insbesondere bei den kleineren Anlagen, Aufenthaltszeiten von bis zu 90 Tagen erreicht (Knerr et al. 2016). Das einwohnerspezifische Faulraumvolumen aller in die Auswertung eingeflossenen Anlagen liegt im Median bei 64 l/E. Nach Bischofsberger et al. (2005) wird ein Faulraumvolumen zwischen 20 und 50 l/E zur Bemessung vorgeschlagen. Bei den größeren Anlagen in RLP wird dieses nahezu eingehalten. Die meisten der Faulungsanlagen weisen jedoch deutlich höhere spezifische Faulraumvolumina auf. Dies trifft vor allem auf die kleineren Anlagen zu, was sich in den Medianwerten von 70 l/E für die Anlagen der Klasse II und 135 l/E für die Anlagen der Klasse I zeigt.

- Raumbelastung und oTM-Abbau

Analog zu den hohen Faulzeiten und spezifischen Faulraumvolumina ergeben sich niedrige Raumbelastungen. Die Medianwerte der Anlagen der Klassen I - IV liegen bei ca. 1,1 kg oTR/(m³·d). In der Literatur (DWA 2009, 2014) wird die Raumbelastung in Abhängigkeit von der Anlagengröße im Bereich zwischen 1,0 (< 50.000 EW) und 4,5 kg oTR/(m³·d) (> 100.000 EW) angegeben, was die enormen freien Kapazitäten der überwiegenden Anzahl der Anlagen in RLP dokumentiert.

- Faulgasanfall und Gasertrag

Für die in die Auswertung eingeflossenen Anlagen ergibt sich ein spezifischer Faulgasanfall von im Median 27,5 l/(E·d). Externe Schlämme und Co-Substrate führen bei etwa 1/3 der Anlagen zu einem erhöhten Faulgasanfall. Um diese zusätzliche Gaserzeugung herauszurechnen, wurde für die Co-Substrate und Fremdschlämme ein Zuschlag auf die Einwohnerwerte berücksichtigt [in Anlehnung an Möller (1994) und Imhoff und Imhoff (2007) 1 EW = 80 g TM/d], woraus im Median ein korrigierter Faulgasanfall von 27,4 l/(E·d) resultiert². Dieser Wert ist deutlich höher als der nach Merkblatt DWA-M 363 (DWA 2010) im Mittel zu erwartende spezifische Gasanfall von 18,3 l/(E·d) bis 20,7 l/(E·d) und kann im Wesentlichen auf die langen Faulzeiten zurückgeführt werden. Der Gasertrag von Rohschlamm wird im Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) mit ca. 440 l je kg zugeführtem oTM_{zu} angegeben. Vor allem bei den Anlagen der Klasse I ist mit einem resultierenden Wert von ca. 800 l/kg oTM_{zu} eine enorme Abweichung zu dem genannten Literaturwert zu erkennen. Dieser Wert wird als nicht plausibel eingestuft. Für die Anlagen > 10.000 E resultiert ein spezifischer Gasertrag zwischen 414 und 520 l/kg oTM_{zu}, der damit in der Größenordnung des im Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) angegebenen Wertes liegt.

Die meisten Faulbehälter werden im mesophilen Temperaturbereich, also zwischen 30°C und 40°C, betrieben. Lediglich vier der in die Auswertung eingeflossenen Anlagen verfügen derzeit über eine Klärschlammintegration.

² Dabei wurde eine über das Jahr verteilte gleichmäßige Beschickung unterstellt. Der Zuschlag auf die Einwohnerwerte liegt in Summe bei 103.000 EW (ca. 3000 t TM/a) und bei einzelnen Anlagen bei 15.000 EW.

2.2 Faulgasverwertung

In Summe weisen die 64 ausgewerteten Anlagen eine jährliche Gasproduktion von 25,4 Mio. m³/a aus. Insgesamt wurden in Rheinland-Pfalz 28,0 Mio. m³/a Faulgas erzeugt³. Mit rd. 20,5 Mio. m³/a werden ca. 81 % des erzeugten Faulgases zur Eigenstromerzeugung verwendet. Dieser Wert ist mit dem bundesweiten Durchschnitt von ca. 80 % vergleichbar (Statistisches Bundesamt, 2015). Nur ein sehr geringer Anteil wird für eine Wärmeerzeugung (3,6 Mio. m³/a) oder für Direktantriebe (0,1 Mio. m³/a) verwendet. Mit 1,3 Mio. m³/a werden etwa 5 % des anfallenden Faulgases über eine Fackel verbrannt (Abbildung 2.2).

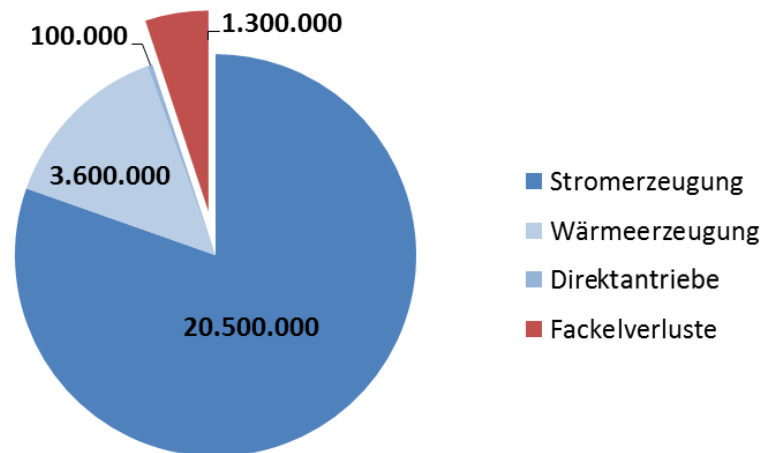


Abbildung 2.2: Jährliche Gasproduktion der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen in m³/a (n = 64)

Es verfügen 58 der in die Auswertung eingeflossenen 64 Anlagen (91 %) über eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage), überwiegend in Form eines Blockheizkraftwerkes (BHKW). Lediglich drei Anlagen verwenden eine Mikrogasturbine zur Stromerzeugung. Der Anteil der Gasmenge, die zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung verwendet wird, variiert von Anlage zu Anlage sehr stark. Abbildung 2.3 zeigt für die einzelnen Anlagen den Anteil der Faulgasmenge der Stromerzeugung zugeführt wird.

Der Großteil der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen verwertet die überwiegende Gasmenge zur Stromerzeugung mit KWK-Anlagen. Viele Anlagen verwenden aber einen gewissen Anteil ausschließlich zur Wärmeerzeugung. Sechs Anlagen betreiben keine KWK-Anlage. Bei diesen Anlagen wird das produzierte Faulgas ausschließlich zur Wärmeerzeugung verwendet bzw. abgefackelt. Umgekehrt gibt es einige Anlagen, die das gesamte produzierte Faulgas zur Stromerzeugung verwenden.

³ Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas für das Jahr 2014; Statistisches Landesamt Bad Ems

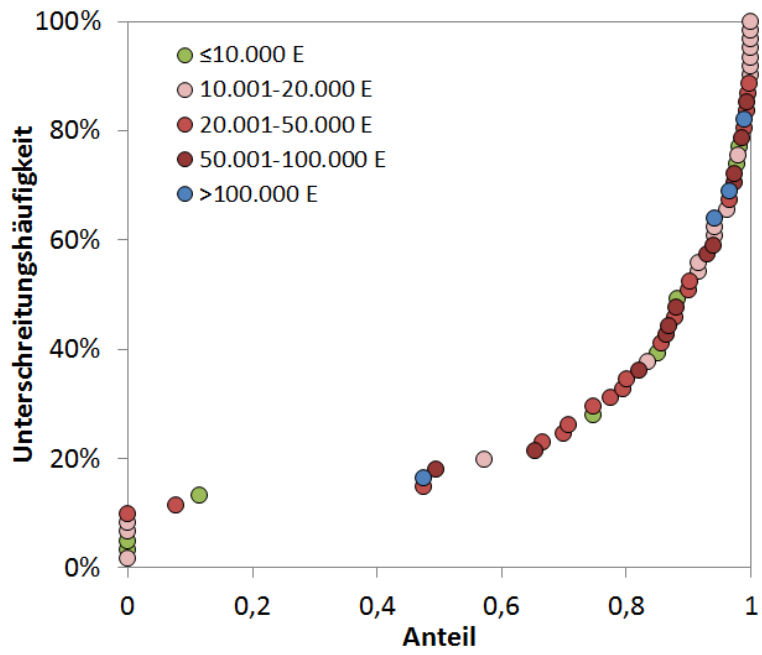


Abbildung 2.3: Anteil der zur Stromerzeugung verwerteten Faulgasmenge (n = 61)

2.3 Energetische Kenngrößen

In Tabelle 2 sind die für den Ist-Zustand ermittelten energetischen Kenngrößen der in die Auswertung eingeflossenen Faulungsanlagen zusammengefasst.

Tabelle 2: Energetische Kenngrößen (Medianwerte) des Ist-Zustandes, Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen

Kennwert	Einheit	Kläranlagenklasse					
		I	II	III	IV	V	Alle
Eigenstromerzeugung	[kWh/(E·a)]	20,5 (8)	12,5 (18)	13,2 (17)	18,6 (12)	16,0 (4)	14,6 (59)
Fremdstrombezug	[kWh/(E·a)]	30,0 (8)	23,9 (17)	24,7 (17)	17,5 (12)	10,1 (4)	23,8 (58)
Gesamtstromverbrauch	[kWh/(E·a)]	50,6 (8)	37,5 (16)	36,1 (17)	36,1 (12)	29,5 (4)	37,5 (57)
Eigenversorgungsgrad	[%]	30,0 (8)	31,0 (17)	34,0 (17)	45,0 (12)	60,0 (4)	39,1 (58)

Die Anlagen der Klasse I haben im Vergleich eine hohe spezifische Eigenstromerzeugung. Es ist darauf hinzuweisen, dass in diesem Fall der zusätzliche Energiegewinn durch Co-Substrate und Fremdschlämme zur Erhöhung der einwohnerspezifischen Stromerzeugung ($e_{el,p}$) führt.

Gegenüber den Kennzahlen des Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) ergibt sich im Median über alle Anlagen mit 37,4 kWh/(E·a) ein zum Bundesdurchschnitt vergleichbarer, aber durchweg höherer Gesamtstromverbrauch (Abbildung 2.4), der mit zunehmender Anschlussbelastung abnimmt. So resultiert mit 50,6 kWh/(E·a) für die Anlagen der Klasse I ein 1,7-fach höherer einwohnerspezifischer Wert als für die Anlagen der Klasse V, wo 29,5 kWh/(E·a) ermittelt wurden.

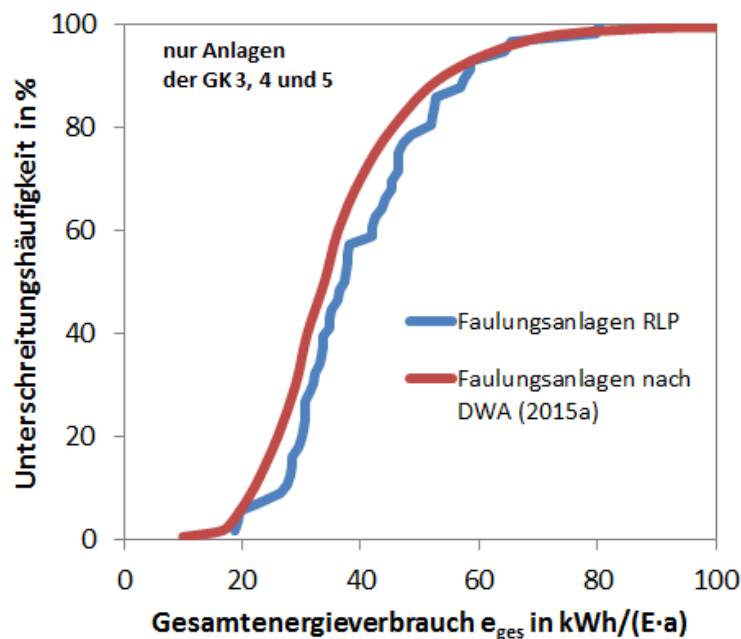


Abbildung 2.4: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch der Faulungsanlagen in RLP im Vergleich zu den Kennwerten des Arbeitsblattes DWA-A 216 (DWA 2015d)

Der Eigenversorgungsgrad nimmt bei höherer Anschlussbelastung und daher auch mit der Größe der Anlagen zu. Dies kann u. a. auf den deutlich geringeren spezifischen Gesamtstromverbrauch bei den größeren Anlagen zurückgeführt werden. Im Median beträgt der Eigenversorgungsgrad der kleinen Anlagen (< 10.000 E) 30 %. Die großen Anlagen (> 100.000 E) weisen dagegen mit 60 % einen doppelt so hohen Eigenversorgungsgrad auf.

3 Potenzialabschätzung in Rheinland-Pfalz

Die resultierenden Kennwerte der Raumbelastungen, der Faulzeiten und Faulraumvolumina zeigen, dass der überwiegende Teil der Faulungsanlagen in RLP freie Faulraumkapazitäten aufweist. Zudem zeigt die Analyse des Ist-Zustandes, dass auch in den Bereichen Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Faulgasverwertung Ansätze für eine Optimierung zu erkennen sind. Das daraus erschließbare Potenzial zur Steigerung der Stromproduktion im Bestand wurde im Rahmen einer Potenzialabschätzung ermittelt⁴. Dabei wurden ausgewählte Maßnahmen im Vergleich zum Ist-Zustand untersucht, die Einfluss auf die Bereiche der Faulgaserzeugung und -verwertung haben:

- Ausnutzung von Kapazitätsreserven der Faulung
- Steigerung der Primärschlammmentnahme in der Vorklärung
- Senkung des Schlammalters in der Belebung
- Nachrüstung mit effizienten KWK-Anlagen
- Repowering vorhandener KWK-Anlagen
- Klärschlammintegration
- Umstellung von Parallel- auf 2-stufigen Reihenbetrieb
- Optimierung der Faulgasverwertung zur Stromerzeugung

Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Verfahrenskette sind folgende:

- Verbesserung der Überschussschlammendickung (siehe Kapitel 5.4)
- Durchmischung der Faulbehälter (siehe Kapitel 5.7)
- Gasspeicher (siehe Kapitel 5.8)
- Wärmemanagement (siehe Kapitel 5.12)
- Faulbehälter als Wärmespeicher (siehe Kapitel 5.13)
- Prozesswasserbehandlung

⁴ Teile der Potenzialabschätzung wurden bereits im Rahmen der Fachtagung Faulung optimieren & Flexibilität wagen veröffentlicht. Zitiervorschlag: Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

3.1 Ausnutzung von Kapazitätsreserven der Faulung

3.1.1 Grundlagen

In den vorhandenen Faulräumen sind über alle Klassen und insbesondere auf kleinen Anlagen freie Kapazitäten zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen sowie Co-Substraten vorhanden.

Co-Substrate

Die Mitbehandlung von externen Co-Substraten in Faulbehältern von kommunalen Kläranlagen bezeichnet man als Co-Vergärung. Bei den verwendeten Substraten handelt es sich um Bioabfälle oder biogene Stoffe, die ursprünglich nicht als Substrat der Faulung von kommunalen Kläranlagen vorgesehen waren (DWA 2009).

Durch das Einbringen von zusätzlichen Substraten ist eine Verbesserung der stofflichen Faulbehälterauslastung möglich. Diese Substrate können sich in ihrer Zusammensetzung stark unterscheiden. In der Regel ist bei biogenen Abfällen der Anteil der leicht abbaubaren organischen Substanzen höher als beim Substrat Klärschlamm (KTBL 2007). Daher ist auch der zu erwartende spezifische Gasertrag [l/ kg oTS] im Vergleich zu Klärschlamm deutlich höher. Somit kann durch die Zugabe einer relativ geringen Menge eines energiereichen Substrates die Gasproduktion und die mögliche Stromerzeugung deutlich gesteigert werden.

Das Einbringen der externen Co-Substraten in den Faulbehälter wirkt sich auf den gesamten Kläranlagenbetrieb aus und ist daher sorgfältig abzuschätzen. Neben der Beachtung von prozessrelevanten Eigenschaften der Substrate, wie Toxizität, Fettgehalt, Partikelgröße, biologische Abbaubarkeit, Pumpfähigkeit, etc. ist vor allem die Gefahr der stofflichen Überlastung der Faulung zu berücksichtigen (DWA 2009). Des Weiteren sind beim Verwenden von externen Substraten Auswirkungen auf die Entwässerbarkeit der Faulschlämme und die Rückbelastung der Kläranlage zu beachten. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der stofflichen Belastung der Kläranlage durch zusätzliche Stickstofffrachten im Prozesswasser der Faulung (DWA 2009). Die Veränderung der Klärschlammzusammensetzung ist auch bei der Klärschlamm Entsorgung zu berücksichtigen. Es ist sicherzustellen, dass durch eine Co-Vergärung keine zusätzlichen Schad- und Störstoffe in die Umwelt eingetragen oder derzeitige Entsorgungswege verschlossen oder erschwert werden.

Fremdschlämme

Klärschlämme von anderen Kläranlagen sind keine externen Substrate im eigentlichen Sinn, da der Klärschlamm dem vorgesehenen Substrat entspricht. Mitbehandelte Klärschlämme werden als „Fremdschlämme“ bezeichnet.

Vorhandene frei Faulraumkapazitäten könnten durch Schlammverbundkonzepte sinnvoll genutzt werden, indem räumlich nahe zueinander liegende Stabilisierungs- und Faulungsanlagen gemeinsam und übergreifend betrieben werden. Die Stabilisierungsanlagen werden dann mit einem geringeren Schlammalter mit der alleinigen Aufgabe der Abwasserbehandlung betrieben (Gretzschel et al. 2012). Der nicht stabilisierte Überschussschlamm dieser Anlagen wird einer nahegelegenen Faulungsanlage mit entsprechenden Kapazitätsreserven zugeführt. Der in diesen Anlagen mit ausgefaulte Schlamm kann zur Energieproduktion genutzt werden. Gleichzeitig wird auf den "ehemaligen" (aeroben) Stabilisierungsanlagen (Schlammalter > 25d) der Strombedarf verringert, da das Schlammalter abgesenkt werden kann.

In ATV-DVWK (2003) wird bei der mesophilen Faulung eine Aufenthaltszeit im Faulbehälter von 20 Tagen empfohlen. Die im Rahmen der Bestandserhebung ermittelten durchschnittlichen Verweilzeiten liegen teilweise deutlich darüber (vgl. Tabelle 1). Wird gleichzeitig mit der Umsetzung von Schlammverbundkonzepten die hydraulische Verweilzeit der in Frage kommenden Faulbehälter optimiert, ergeben sich weitere Reserven. Um Belastungsspitzen ausreichend abpuffern zu können wird im Rahmen der Potenzialabschätzung eine durchschnittliche Aufenthaltszeit in der Faulung von 25 d angesetzt, womit bereits ein Gasertrag von 440 l/kg oTR_{zu} erreichbar ist (DWA 2014).

Beispiele in Rheinland-Pfalz

Für die Annahme von Fremdschlämmen muss eine Schlammverbundkonzepte erstellt werden. Wenn sich mehrere Kläranlagen in einem Klärschlammverbund zusammenschließen, ist es möglich den jeweils anfallenden Klärschlamm zentral auf einer Faulungsanlage gemeinsam anaerob zu stabilisieren.

Diese Faulungsanlage wird somit zum Schlammbehandlungscenter für den eigenen Klärschlamm und die Fremdschlämme der umliegenden Kläranlagen. Die Kläranlage Selters wurde ursprünglich als simultan aerob stabilisierende Kläranlage betrieben. Die anfallenden Klärschlämme wurden in der Landwirtschaft nass verbracht. Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, die auch die aktuelle Situation umliegender Gebietskörperschaften berücksichtigte, wurde herausgestellt, dass eine interkommunale Kooperation wirtschaftliche Vorteile für alle Beteiligten mit sich bringt.

Durch Umstellung der Verfahrensführung von simultan aerober Schlammstabilisierung auf Schlammfaulung konnte die Behandlungskapazität wasserseitig auf 11.500 E erhöht werden. Hierdurch konnten drei Teichkläranlagen im Umfeld der KA Selters stillgelegt werden.

Die als zweistufige Kompaktfaulung konzipierte Klärschlammstabilisierung wurde für eine Behandlungskapazität von 34.700 E ausgelegt. Die Auslastung der Faulung wird durch Annahme und Mitbehandlung von Fremdschlämmen von vier umliegenden Kläranlagen gewährleistet (siehe Abbildung 3.4). Dort wird das Schlammalter in den Belebungsbecken gezielt zur alleinigen Kohlenstoff- und Nährstoffeliminationen reduziert, um der Faulungsanlage in Selters hochkalorischen Klärschlamm anbieten zu können. Die Abwasserreinigung wird hierdurch nicht negativ beeinflusst. Vor dem Transport der Klärschlämme zur KA Selters werden diese dezentral maschinell eingedickt.

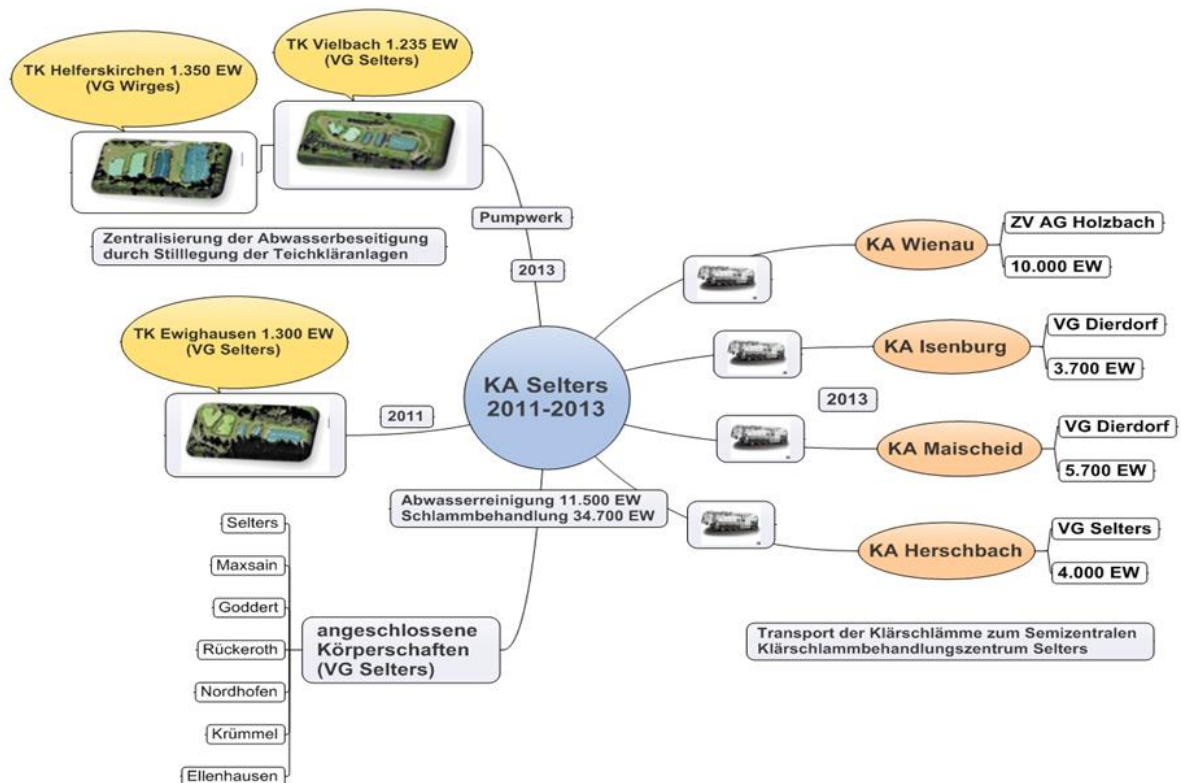


Abbildung 3.1: Konzept des kommunalen Klärschlammbehandlungszentrums Selters (DWA 2015a)

Durch die Zentralisierung der Klärschlammbehandlung gelingt es, auch die Klärschlämme kleinerer Anlagen einer Schlammfäulung zuzuführen und somit Energie in Form von Faulgas zu erzeugen und die zu entsorgende Klärschlammmenge gezielt zu reduzieren. Die Reduzierung der Klärschlammmenge ist zum einen auf den höheren Organikabbau in der Fäulung und zum anderen auf ein besseres Entwässerungsverhalten des Faulschlamm zurückzuführen.

Erfahrungswerte zeigen, dass die zu entsorgende Klärschlammmenge um rd. 30 % reduziert werden kann. Klärschlammverbundkonzepte sind daher in ländlichen Regionen mit mehreren kleinen Kläranlagen von großer Bedeutung und gewinnen im Zuge eines möglichen Ausstiegs aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung einen immer größeren Stellenwert.

Ein Beispiel für die Mitbehandlung von Co-Substraten ist die Kläranlage Bitburg. Auf der Kläranlage wird seit dem Jahr 2010 eine Co-Vergärung durchgeführt. Dabei werden Substrate wie Fette, Milch und Enteisierungswasser (CSB ~ 140.000 mg/l) verwendet. Der Faulbehälter ($V = 2.400$ m³) wird im Mittel mit etwa 40 m³/d Rohschlamm und 3,5 m³/d Co-Substrat beschickt. Die zugegebenen Substrate haben einen Anteil von 39 % am Faulgasanfall, jedoch von nur rd. 10 % an der Rohschlammmenge (Abbildung 3.2).

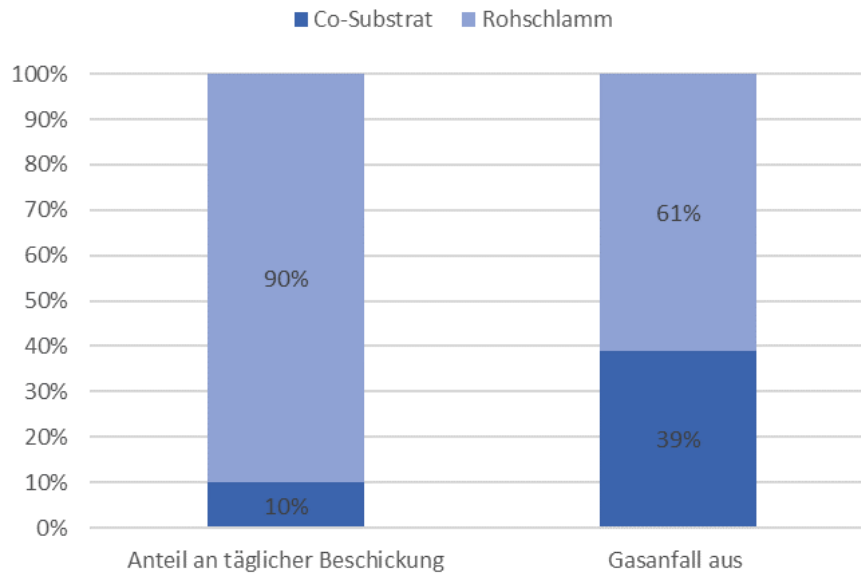


Abbildung 3.2: Co-Substratzugabe und Gasanfall, KA-Bitburg-Ost (Stadtwerke Bitburg ohne Datum)

3.1.2 Potenzial

Die in die Auswertung eingeflossenen Faulbehälter weisen nach der Potenzialabschätzung an insgesamt 43 Standorten freie Kapazitäten für die Mitfaulung von rd. 40.000 m³ Fremdschlämmen auf (Abbildung 3.3). Mit rd. 28.000 m³ besteht das größte Potenzial auf Anlagen der Klasse IV. Dagegen resultiert bei den Anlagen der Klasse V mit etwa 500 m³ Reserven ein nur geringes Potenzial.

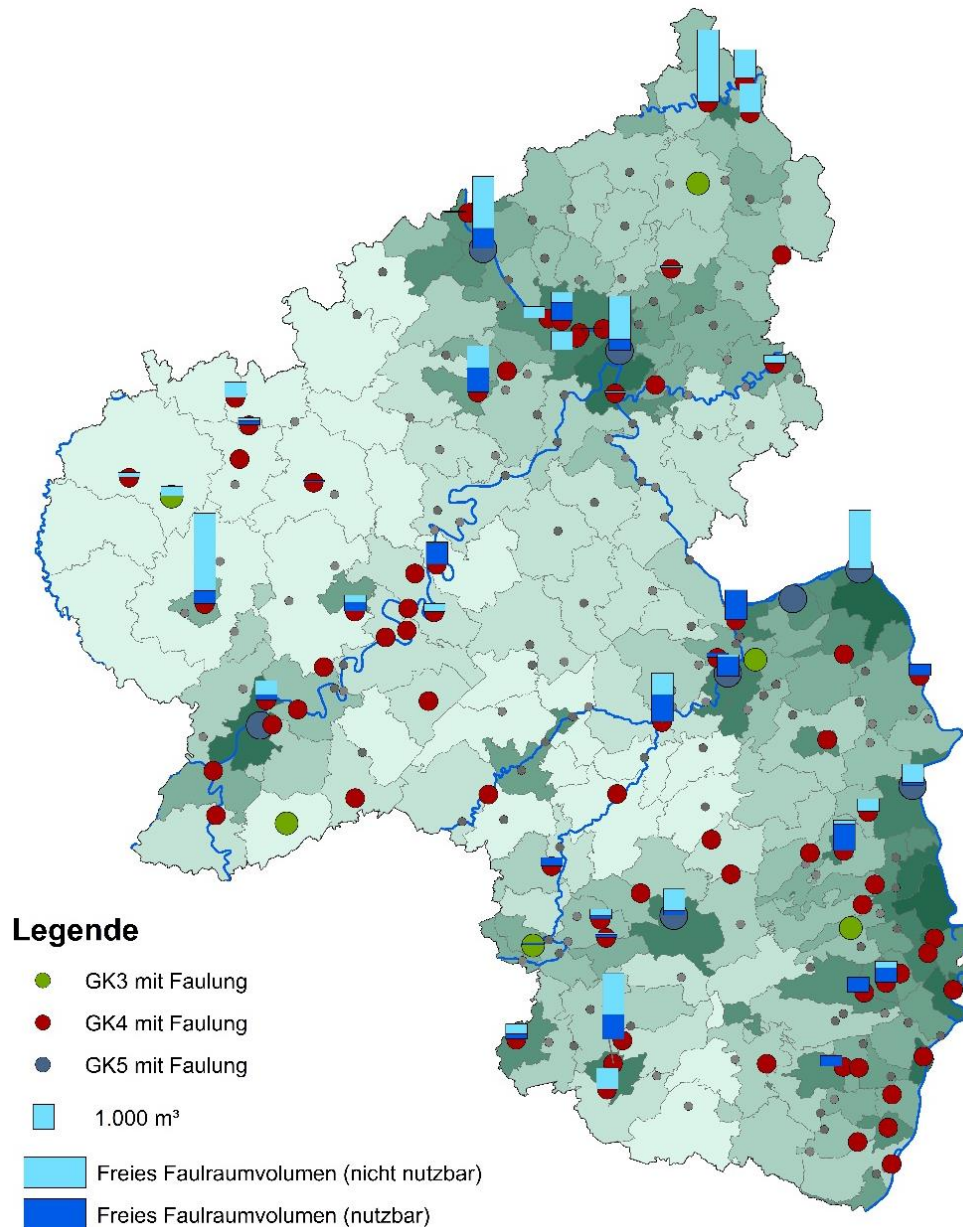


Abbildung 3.3: Kapazitätsreserven der Faulung zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen

Würde das Gesamtpotenzial vollständig ausgenutzt, könnten durch die Mitbehandlung nicht stabilisierten Überschussschlamms, bei gleichzeitiger Reduzierung der Faulzeit, ca. 9 Mio. m³/a Faulgas und daraus resultierend ca. 20 GWh_{el}/a Strom produziert werden. Nach einer durchgeführten Raumanalyse konnten dagegen lediglich 27 Standorte identifiziert werden, bei denen Stabilisierungsanlagen in einer wirtschaftlich vertretbaren Transportentfernung von 15 bis 30 km gelegen sind. Das tatsächlich realisierbare Potenzial fällt somit deutlich geringer aus und reduziert sich um etwa 57 % auf rd. 8,6 GWh_{el}/a.

Die Gasproduktionssteigerung bei einer Co-Substratzugabe hängt maßgeblich vom verwendeten Co-Substrat ab. Da das Substratangebot stark schwankt und oftmals die räumliche Nähe zu einem Lebensmittelhersteller beeinflusst wird, wurde auf eine Potenzialabschätzung verzichtet. In der Regel ist bei einer Co-Substratzugabe mit einer deutlichen Steigerung der Gasproduktion ausgegangen werden.

3.2 Steigerung der Primärschlammmentnahme

3.2.1 Grundlagen

Eine Steigerung des Gasertrages in der Faulung kann u. a. auch durch eine Erhöhung des Massenstroms an zugeführtem Primärschlamm erreicht werden. Hierfür bietet sich im Bestand die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln in die Vorklärung (Vorfällung) an, wodurch neben der Phosphorelimination auch die Abscheideleistung in Bezug auf partikuläre organische Abwasserinhaltsstoffe verbessert wird. Hierbei wird angestrebt, so viel energiereichen Primärschlamm wie möglich aus der Vorklärung zu entnehmen und nur so wenig Kohlenstoff (bzw. Phosphor), wie für die Denitrifikation (bzw. für das Biomassenwachstum) benötigt wird, in die biologische Stufe einzuleiten. Als Nebeneffekt wird die biologische Stufe entlastet, was zu Einsparungen bei der Sauerstoffversorgung und damit der erforderlichen Belüftungsenergie führt.

Durch die Maßnahme wird das C:N- und C:P-Verhältnis abgesenkt. Es müssen daher auch die Auswirkungen auf die Denitrifikation sowie die Fällung beachtet werden (vgl. Kapitel 5.1).

3.2.2 Potenzial

In der Literatur wird durch Vorfällung eine um 30 - 40 % erhöhte Primärschlammmenge angegeben, die in Abhängigkeit von der Durchflusszeit in der Vorklärung zu einer um 30 – 50 % erhöhten Entnahme der organischen Substanz führt (MKULNV NRW 2014). Aufgrund der meist hohen Durchflusszeiten im Bestand, wird für die Abschätzung des rechnerisch erreichbaren Gasertrags bei Vorfällung der Vergleich zu den Erträgen bei Sedimentation mit einer Durchflusszeit in der Vorklärung von 2 h herangezogen und gemäß MKULNV NRW (2014) mit einer Steigerung um 12 % berechnet.

Über alle betrachteten Kläranlagen (n = 41) kann durch die erhöhte Primärschlammmentnahme mittels Vorfällung die Stromproduktion theoretisch um rund 4,4 GWh_{el}/a gesteigert werden und damit der Stromfremdbezug um das gleiche Maß gesenkt werden.

Eine Reaktivierung stillgelegter Vorklärkapazitäten oder eine Erhöhung der Verweilzeiten durch Neubau von Vorklärbecken wurde im Rahmen der vorliegenden Potenzialabschätzung nicht betrachtet. Die Ersparnisse bei der Belüftungsenergie durch Entlastung der biologischen Stufe wurden ebenso nicht berücksichtigt.

3.3 Senkung des Schlammalters in der Belebung

3.3.1 Grundlagen

Die Bestandanalyse hat ergeben, dass trotz getrennter anaerober Schlammstabilisierung häufig zu hohe Schlammalter in der Biologie vorgehalten werden. Die Folge ist, dass leicht abbaubare Organikanteile (oTR) bereits im Belebungsbecken mineralisiert werden (Teilstabilisierung des Schlammes) und eine weitere Umsetzung des Überschussschlammes in der anaeroben Stufe erschwert wird. Durch ein Herabsetzen des Schlammalters auf das für die Stickstoffelimination erforderliche Maß wird der Sauerstoffbedarf reduziert und der oTR-Anteil im Überschussschlamm erhöht, was zu einem potenziell energiereicheren Überschussschlamm führt. Zudem wird der Baustoffwechsel der am Abwasserreinigungsprozess beteiligten Mikroorganismen gesteigert, wodurch zusätzlich die dem Faulbehälter zugeführte Überschussschlammmenge erhöht wird.

Das erforderliche Schlammalter ist neben der Abwassertemperatur vom Reinigungsziel, der Größe der Kläranlage und dem Verhältnis des Denitrifikationsvolumens zum Gesamtbelebungsvolumen abhängig. Es liegt nach ATV-DVWK-Arbeitsblatt 131 (ATV-DVWK 2000) bzw. DWA (2016) für Anlagen mit Stickstoffelimination bei einer Abwassertemperatur von 12 °C bei etwa 8 bis 16 d und ist damit deutlich niedriger, als die im Rahmen der Bestandserfassung für eine Vielzahl von Faulungsanlagen im Jahresdurchschnitt erhobenen Schlammalter.

3.3.2 Potenzial

Die Auswirkungen einer Reduktion des Schlammalters in der Biologie (auf durchschnittlich 17 d) auf den Gasertrag werden überschläglich nach MKULNV NRW (2014) mit einer Steigerung des einwohnerspezifischen Gasanfalls um 3,5 % berechnet. Durch diese Maßnahme könnten auf den 14 im Rahmen der Potenzialanalyse betrachteten Faulungsanlagen insgesamt 0,5 GWh_{el}/a erschlossen werden. Nicht weiter berücksichtigt ist dabei der zusätzliche positive Effekt durch Reduktion des Sauerstoffbedarfs in der biologischen Stufe, was zu weiteren (Energie-)Einsparungen führt.

3.4 Nachrüstung mit effizienten KWK-Anlagen

3.4.1 Grundlagen

Die Datenauswertung des Bestandes hat gezeigt, dass auf sechs der 64 Faulungsanlagen keine KWK-Anlagen vorhanden sind. Eine Anlage verstromt das anfallende Gas extern. Die konsequente Nachrüstung der verbleibenden fünf Faulungsanlagen mit effizienten KWK-Anlagen bietet daher ein zusätzliches Stromerzeugungspotenzial.

Nach Schäfer et al. (2015) können für neue KWK-Aggregate elektrische Wirkungsgrade von 32 bis 40 % angesetzt werden. Die sich aus der Nachrüstung von KWK-Aggregaten ergebende zusätzliche Stromproduktion wurde unter Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von 35 % bei einem mittleren Methangehalt im anfallenden Faulgas von 65 % berechnet.

3.4.2 Potenzial

Durch die Ausrüstung aller 64 Faulungsanlagen mit KWK-Aggregaten könnte die Stromerzeugung um rd. 1,4 GWh_{el}/a gesteigert und der Energiefremdbezug entsprechend gesenkt werden. Örtliche Gegebenheiten, aufgrund denen eine Faulgasverstromung nicht umgesetzt werden könnte (z. B. Schlamm-trocknung), wurden nicht berücksichtigt.

3.5 Repowering vorhandener KWK-Anlagen

3.5.1 Grundlagen

Der überwiegende Teil der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen verwertet das anfallende Faulgas primär zur Stromproduktion (Abbildung 2.2). Der elektrische Wirkungsgrad der eingesetzten KWK-Aggregate beträgt im Median rd. 29 %, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den zeitweisen Betrieb der Aggregate in einem energetisch ungünstigen Teillastbereich sowie auf Verschleiß der Maschinen infolge Alterung zurückgeführt werden kann. Eine einfache Option zur Erhöhung der Stromausbeute bietet daher der Austausch vorhandener ineffizienter, ggf. veralteter KWK-Aggregate gegen modernere und damit effizientere Aggregate.

Für die Berechnung der Potenziale dieser Maßnahme wurde vereinfacht angenommen, dass alle KWK-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad $< 35 \%$ modernisiert werden, wodurch bei gleicher Faulgasmenge eine größere Strommenge erzeugt werden kann. Der Methangehalt im Faulgas wurde, entsprechend den Ergebnissen der Datenauswertung des Bestandes, mit 65 % angenommen. Der elektrische Wirkungsgrad der modernisierten KWK-Anlagen wurde analog zur Nachrüstung von KWK-Anlagen mit 35 % angesetzt. Im Detail ist bei der Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auch der Rückgang des thermischen Wirkungsgrades zu berücksichtigen.

3.5.2 Potenzial

Ebenso wie bei der Nachrüstung von KWK-Anlagen hat die Modernisierung der vorhandenen Aggregate nur Auswirkungen auf die Stromproduktion und den Stromfremdbezug. Die Stromproduktion kann durch diese Maßnahme um insgesamt rd. 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden, respektive der Stromfremdbezug um das gleiche Maß gesenkt werden. Insgesamt kommen nach Datenauswertung 41 der 64 im Rahmen der Bestandserhebung analysierten Faulungsanlagen für ein Repowering in Betracht.

3.6 Klärschlamm-Desintegration

3.6.1 Grundlagen

Unter der Desintegration von Klärschlamm versteht man die Verkleinerung der Klärschlamm-trockenmasse durch das Einwirken von äußeren Kräften. Dadurch verändern sich die Schlammstruktur und die Schlamm-eigenschaften. Das Einwirken der Kräfte löst die Schlammflockenstruktur auf und bei den einzelnen Mikroorganismen werden Zellinhaltsstoffe freigesetzt. Man spricht daher auch von einem Klärschlamm-aufschluss. Man unterscheidet biologische, chemische und physikalische Verfahren zur Desintegration. Kernstücke der thermischen, biochemischen und chemischen Desintegration sind Hydrolyse und Oxidation (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlamm-Desintegration" 2003). Daher werden die meisten Desintegrationsverfahren auch Hydrolyseverfahren genannt. Unter der biologischen Desintegration wird die ohnehin im Faulbehälter stattfindende Hydrolyse durch die Zugabe von externen Enzymen unterstützt. Bei chemischen Verfahren findet eine Oxidation mit Ozon oder Sauerstoff, bzw. eine Hydrolyse durch Säure- oder Laugenzugabe statt. Thermische, mechanische und elektrische Verfahren werden unter dem Sammelbegriff „physikalische“ Verfahren zusammengefasst. Vielseitige Techniken wie z. B. Rührwerkskugelmühlen, Hochdruckhomogenisatoren oder Ultraschalltechniken werden bei der maschinellen bzw. elektrischen Schlammhydrolyse verwendet. Die rein thermische Hydrolyse wird meist bei 140°C bis 160°C betrieben, wohingegen die Kombination von thermischen und chemischen Desintegrationsverfahren bei Temperaturen im Bereich zwischen 60°C und 80°C stattfindet. Je nach gewählten Desintegrationsverfahren wird bei einer nachgeschalteten Faulung der oTR-Abbaugrad um 2% bis 50% gesteigert. Dies führt im gleichen Maße zu einer Steigerung des Faulgasanfalls und einer Verringerung der Klärschlamm-entsorgungsmenge. Weitere positive Effekte der Desintegration sind eine Verringerung der Schlammviskosität, eine Verminderung der Schwamm-schlamm- und Schaumbildung im Faulbehälter (Zerstörung von Fadenbakterien) und eine Verbesserung der Entwässerbarkeit des Klärschlammes. Ein Nachteil der Desintegration ist, dass die Rückbelastung aus der Schlamm-entwässerung deutlich zunimmt. Bei der Faulung von desintegriertem Überschussschlamm kommt es zu einer höheren Rückbelastung durch Stickstoff und bei der thermischen Hydrolyse zusätzlich zu einer Rückbelastung durch schwer abbaubaren CSB. Außerdem sind bei chemischen Desintegrationsverfahren ökologische Auswirkungen der eingesetzten Chemikalien zu berücksichtigen. Unter Umständen ist auch mit einem erhöhten Flockungsmittelverbrauch für die Konditionierung des stabilisierten Klärschlammes zu rechnen. Unter günstigen Bedingungen kann für die mechanische Desintegration eine relative Steigerung des oTR-Abbaugrads und des Faulgasanfalls von 20% angenommen werden. Dabei wird meistens nur der Überschussschlamm oder eine Teilmenge des Schlammes behandelt. Bei einer anschließenden Entwässerung beträgt die relative Zunahme des Entwässerungsgrades etwa 8%. Bei der thermischen Desintegration wird meist der gesamte Überschussschlamm oder Rohschlamm behandelt. Es ist eine relative Steigerung von ca. 30% für den oTR-Abbaugrad und den Faulgasanfall zu erwarten und der Entwässerungsgrad verbessert sich deutlich um ca. 20%. Im Verhältnis zur Abbaugradsteigerung sind jedoch in beiden Fällen die Stickstoffrückbelastung und die Erhöhung des Flockungsmittelbedarfs in gleicher Größenordnung zu beachten. Die zusätzlichen Energie- und Investitionskosten für die Desintegrationsverfahren erfordern, dass bei einer Wirtschaftlichkeitsprüfung in Abhängigkeit vom Anwendungsfall alle Vor- und Nachteile bilanziert werden (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlamm-Desintegration" 2009b).

Der erhöhte Energiebedarf durch die Desintegration wird durch die zusätzlich erzeugte Energie in Form von Faulgas aufgewogen bzw. meistens überschritten. Bezogen auf die Energiebilanz der Desintegration ist festzustellen, dass chemisch-thermische und rein thermische Verfahren schon bei geringer Abbaugradsteigerung (4 bzw. 9%) eine positive Energiebilanz aufweisen. Dahingegen ist die Energiebilanz von mechanischen Verfahren in Abhängigkeit von deren Energieverbrauch oft erst bei höheren Abbaugradsteigerungen positiv (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlamm-desintegration" 2009b).

Beispiele in Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz ist die Schlammbehandlung in Pirmasens-Blümelstal mit einer Thermodruckhydrolyse ausgestattet. Dabei wird der Überschussschlamm bei Temperaturen von bis zu 200°C hydrolysiert. Somit wird eine Steigerung der Biogasausbeute aus dem Überschussschlamm von 50% erreicht, was 25 % des Gesamtgasanfalls entspricht (Stadt Pirmasens ohne Datum).

Außerdem wurde auf der Kläranlage Oppenheim mithilfe eines mechanischen Desintegrationsverfahrens der Faulgasanfall um ca. 20% erhöht (Abwasserwerk Nierstein-Oppenheim ohne Datum). Auf Grund hoher Wartungskosten wurde die Anlage außer Betrieb genommen.

Die Kläranlage in Bad Kreuznach hat eine Ausbaugröße von 110.000 Einwohnerwerten und behandelt eine Abwassermenge von 30.345 m³ pro Tag. Das Volumen der beiden Faulbehälter beläuft sich auf insgesamt 5.000 m³. Im Zeitraum von 2011 bis 2014 wurde die elektrokinetische Desintegrationstechnik BioCrack auf der Kläranlage zur Behandlung von eingedicktem Überschussschlamm eingesetzt. Mit Hilfe des Verfahrens konnte der Gasertrag um 5 bis 11 % gesteigert werden (Vogelsang 2015). Im Jahr 2017 wurde auf der Kläranlage die Ultraschall-desintegration der Firma UltraWaves in Betrieb genommen.

3.6.2 Potenzial

Aufgrund der erforderlichen Investition für die Desintegrationsanlage und des zusätzlichen Betriebspunktes wird das Verfahren in der Regel erst bei Faulungsanlagen ab etwa 50.000 EW wirtschaftlich einsetzbar (MKULNV NRW 2014). In Anlehnung an Müller et al. (2008) wird für diese Anlagen im Rahmen der Potenzialabschätzung eine Steigerung der Faulgasproduktion um 30 % angenommen. Der erhöhte Zellaufschluss durch Ausstattung aller Anlagen der Klassen IV und V mit einer Klärschlamm-desintegration weist ein theoretisches Potenzial von rd. 3,1 GWh_{el}/a auf. Allerdings wird der Energieverbrauch der Kläranlagen durch den Einsatz der Desintegration erhöht. Die Spannweite beträgt laut (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlamm-desintegration" 2009a) dabei in Abhängigkeit vom Verfahren 0,5 bis 20 kWh_{el}/m³. Ebenso wird die Erhöhung des Sauerstoffbedarfs in der biologischen Stufe infolge einer erhöhten Stickstoff-Rückbelastung nicht berücksichtigt.

3.7 Mehrstufiger Betrieb

3.7.1 Grundlagen

Die Verfahrenswahl der Faulung hat deutliche Auswirkungen auf den Faulprozess und wirkt sich wesentlich auf den Abbaugrad und die Gasproduktion aus. In der Regel werden die Faulbehälter als kontinuierlich durchflossene und vollständig durchmischte biologische Reaktoren geplant und betrieben.

Folgende Betriebsweisen der Faulung sind grundsätzlich zu unterscheiden:

- ein- oder mehrstufige Faulungen
- Faulungen ohne oder mit gezielter Trennung der anaeroben Abbauprozesse (zweistufige Methanisierung)
- mesophile oder thermophile Faulungen
- hoch- oder schwachbelastete Faulungen
- Faulungen mit oder ohne Biomasseanreicherung

Findet der vierstufige anaerobe Abbauprozess organischer Substanzen (Hydrolyse, Versäuerung, Acto-genese, Methanogenese) in einem Reaktor statt, handelt es sich um eine **einstufige Faulung**. Das gilt auch, wenn mehrere Faulbehälter parallel betrieben werden. Bei der **mehrstufigen Faulung** werden mehrere bzw. in der Regel zwei Faulbehälter in Reihe betrieben. Diese zweistufigen Verfahren sind bei gleichem Gesamtreaktorvolumen effizienter als einstufige Verfahren, da durch eine günstiger Verweilzeitverteilung ein schnellerer oder weitergehender Abbau erreicht wird (DWA 2014). Reaktionskinetisch wird durch die Kombination einer ersten hoch belasteten Stufe und einer zweiten schwach belasteten Stufe ein in Summe höherer Abbaugrad der organischen Substanz erreicht. Die zweistufige Betriebsweise führt daher im Vergleich zum einstufigen Anlagenbetrieb bei einer Temperatur von 37 °C und gleicher Faulzeit zu einem ca. 10 % höheren Abbau der organischen Substanzen. In Rheinland-Pfalz wurde das Prinzip der zweistufigen Faulung beispielsweise bei der Kompaktfaulung auf der Kläranlage Linz-Unkel ausgenutzt (Jakob und Siekmann 2012).

Wird bei zweistufigen Anlagen eine Trennung der bei der Faulung ablaufenden Abbauprozesse Versäuerung und Methanisierung vollzogen, spricht man von einer **zweistufigen Methanisierung**. Um eine hochaktive Biozönose zu etablieren, werden die Milieubedingungen im ersten Reaktor so angepasst, dass die hydrolysierenden und versäuernden Bakterien optimale Wachstumsbedingungen vorfinden. Dementsprechend werden im zweiten Reaktor die Milieubedingungen auf die acetogenen und methanogenen Bakterien abgestimmt (Bischofsberger et al. 2005).

Mesophile Faulungen werden im Temperaturbereich von 30°C bis 40 °C betrieben. **Thermophile Faulungen** bei Temperaturen über 45°C betrieben. Da die Methanogenese im psychrophilen Temperaturbereich (0-20°C) sehr geringe Wachstumsraten aufweist (Bischofsberger et al. 2005) und daraus lange Behandlungszeiten resultieren, werden Faulungen in diesem Temperaturbereich technisch kaum noch umgesetzt (Siekmann 1986). Eine unbeheizte Faulung ist zwar möglich, wird jedoch nur in warmen Klimazonen eingesetzt. Bei Temperaturen unter 4°C kommt der anaerobe Abbau zum Erliegen (Leschber und Loll 1996). Die meisten bekannten methanogenen Organismen sind mesophil. In der Literatur werden Temperaturen zwischen 30°C und 40°C (Bischofsberger et al. 2005) bzw. 32°C und 42°C (KTBL 2007) für die maximale Stoffwechselaktivität angegeben. Es gibt auch thermophile und selten hochthermophile Methanbakterienstämme mit Temperaturoptima zwischen 50°C und 57°C

(KTBL 2007) bzw. 65 und 75°C (Bischofsberger et al. 2005). Da die Hydrolyserate bei Temperaturen über 40°C nur noch schwach steigt, ist nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) der thermophile Abbau nicht wesentlich schneller als der mesophile Abbau. Die von Fair und Moore (1937) aufgestellte These, dass der Bereich zwischen mesophiler und thermophiler Faulung instabil wäre, ist inzwischen durch vielfältige Praxiserfahrung widerlegt (Bauerfeld et al. 2009; DWA 2014). Der praktische Betrieb hat gezeigt, dass die Temperaturoptima der Biozönose nicht strikt eingehalten werden müssen. Diese können stattdessen an den Wärmehaushalt des Gesamtsystems der Kläranlage angepasst werden. Die Biozönose adaptiert sich gut bei langsamer und kontrollierter Temperaturänderung von maximal 2°C pro Woche (DWA 2014). Dies kann bei einer jahreszeitlich unterschiedlichen Betriebsführung ausgenutzt werden (DWA 2014). Thermophil ausgefallter Schlamm lässt sich schlechter entwässern als mesophil ausgefallter Schlamm (Roediger et al. 1990) und das anfallende Prozesswasser ist bei der thermophilen Betriebsweise durch die weitergehende biologische Umsetzung infolge der höheren Temperaturen stärker belastet (Lützner und Huber 2004). Als wesentlicher Vorteil der thermophilen Faulung ist die weitgehende Hygienisierung des Schlammes anzusehen. In Rheinland-Pfalz werden auf allen kommunalen Kläranlagen ausschließlich mesophile Faulungen betrieben.

Das Prinzip der **gezielten Biomasseanreicherung** basiert auf dem Schwarting-Uhde-Verfahren. Bei dem zweistufigen Verfahren wird ein erster mesophiler (35-37°C) Reaktor für Hydrolyse und Versäuerung, mit einem zweiten thermophilen Reaktor (55°C), für überwiegend Acetogenese und Methanogenese, kombiniert. Die beiden Reaktoren werden mit einer aufwärtsgerichteten Strömung durchflossen (Plettenberg und Trösch 1999). Durch eine Mikrofiltration des Ablaufs ist es möglich, den Biomasseanteil im Reaktor zu erhöhen. Daher kann bei der Hochlastfaulung bei einem zweifach mesophilen Betrieb die Verweilzeiten auf 5 bis 7 Tage gesenkt werden. Außerdem kann bei einer hohen Raumbelastung von 8-10 kg oTR/m³·d ein sehr hoher Abbaugrad der organischen Substanz von 50-70 % erreicht werden (Kempter-Regel et al. 2003; Kempter-Regel et al. 2015). Die Vorteile der gezielten Biomasseanreicherung werden zurzeit noch erprobt. Lutze et al. (2018) konnte bei einem anaeroben Membranbioreaktor im Pilotmaßstab bei gleicher Schlammaufenthaltszeit (anaerobes Schlammalter der Biomasse bei Anlagen mit Fest/Flüssigtrennung) keine Steigerung des CSB-Abbaus anhand der Methanausbeute nachweisen. Das Verfahren weist jedoch eine höhere Prozessstabilität bei einem hohen Co-Substratanteil auf (Lutze et al. 2018) und ermöglicht eine weitere deutliche Verringerung des Faulraumvolumens.

Die meisten Faulungen in Rheinland-Pfalz sind relativ schwach belastet [im Mittel 1,14 kg oTR/(m³·d), vgl. Tabelle 1 Seite 5]. Durch eine Optimierung der Voreindickung kann eine **Steigerung der organischen Raumbelastung** [oTR/(m³·d)] erreicht werden, wodurch bei gleichbleibenden Volumen die Verweilzeit verlängert wird oder Reaktorvolumen eingespart werden kann.

Beispiele in Rheinland-Pfalz

Bei der Kläranlage Weilerbach (30.000 E) wurde ein hochbelasteter Reaktor mit einer Nachvergärung kombiniert. Der hochbelastete Faulbehälter wird mit maschinell eingedickten Rohschlamm von i. M. 6,4 % beschickt, hat eine Höhe von ca. 13 m, einen Durchmesser von ca. 6 m und ein Volumen von ca. 300 m³. Vom ersten Reaktor gelang der Schlamm durch Verdrängung in eine beheizbare Nachvergärung (Volumen = 190 m³). Diese wird nur erwärmt, wenn auf der Kläranlage Wärmeüberschuss vorhanden ist (Schmitt et al. 2017b). Durch die Nachvergärung ist eine Steigerung des Gasertrages um 10-20 % möglich (Krieger et al. 2012).

Die Kläranlage Edenkoben (50.000 E) wurde im Zuge der Umstellung der Schlammbehandlung von einer simultan aeroben Stabilisierung auf eine Schlammfäulung mit zwei Faulbehältern ausgestattet. Die Faulbehälter sind sowohl einstufig (parallel) als auch zweistufig (seriell) betreibbar. Im Normalbetrieb werden die Behälter seriell betrieben um einen maximalen Abbaugrad zu gewährleisten. Während der Weinbaukampagne wird die Anlage auf einen hochbelasteten Parallelbetrieb umgestellt (Sternad et al. 2017). Es handelt sich bei der Anlage um eine hochbelastete Fäulung ohne Biomasseanreicherung.

3.7.2 Potenzial

Die Mehrzahl der rheinland-pfälzischen Fäulungsanlagen betreibt 1-stufige Fäulungsanlagen (92 %). Eine mehrstufige Fäulung besitzt dagegen reaktionskinetische Vorteile und trägt zur verbesserten Entwässerungseigenschaft des Faulschlammes bei. Die 2-stufige Betriebsweise führt im Vergleich zur 1-stufigen bei der gleichen hydraulischen Verweilzeit im Faulbehälter zu einem um etwa 10 % besseren oTM-Abbau (Roediger et al. 1990). Alternativ wird derselbe Abbaugrad in einem um ca. 40 % kleineren Gesamtvolumen erreicht. Durch die Umstellung der fünf Anlagen mit mindestens zwei Faulbehältern auf mehrstufigen Fäulungsbetrieb, könnte eine Steigerung der Faulgasproduktion in diesen Anlagen um 11 % erzielt werden (MKULNV NRW (2014)), wodurch theoretisch jährlich eine zusätzliche Stromproduktion von etwa 1,1 GWh_{el}/a (13 %) generiert werden könnte.

3.8 Optimierte der Faulgasverwertung zur Stromerzeugung

3.8.1 Grundlange

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben verwertet ein Großteil der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz ihr Faulgas nicht ausschließlich zur Stromerzeugung. Einen gewissen Anteil wird über die Gasfackel verbrannt oder einer Wärmeerzeugung zugeführt. Abbildung 3.4 zeigt den Anteil der Fackelverluste für die betrachteten Kläranlagen. Es ist zu erkennen, dass die Hälfte der Anlagen unter 2% des jährlich erzeugten Faulgases abfackeln. Ca. $\frac{1}{4}$ der Anlagen verbrennen im Jahr 5% bis 20% des produzierten Gases über die Fackel. Bei diesen Kläranlagen könnte eine Vergrößerung der Faulgasbehälter oder ein Austausch der KWK-Anlage zu einer Verringerung der Fackelverluste führen. Nur wenige Anlagen weisen im Jahr 2014 einen Fackelverlust > 20% auf. Fackelverluste in dieser Größenordnung sind jedoch in der Regel durch Baumaßnahmen bei der Gasverwertung bedingt.

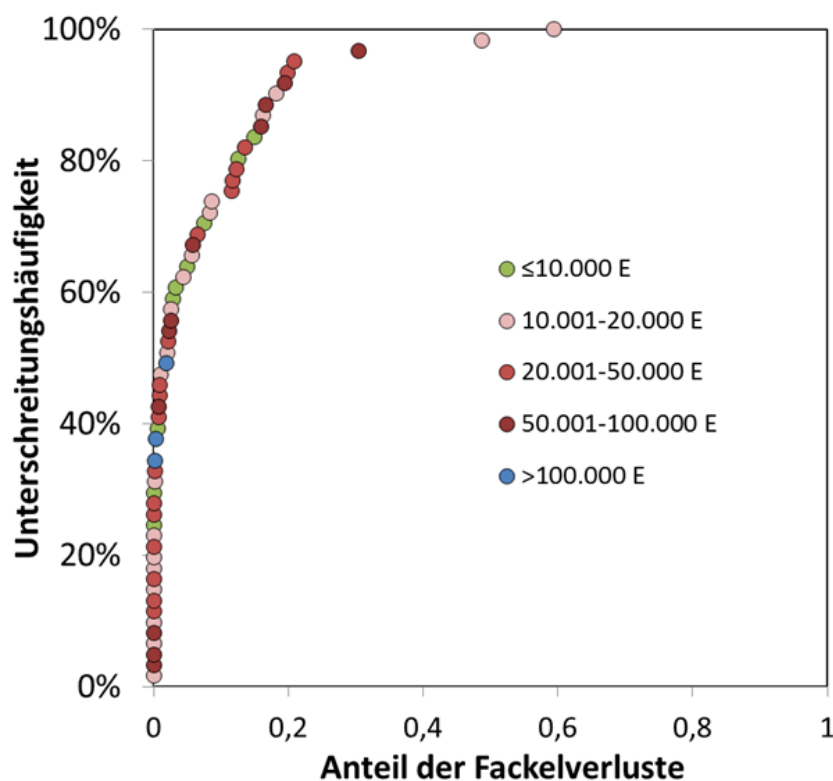


Abbildung 3.4: Anteil der Fackelverluste je Faulungsanlage der jährlichen Gasproduktion (n= 61)

3,6 Mio. m³ Faulgas werden im Bezugsjahr ausschließlich für die Wärmeerzeugung genutzt. Davon werden ca. 1,5 Mio. m³ Faulgas bei der Kläranlage Mainz für die Klärschlamm-trocknung verwendet. Eine Steigerung der Stromproduktion durch eine Verringerung des Anteils zur Wärmeproduktion erscheint daher in der Regel nur dann möglich, falls andere Möglichkeiten zur Wärmeerzeugung gefunden werden oder der Wärmebedarf der Anlage verringert wird.

3.8.2 Potenzielle Faulgasverwertung zur Stromerzeugung

Unter der Annahme, dass durch eine Optimierung der Betriebsführung oder der Gasspeichergröße die Fackelverluste bei 17 Anlagen (Fackelverluste zwischen 5 und 20%) verringert werden können, ist eine zusätzliche Stromproduktion von rund 1,8 GWhel/a theoretisch möglich.

Unter der Annahme, dass alle Faulungsanlagen die reine Wärmeproduktion aus Faulgas beenden und das Faulgas einer Stromproduktion zuführen, ist theoretisch eine zusätzliche Stromproduktion von 6,6 GWhel/a möglich. Dabei werden die Faulungsanlagen ohne KWK-Anlage (Kapitel 3.4) nicht berücksichtigt.

3.9 Maßnahmenvergleich

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen ein beachtliches Potenzial zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung und damit der Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen in RLP erkennen. Bezogen auf die 64 in die Potenzialabschätzung eingeflossenen Faulungsanlagen liegt das ermittelte Gesamtpotenzial für die untersuchten Maßnahmen bei rd. 34 GWh_{el}/a, was einer Erhöhung um den Faktor 1,8 entspricht. Je nach Maßnahme fallen die ermittelten Potenziale unterschiedlich hoch aus (Abbildung 3.6).

Das größte Potenzial weist mit rd. 20 GWh_{el}/a die Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten auf. Dieses ist jedoch durch Schlammverbundprojekte alleine, u. a. aufgrund unwirtschaftlicher Transportwege, nur zu ca. 8,6 GWh_{el}/a erschließbar. Eine Ausnutzung der freien Faulbehälterkapazitäten durch Co-Substrate ist ebenfalls denkbar und würde die Faulgasproduktion im besonderen Maße steigern. Da die Faulgasproduktion dabei in Abhängigkeit vom verwendeten Substrat sehr stark variiert, wurde an dieser Stelle auf eine Potenzialabschätzung verzichtet. Durch eine Nachrüstung von KWK-Anlagen bei Kläranlagen ohne Eigenstromerzeugung und einer Modernisierung der ineffizienten KWK-Anlagen, könnte die Stromerzeugung jährlich um weitere 1,4 bzw. 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden. Durch eine Nachrüstung von KWK-Anlagen bei Kläranlagen ohne Eigenstromerzeugung und einer Modernisierung der ineffizienten KWK-Anlagen, könnte die Stromerzeugung jährlich um weitere 1,4 bzw. 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden. Durch Erhöhung der Primärschlammabscheideleistung in der Vorklärung durch Vorfällung kann die Stromproduktion um etwa 4,4 GWh_{el}/a (14 %) erhöht werden, wohingegen die Absenkung des Schlammalters in der biologischen Stufe lediglich ein Potenzial in der Höhe von 0,5 GWh_{el}/a (4 %) aufweist. Die Verteilung dieser Potenziale auf die in die Auswertung eingeflossenen Anlagen ist in Abbildung 3.5 qualitativ dargestellt.

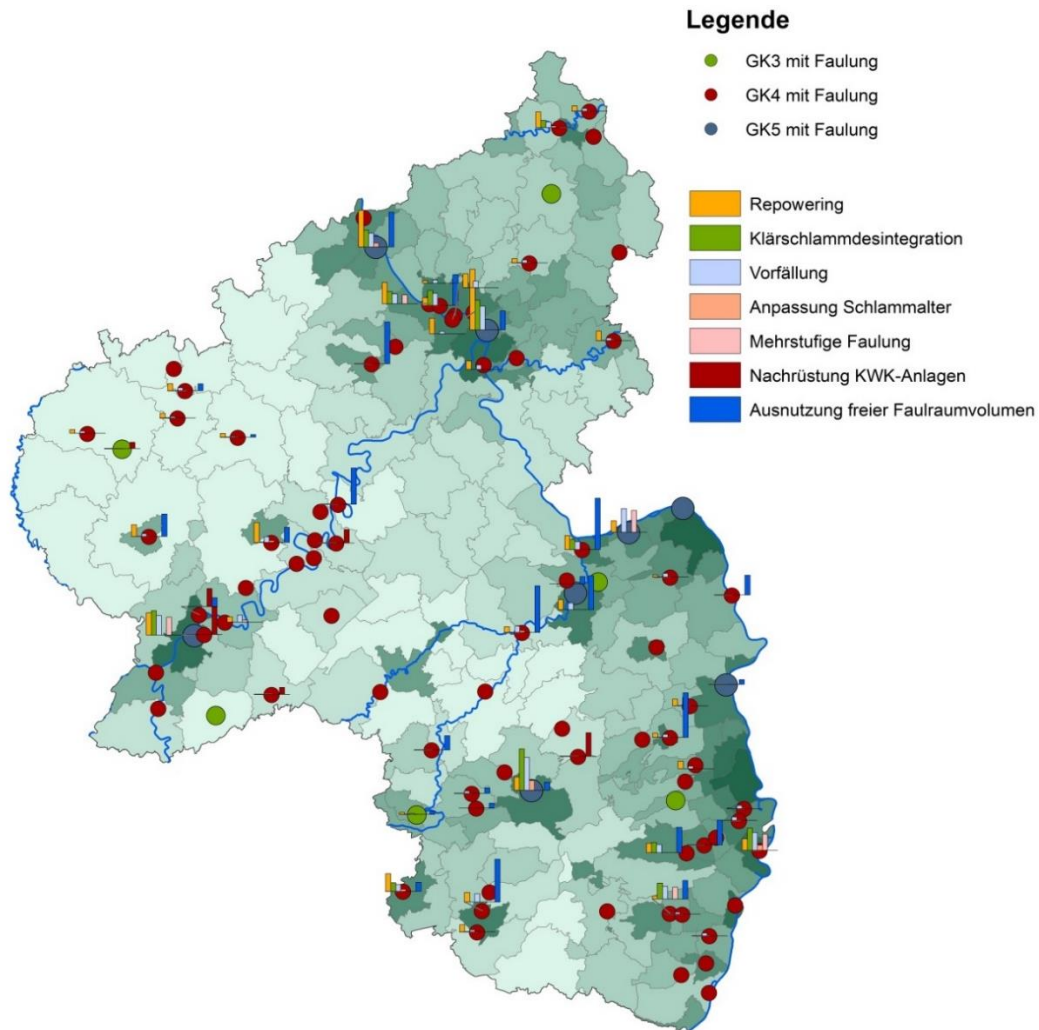


Abbildung 3.5: Potenziale der untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Stromproduktion der Faulungsanlagen in RLP

Unabhängig davon könnte durch eine Reduzierung der Fackelverluste ein Potenzial von 1,8 GWh_{el}/a erschlossen werden. Durch eine vollständige Verwertung des derzeit erzeugten Faulgases zur Stromerzeugung könnte die Stromerzeugung theoretisch um weitere 6,6 GWh_{el}/a erhöht werden.

Ein kumulatives Gesamtpotenzial, durch Addition aller Einzelmaßnahmen, kann an dieser Stelle nicht abgeleitet werden, da sich die Effekte teilweise gegenseitig beeinflussen. So haben beispielsweise Desintegrationsverfahren eine erhöhte Stickstoffrückbelastung aus dem Prozesswasser zur Folge, weswegen im Hinblick auf die Denitrifikation eine Vorfällung häufig nicht mit maximalem Wirkungsgrad realisiert werden kann. Die Eignung der Kombination von Einzelmaßnahmen ist daher im Einzelfall zu untersuchen.

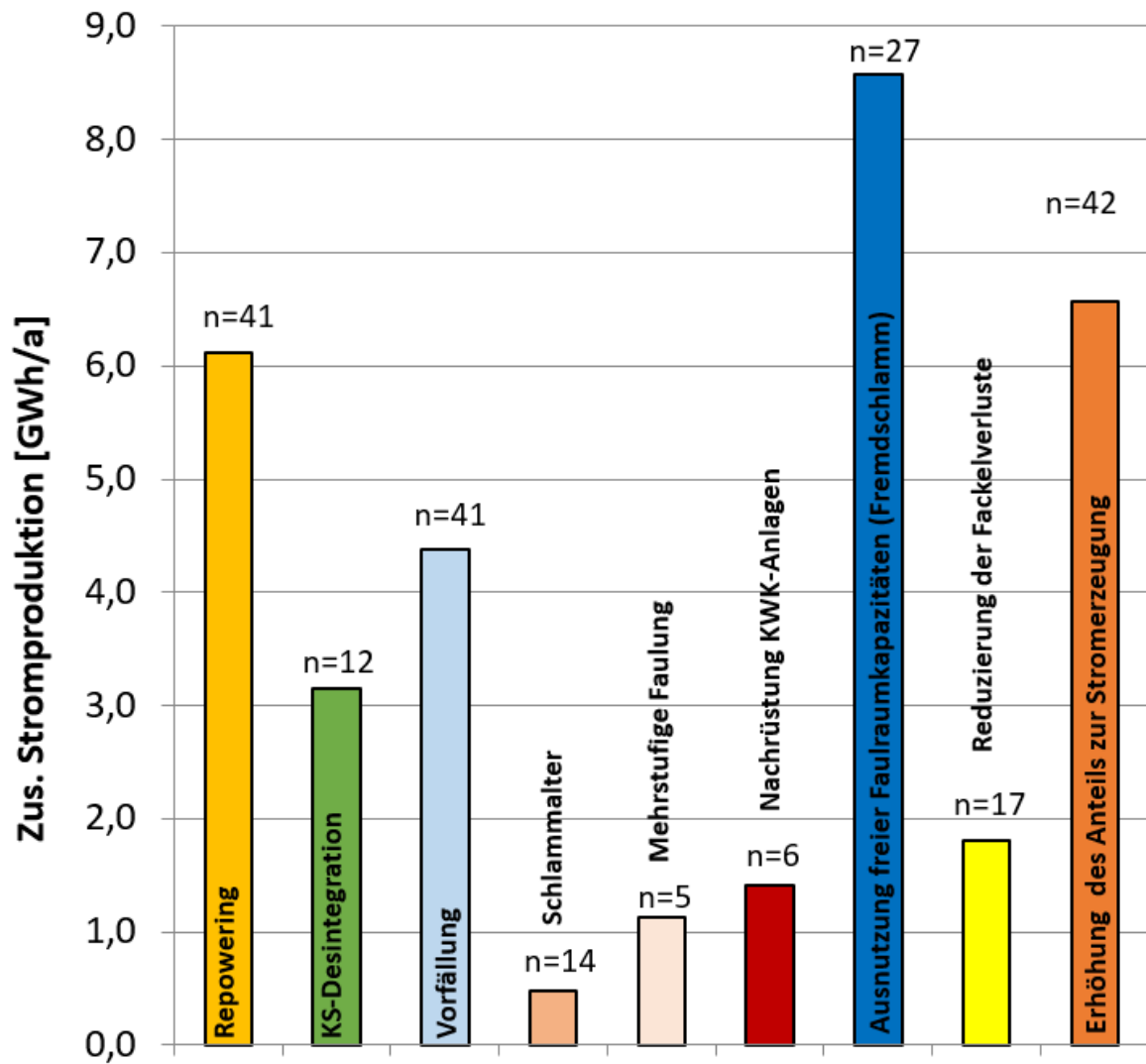


Abbildung 3.6: Vergleich der verschiedenen Maßnahmen

4 Entwicklung von Optimierungsstrategien⁵

4.1 Ansätze

Bei der Entwicklung von Optimierungsstrategien für Faulungsanlagen ist es wichtig, die Auswirkungen von Umstellungen auf die Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung zu berücksichtigen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verfahrensstufen bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen zu beachten. Die einzelnen Optimierungsansätze dürfen daher nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Generell können Optimierungsansätze in drei Bereichen unterschieden werden (Abbildung 4.1). Zum einen kann sich eine **Anpassung der Abwasserreinigung** positiv auf die Faulung auswirken, zum anderen sind Ansätze direkt bei der **Schlammbehandlung** zu finden. Maßnahmen in beiden Bereichen beeinflussen sich gegenseitig, da z.B. Prozesswässer der Schlammbehandlung der Abwasserreinigung zugeführt werden und somit ein Kreislauf in der Verfahrenskette entsteht. Die **Gasverwertung** kann unabhängig davon verbessert werden, muss jedoch i.d.R. an Änderungen bei der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung angepasst werden.

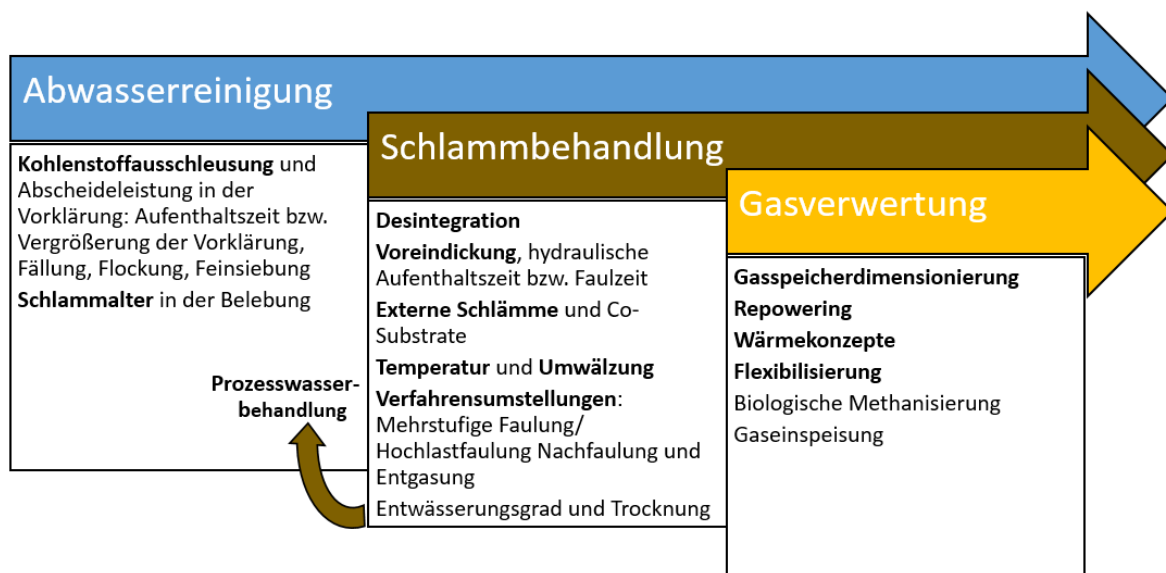


Abbildung 4.1: Optimierungsansätze in der Verfahrenskette von Faulungsanlagen

4.1.1 Abwasserreinigung

Ansätze zur Optimierung der **Abwasserreinigung** in Hinblick auf eine Optimierung der Faulung zur Erhöhung der Gasausbeute werden vor allem durch eine Verbesserung der Abscheideleistung in der Vorklärung erreicht. Primärschlamm erzielt mit rd. 570 l/(kg oTM_{ZU}) einen deutlich höheren Gasertrag als Überschussschlamm mit rd. 330 l/(kg oTM_{ZU}) (DWA 2014). Ein vermehrter Abzug von energiereichem Primärschlamm führt daher zu einer höheren Gasproduktion und zu einer Entlastung der Belebungsstufe, insbesondere bzgl. der Kohlenstoffbelastung. Die Primärschlammmenge kann durch

⁵ Kapitel 4 wurde im Tagungsband der Fachtagung „Faulung optimieren & Flexibilität wagen“ veröffentlicht. Zitiervorschlag: Dilly, T. C.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2017): Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

eine Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung, eine (Vor-)Fällung oder eine Kombination von Fällung, Flockung und Mikrosiebung erhöht werden. Da sich die Abscheideleistungen der unterschiedlichen Verfahren bzgl. Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor jedoch stark unterscheiden, müssen die für die biologische Abwasserreinigung notwendigen Nährstoffverhältnisse berücksichtigt werden. Eine Vielzahl von Faulungsanlagen weisen im Jahresdurchschnitt ein zu hohes Schlammalter auf, welches teilweise im Bereich der simultan aeroben Schlammstabilisation liegt (Knerr et al. 2016). Ein weiterer Optimierungsansatz im Bereich der Abwasserreinigung stellt daher die Anpassung des Schlammalters in der Belebung auf das für die Stickstoffelimination mindestens erforderliche Maß dar. Mit steigendem Schlammalter nimmt der Organikanteil im ÜSS-Schlamm deutlich ab und es fällt weniger Überschussschlamm an. Die Einstellung eines angepassten Schlammalters führt somit nicht nur zur Einsparung von Belüftungsenergie, sondern auch zur Erhöhung der Faulgasproduktion. Diese Anpassung sollte unter strenger Beachtung der Abwasserreinigungsziele erfolgen.

4.1.2 Schlammbehandlung

Die **Schlammbehandlung** kann man bei Faulungsanlagen in die Schlammvorbehandlung, die Faulung und die Schlammnachbehandlung unterteilen. In Abhängigkeit vom Schlammverwertungskonzept ist der Übergang zur Schlammverwertung fließend. Bei der Schlammvorbehandlung ist vor allem die Installation einer Klärschlammdeintegration von Bedeutung. Vier der 64 Faulungsanlagen in RLP, die bei der ZEBRAS-Befragung erfasst wurden, betreiben Einrichtungen zur Klärschlammdeintegration. Bei der Vorbehandlung kann durch eine Erhöhung des TR-Gehalts die hydraulische Aufenthaltszeit im Faulbehälter (=Faulzeit) erhöht werden. Da bei längeren Aufenthaltszeiten der Abbaugrad höher ist, wird dadurch die Gasproduktion gesteigert.

Des Weiteren können somit zusätzliche freie Faulraumkapazitäten generiert werden. Diese werden durch eine rechnerische Verkürzung der hydraulischen Verweilzeit auf eine Mindestverweilzeit (z.B. 25 d) ermittelt. Die Ausnutzung von freien Faulraumkapazitäten durch die Mitbehandlung von Fremdschlämme oder Co-Substraten führt in Abhängigkeit von der zugegebenen Substratmenge in der Regel zu einer signifikanten Steigerung der Gasproduktion. Die Auswertung der ZEBRAS-Befragung hat ergeben, dass 11 der 64 ausgewerteten Kläranlagen in Rheinland-Pfalz bereits Co-Substrate annehmen und 15 der 64 Anlagen Fremdschlämme von anderen Anlagen angeliefert bekommen. Werden diese Schlämme direkt der Faulung zugeführt, ist eine deutliche Steigerung der Gasproduktion möglich. Dieses Konzept wird z.B. auf der Kläranlage Selters umgesetzt (Jakob et al. 2013). Des Weiteren bestehen mit einer Verbesserung der Durchmischung und einer Anpassung der Temperatur weitere Ansätze zur Optimierung der Faulung. Vor allem beim Neubau von Faulungsanlagen ist auch die Wahl des Verfahrens entscheidend. So können mehrstufige Faulungsanlagen, hochbelastete Faulungsanlagen oder Hochlastfaulungen (Faulungsanlagen mit gezielter Biomasseanreicherung durch eine Trennung der Feststoffverweilzeit von der hydraulischen Verweilzeit) mit deutlich geringeren Faulzeiten betrieben werden (vgl. Kapitel 3.7.1). Eine Umstellung von Parallel- auf Reihenbetrieb im Bestand erscheint daher ebenfalls sinnvoll, da eine günstigere Verweilzeitverteilung in den Reaktoren dazu führt, dass ein besserer Abbau bei gleichem Gesamtvolumen erreicht wird bzw. bei gleichem Abbaugrad ein geringeres Volumen erforderlich ist.

Wie bereits beschrieben, fallen in der Schlammbehandlung stickstoffreiche Prozesswässer an. Werden diese dem Kläranlagenzulauf zugeführt, wird das C/N-Verhältnis verringert und damit die Denitrifikationskapazität reduziert. Bei einer Trocknung des Klärschlammes am Standort oder einer

Mitbehandlung von Fremdschlämmen ist die Belastung durch Prozesswasser besonders zu berücksichtigen. Dabei wird es in einigen Fällen notwendig sein, eine getrennte Prozesswasserbehandlung auf der Kläranlage zu implementieren. In RLP wird auf der Kläranlage Betzdorf in Wallmenroth/Muhlau derzeit eine Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation in Betrieb genommen.

4.1.3 Gasverwertung

Offensichtliche Ansätze bei der **Gasverwertung** sind eine Vergrößerung des Gasspeichers zur Erhöhung der Flexibilität oder eine Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung. Das sogenannte Repowering bzw. die Erneuerung alter KWK-Anlagen ist dabei meist die erste Option, die zu einer deutlichen Steigerung der Stromerzeugung führt.

Weniger bekannt sind hingegen das Umsetzen von Wärmekonzepten oder die Flexibilisierung der Strom- oder auch der Gaserzeugung. Die bedarfsorientierte Stromerzeugung und die Einbindung von Speicherkonzepten verbessern den Eigenversorgungsgrad der Kläranlage und sind notwendig, falls eine autarke Energieversorgung der Kläranlage angestrebt wird. Die Integration von Faulungsanlagen in Flexibilitäts- und Speicherkonzepte sowie eine Teilnahme am Regelenergiemarkt (Schäfer et al. 2017a; Salomon und Pyro 2017) sind dabei Ansätze, welche die Bilanz von Energieeinkauf, Eigenerzeugung und -verbrauch weiter optimieren können. Ansätze hierzu finden sich bspw. im Projekt arrivee (Schmitt et al. 2017a), wo weitere Zukunftskonzepte, wie die Integration von Power-to-Gas-Technologien, die Aufbereitung des Faulgases durch biologische Methanisierung und die Einspeisung des aufbereiteten Gases ins Erdgasnetz, dargestellt werden.

4.2 Checklisten

Die genannten Ansätze der Optimierung sind somit weitgehend bekannt und deren Auswirkung in der Literatur hinreichend beschrieben. Ziel der Optimierungsstrategien ist es nun, den handelnden Personen (z.B. Kläranlagenbetreibern, Planern und Entscheidungsträgern) die Optimierungspotenziale der eigenen Anlage aufzuzeigen und eine Vorgehensweise zur Identifizierung der Potenziale an die Hand zu geben. Die Schwierigkeit besteht darin, dass im Regelfall bei unterschiedlichen Kläranlagen auch von unterschiedlichen Voraussetzungen auszugehen ist. So unterscheiden sich je nach Anlage die betriebenen Aggregate, die verfahrenstechnische Umsetzung, die baulichen Gegebenheiten und die anlagenspezifischen Rahmenbedingungen. Eine anlagenbezogene Betrachtungsweise ist daher unabdingbar, um die richtigen Schlussfolgerungen treffen zu können. Für die Entwicklung von übertragbaren und trotzdem konkreten Optimierungsstrategien ist es notwendig, die Zusammenhänge allgemeingültig darzustellen.

Im Folgenden werden Checklisten vorgestellt, die die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Optimierungspotenzialen beschreiben und dem Anwender ermöglichen, die anlagenspezifischen Eigenheiten der jeweiligen Kläranlage zu berücksichtigen. Es erfolgt demnach keine konkrete Auslegung von Verfahrensstufen, sondern der Anwender kann die Checklisten in einem ersten Schritt zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen verwenden. Im nächsten Schritt werden die Maßnahmen zur Erschließung des Potenzials dargestellt und darauf aufbauend die möglichen Auswirkungen in der Verfahrenskette beschrieben. Grundlage zur Erstellung der Checklisten bilden eine umfangreiche Literaturrecherche, die Analyse des IST-Zustandes der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz sowie die Betriebsdatenauswertung und Detailbetrachtung von vier Beispielanlagen. Die Checklisten wurden gemeinsam mit ausgewähltem Kläranlagenpersonal evaluiert.

Bereits existierende Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, wie der Energiecheck und die Energieanalyse nach DWA-A 216 (DWA 2015d), werden mit den hier entwickelten Checklisten um einen weiteren Schritt ergänzt. Im Rahmen der Energieanalyse wird ermöglicht, die Kläranlage im Vergleich zu anderen Anlagen einzuordnen, die Energiekenndaten mit anlagenspezifischen Idealwerten abzugleichen und ein generelles Optimierungspotenzial zu erkennen. Darauf aufbauend und deutlich darüberhinausgehend zeigen die entwickelten Checklisten direkte Ansatzpunkte zur Optimierung der Faulung und Faulgasverwertung auf. Sie können angewendet werden, wenn eine Optimierung der Anlage bereits vorgesehen ist. Für Faulungsanlagen, die beim Energiecheck und der Energieanalyse bereits sehr gut abschneiden, bieten die Checklisten dennoch die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen und zu heben, da auch eine Verfahrensumstellung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden.

4.2.1 Einsatz von Checklisten und deren allgemeiner Aufbau

Insgesamt wurden 16 Ansätze zur Optimierung betrachtet und 13 Checklisten zur Identifizierung des Optimierungspotenzials erstellt. Jede Checkliste stellt für sich einen Ausgangspunkt einer Optimierungsmaßnahme dar, sie ist jedoch immer im Kontext der gesamten Verfahrenskette mit anderen Checklisten verknüpft. Dadurch wird sichergestellt, dass die Auswirkungen einer ausgewählten Maßnahme auch bei nachfolgenden Verfahrensstufen berücksichtigt werden. In Abbildung 4.2 sind die im Rahmen des Projektes erstellten Checklisten als grüne Kreise dargestellt. Die Pfeile verdeutlichen die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Checklisten. Grau sind Ansätze der Optimierung dargestellt,

für die keine Checklisten erstellt wurden. Informationen zur Prozesswasserbehandlung und dem Verfahren der Deammonifikation sind in Anhang 8.3 zusammengefasst. Verbundkonzepte sind im Kapitel 3.1 beschrieben.

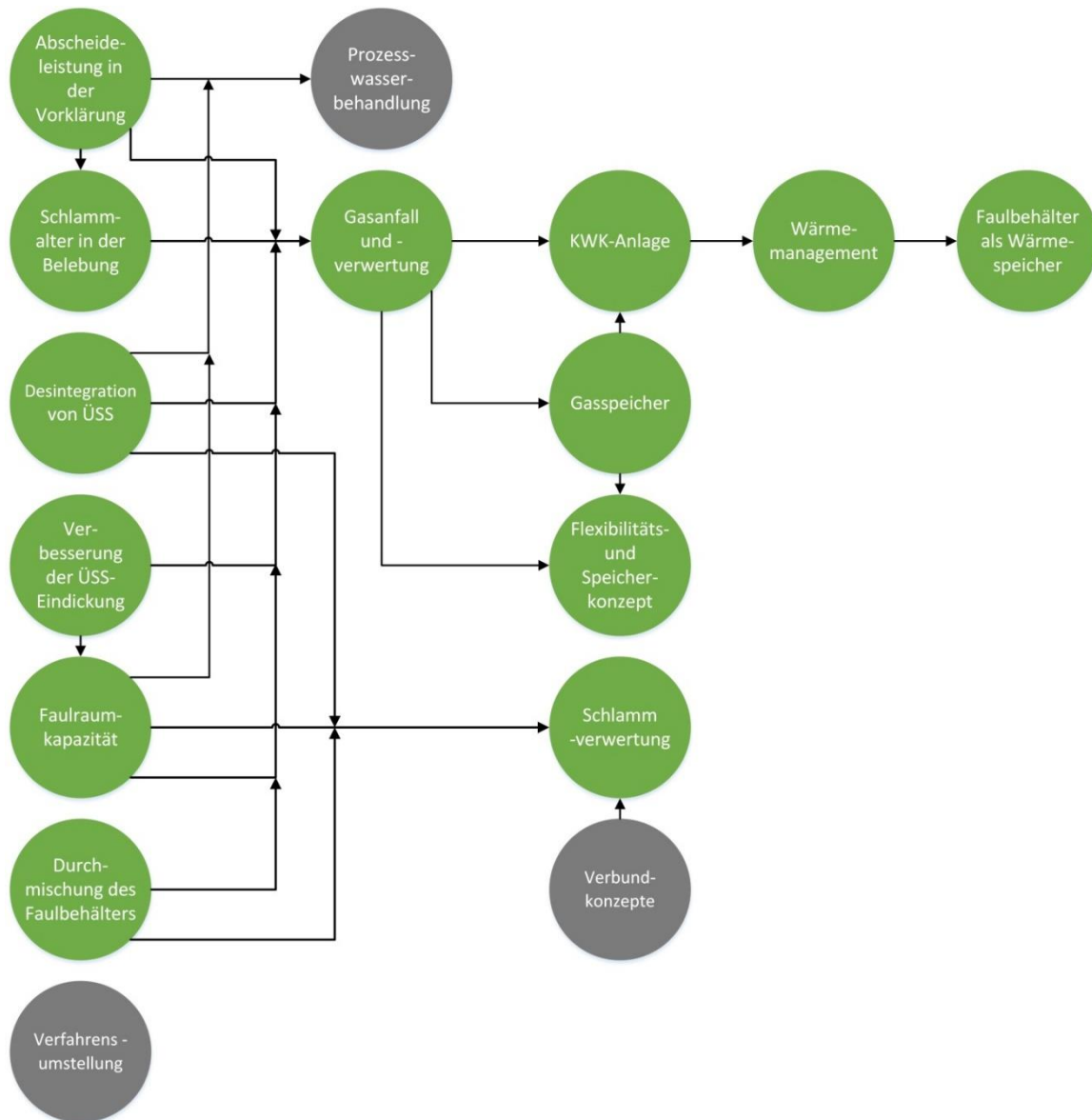


Abbildung 4.2: Übersicht und Verknüpfung der Checklisten

Beginnt man, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, beispielsweise mit der Checkliste zur Optimierung der Abscheideleistung in der Vorklärung, muss man abgesehen von den Ansätzen zur Prozesswasserbehandlung auch die Checklisten Schlammalter in der Belebung und die Checkliste Gasanfall und -verwertung berücksichtigen. Die Checkliste Gasanfall und -verwertung verweist wiederum auf die Checklisten KWK-Anlagen, Gasspeicher und Flexibilitäts- und Speicherkonzept. Von der Checkliste KWK-Anlage besteht eine Verknüpfung zum Wärmemanagement und der Ausnutzung des Faulbehälters als Wärmespeicher.

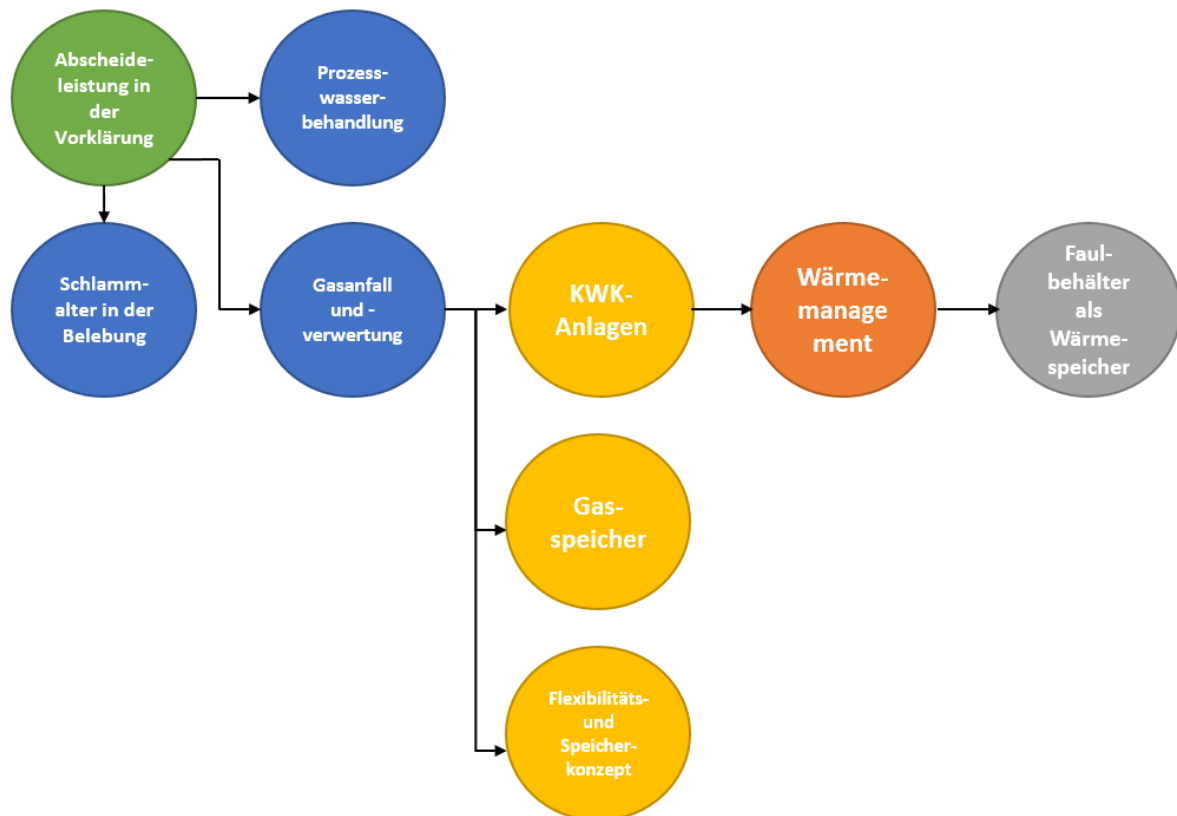


Abbildung 4.3: Checkliste Abscheideleistung in der Vorklärung und deren Verknüpfungen

Die Checklisten sind als Flussdiagramme aufgebaut. Es erfolgt keine konkrete Auslegung von Verfahrens-stufen, sondern der Anwender kann die Checklisten zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen verwenden. Danach werden die Maßnahmen zur Erschließung des Potenzi- als dargestellt und darauf aufbauend die möglichen Auswirkungen in der Verfahrenskette beschrieben. Die Vorgehensweise kann in fünf aufeinander aufbauenden Schritten beschrieben werden:

1. Schritt Einheitliche Ermittlung der Eingangsdaten
2. Schritt Erkennen des Optimierungspotenzials
3. Schritt Aufzeigen von Maßnahmen zur Optimierung
4. Schritt Darstellung von Auswirkungen auf die Verfahrenskette
5. Schritt Umsetzung der Optimierungsstrategie

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte sowie die Symbole in den Diagrammen anhand eines Bei- spiels erläutert.

4.2.2 Einheitliche Ermittlung der Eingangsdaten

Um zu gewährleisten, dass die Eingangsdaten für die Checklisten einheitlich ermittelt werden, wurde ein Datenkatalog erstellt, in dem die erforderlichen Kennzahlen und die einzelnen Rechenschritte zur Ermittlung dieser beschrieben sind. Um die Checklisten nicht zu überfrachten wurde der Datenkatalog ausgelagert. Der Verweis auf den Katalog erfolgt in den Checklisten mit blauen Parallelogrammen (siehe Abbildung 4.4).

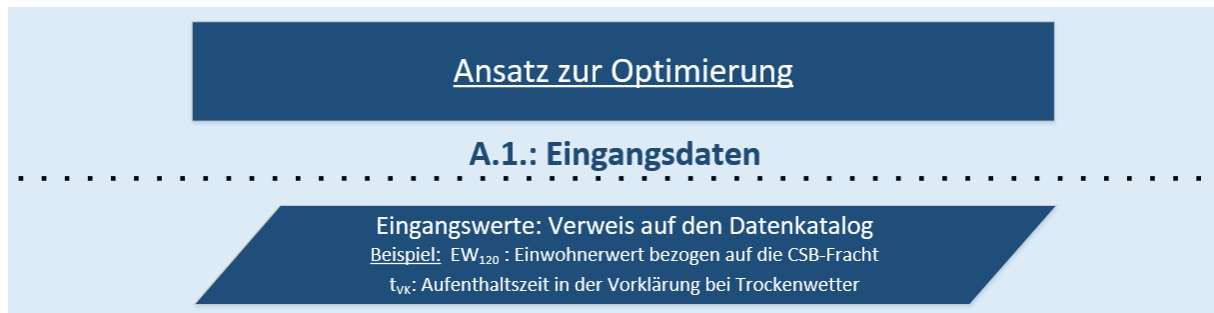


Abbildung 4.4: Ermittlung der Eingangsdaten - Checklistenbeispiel

4.2.3 Erkennen des Optimierungspotenzials

Unter Verwendung der zuvor erhobenen Eingangsdaten kann der Anwender entscheiden, ob bei dem vorliegenden Ansatz ein Potenzial für die betrachtete Anlage vorhanden ist. Diese Entscheidung wird mit einer Ja-Nein-Abfrage durchgeführt, für die im Projekt Orientierungswerte festgelegt wurden. Dabei durchläuft der Anwender die Checkliste bzw. das Flussdiagramm von oben nach unten, wobei jeweils die obere linke Ecke als Startpunkt definiert wurde. Die Ja-Nein-Entscheidungen werden mit blauen Rauten abgefragt und das Vorhandensein eines Optimierungspotenzials wird mit Smiley-Symbol dargestellt (siehe Abbildung 4.5).

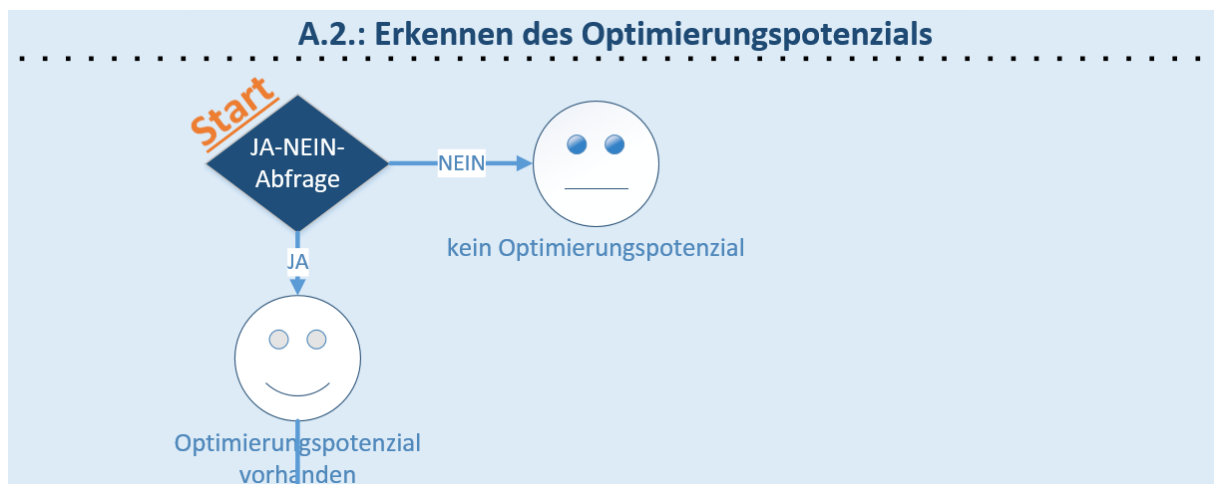


Abbildung 4.5: Erkennen des Optimierungspotenzials - Checklistenbeispiel

4.2.4 Aufzeigen von Maßnahmen zur Optimierung

Ist ein Optimierungspotenzial vorhanden, werden dem Anwender Maßnahmen zur Optimierung vorgeschlagen. Um die passende Maßnahme auszuwählen, werden unter Umständen weitere anlagenspezifische Gegebenheiten abgefragt. Dies erfolgt ebenfalls unter Verwendung von Ja-Nein-Entscheidungen. Eine von anlagenspezifischen Gegebenheiten unabhängige Auswahl eines Verfahrens wird mit einem Dreieck dargestellt (siehe Abbildung 4.6).

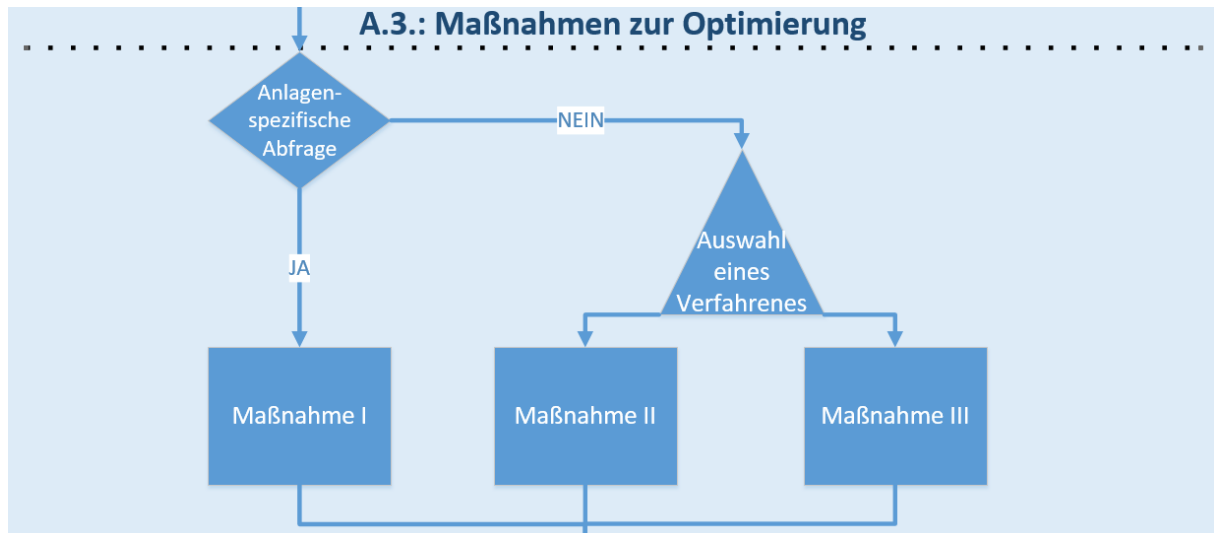


Abbildung 4.6: Maßnahmen zur Optimierung - Checklistenbeispiel

4.2.5 Darstellung von Auswirkungen auf die Verfahrenskette

Dieser Punkt dient dazu, die Auswirkungen einer Maßnahmenumsetzung auf die Verfahrenskette abzuschätzen. In der Regel hat eine Maßnahmenumsetzung Auswirkungen auf die nachfolgenden Glieder der Verfahrenskette. Daher ist es in vielen Fällen notwendig, auch die übrigen Optimierungsansätze der nachfolgenden Verfahrensstufen zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 5.2, S. 27). Der dargestellte Hauptpfad verdeutlicht, welche Auswirkungen in einer Bilanz berücksichtigt werden müssen. Als Bilanzierungsraum für die Bewertung wurde dabei die betrachtete Kläranlage festgelegt. Monetäre Auswirkungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht berücksichtigt. Unter Umständen kann eine Bewertung der Auswirkungen dazu führen, dass die Maßnahme nicht umzusetzen ist. Die Auswirkungen auf die Verfahrenskette können unter Umständen sehr komplex sein. Eine vollständige Integration aller Informationen wird als nicht zielführend angesehen, da sonst die Übersichtlichkeit der Checklisten nicht mehr gewährleistet werden kann. Bei der Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen ist es daher notwendig, Berechnungen außerhalb des Diagramms durchzuführen. Zum Beispiel kann es notwendig sein, die Belebungsstufe nach DWA-A 131 (DWA 2016) zu überprüfen. Der Vorteil der Checkliste ist, dass dem Anwender Hinweise gegeben werden, welche Schritte bei der Bewertung der Auswirkungen zu vollziehen sind.

Die Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Verfahrenskette werden in Kästen beschrieben, wobei positive Auswirkungen „grün“ und negative Auswirkungen „rot“ umrandet sind. Tabellenwerte, Literaturhinweise und Verweise auf bestehende Regelwerke oder Gesetze sind in orangenen Hinweisfeldern hinterlegt. Mit grünen bzw. grauen Kreissymbolen wird der Verweis zu den anderen Checklisten bzw. Ansätzen der Optimierung hergestellt. Diese Übergänge sollen gewährleisten, dass die Auswirkungen auf andere Verfahrensstufen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 4.7).

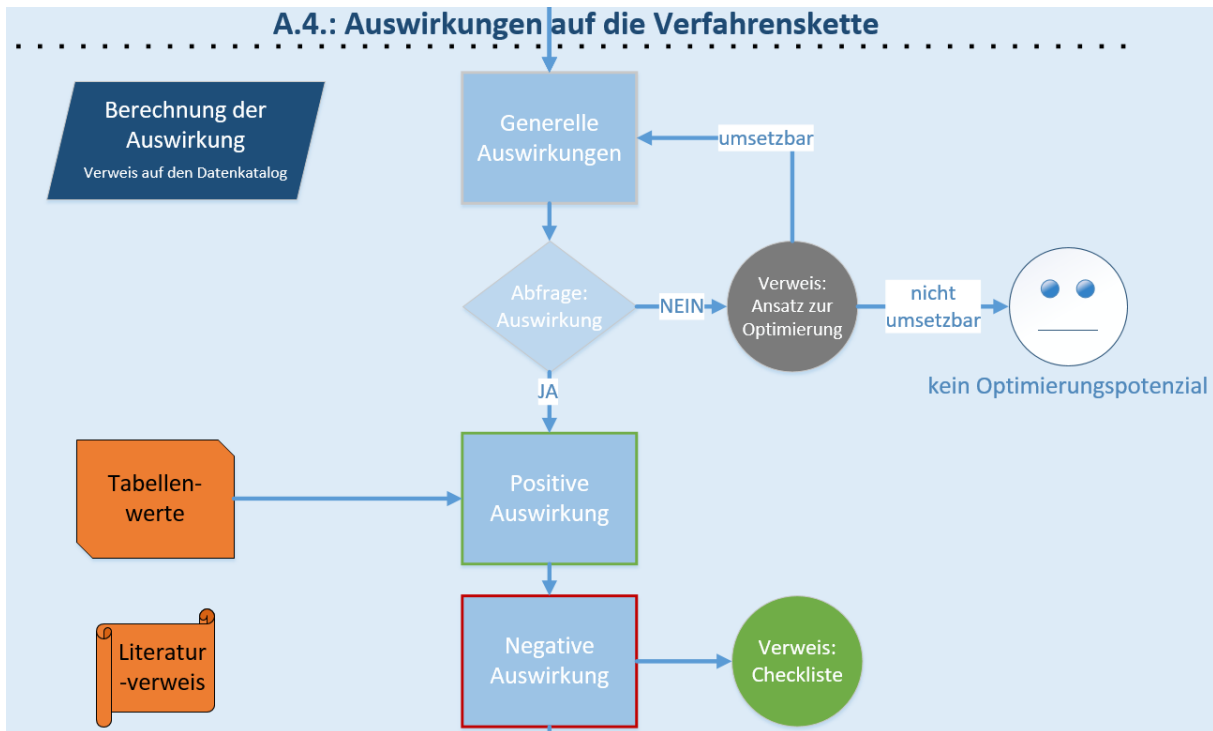


Abbildung 4.7: Auswirkungen auf die Verfahrenskette - Checklistenbeispiel

4.2.6 Umsetzung der Optimierungsstrategie

An dieser Stelle sind die wesentlichen Schritte, nämlich die Identifizierung des Optimierungspotenzials und die Auswahl der Maßnahme zur Erschließung des Potenzials, bereits abgeschlossen. Nachdem auch die Auswirkungen auf die Verfahrenskette bekannt sind, ist nun eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen (siehe Abbildung 4.8). Des Weiteren ist die Umsetzung der Maßnahme im Detail zu planen. In beiden Fällen sollte eine Detailplanung, ggf. unter Einbeziehung eines Ingenieurbüros, durchgeführt werden.

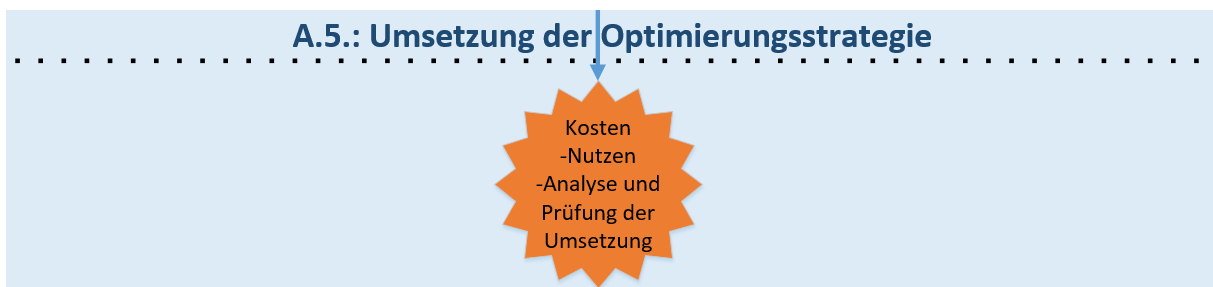


Abbildung 4.8: Umsetzung der Optimierungsstrategie – Checklistenbeispiel

5 Checklisten zur Optimierung von Kläranlagen mit Faulung

Im diesem Kapitel werden die dreizehn im Projekt erstellten Checklisten einzeln vorgestellt. Zusätzlich werden beispielhaft für die Checkliste Abscheideleistung in Vorklärung die Grundlagen dieser Checkliste ausführlich beschrieben.

5.1 Abscheideleistung in der Vorklärung⁶

Ziel der Checkliste (Abbildung 5.1) ist es zu überprüfen, ob der Massestrom an Primärschlamm erhöht werden kann. Primärschlamm hat einen höheren spezifischen Gasertrag als Überschussschlamm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der energiereiche Primärschlamm einen hohen Anteil an leicht abbaubaren organischen Substanzen enthält. Um eine hohe Faulgaserzeugung zu gewährleisten, sollte daher möglichst viel energiereicher Primärschlamm der Faulung zugeführt werden.

Es ist zu überprüfen, ob der Primärschlammanfall gesteigert werden kann. Abgesehen von einer Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung bietet sich im Bestand hierzu auch die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln in die Vorklärung (Vorfällung) an, wodurch neben der Phosphorelimination auch die Abscheideleistung in Bezug auf partikuläre organische Abwasserinhaltsstoffe verbessert wird. In Folge dessen kann zu einer Kohlenstoff-Mangelsituation in der biologische Stufe kommen. Dieser Mangel kann dort zu Bläh- und Schwimmschlammbildungen führen und wirkt sich negativ auf eine mögliche Denitrifikation aus. Diesen ungünstigen Nährstoffverhältnissen in der Belebung kann mit einer Prozesswasserbehandlung entgegengewirkt werden. Lässt sich diese Maßnahme wirtschaftlich nicht darstellen ist darauf zu achten nur so wenig Kohlenstoff, wie für die Denitrifikation benötigt wird, und Phosphor, wie für das Biomassewachstum notwendig ist, in die biologische Stufe einzuleiten. Somit wird die biologische Stufe entlastet, was zu Einsparungen bei der Sauerstoffversorgung und damit der erforderlichen Belüftungsenergie führt.

Für die Anwendung der Checkliste benötigt man folgende Eingangsdaten:

- Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht
- Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall
- Aufenthaltszeit in der Vorklärung
- C:N:P-Verhältnis im Zulauf zur Belebung
- Primärschlammanfall

Für die Berechnung der Eingangsdaten wird auf den Datenkatalog Anhang 8.1.1. bis 8.1.5. verwiesen.

⁶ Kapitel 5.1 wurde im Tagungsband der Fachtagung „Faulung optimieren & Flexibilität wagen“ veröffentlicht. Zitiervorschlag: Dilly, T. C.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2017): Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

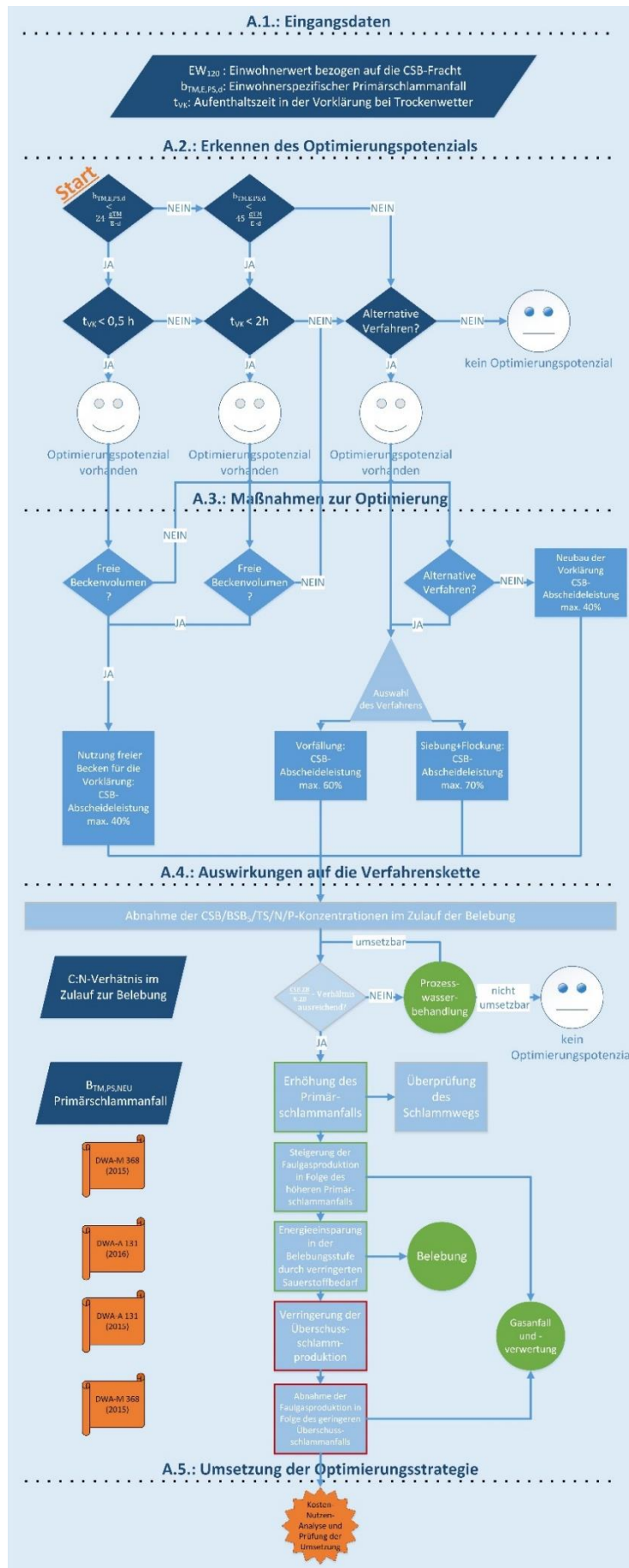


Abbildung 5.1: Checkliste A - Abscheideleistung in der Vorklärung

Um die Anwendung der Checkliste zu verdeutlichen, wird diese im Weiteren ausführlich dargestellt und die entsprechenden Grundlagen zur Checkliste vorgestellt und erläutert. Ergänzend dazu wird im Kapitel 6.1.2 die Checkliste „Abscheideleitung in der Vorklärung“ exemplarisch angewendet.

5.1.1 Eingangsdaten

Zur Beurteilung des Primärschlammanfalls wird empfohlen, als Vergleichswert die mittlere einwohner-spezifische Trockenmasse im Primärschlamm zu ermitteln. Dazu sind in einem ersten Schritt die angeschlossenen Einwohnerwerte zu berechnen. Im Einklang mit dem Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) wird die mittlere tägliche CSB-Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage, bezogen auf die einwohner-spezifische CSB-Fracht von 120 g/(E·d), bestimmt. Die maßgebende mittlere Fracht ist auf der Basis der erhobenen CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben zu ermitteln. Dafür liegen in der Regel bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 5.001 E bis 50.000 E mindestens 24 Messwerte und bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße größer 50.000 E mindestens 52 Messwerte für das Bezugsjahr vor. Bei dieser Berechnungsmethode wird der Mittelwert der tagesspezifischen Fracht gebildet.

$$EW_{120} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n C_{CSB,24h,Z,n} \cdot Q_{d,Z,n}}{0,12} [E]$$

Es ist zu beachten, dass keine direkte Vergleichbarkeit mit Datenquellen des DWA-Leistungsvergleichs möglich ist, da die mittleren CSB-Belastungen bei den Leistungsvergleichen aus den Jahresmittelwerten der CSB-Konzentration und der Jahresabwassermenge berechnet werden. Dadurch ergeben sich in der Regel höhere Einwohnerwerte.

Aus der Schlammeindickung und Schlamm Trocknung kann über Prozesswässer eine erhebliche Menge an CSB in den Zulauf eintragen werden. Die Messstelle zur Bestimmung der CSB-Zulaufkonzentration sollte daher vor der Zugabe des Prozesswassers liegen. Ist die CSB-Rückbelastung bei der CSB-Bestimmung im Zulauf enthalten, wird empfohlen, diese vor der Bestimmung der Einwohnerwerte abzuziehen. Dabei kann die Rückbelastung mit ca. 10% der CSB-Zulauffracht abgeschätzt werden (Neis et al. 1994; Cornel 1997). Dies soll jedoch nur dann erfolgen, wenn das Prozesswasser bei den 24-h Mischproben der CSB-Zulaufkonzentration enthalten ist.

Zur Berechnung der durchschnittlichen täglichen Primärschlamm trockenmasse soll der mittlere Trockenrückstand (TR) des Primärschlammes aus dem Bezugsjahr herangezogen werden. Es wird empfohlen, die TR-Bestimmung im Primärschlamm regelmäßig durchzuführen und dabei durch alternierende Probennahmen auch unterschiedliche Wochentage abzudecken. Als Richtwert können die Mindesthäufigkeiten zur Durchführung der 24h-Mischproben entsprechend ATV-DVWK (2001) [zurückgezogen] dienen. Demnach sollte zur Erstellung einer Massebilanz der Schlammbehandlung mindestens zweimal pro Monat der Trockenrückstand und der Glühverlust der Schlammströme ermittelt werden.

Die Dichte des Primärschlammes kann mit 1 kg/l angenommen werden. Die mittlere tägliche Primärschlammfracht ist daher über den Mittelwert des Trockenrückstands und der jährlichen Primärschlammmenge in m³ wie folgt zu ermitteln:

$$B_{TM,PS,d} = \frac{Q_{PS,d} \cdot \overline{TR}}{365} \text{ [kg/d]}$$

Die einwohnerspezifische Primärschlammfracht ergibt sich somit zu:

$$b_{TM,E,PS,d} = \frac{B_{TM,PS,d}}{EW_{120}} \text{ [g/(E·d)]}$$

Zur Berechnung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung wird der mittlere Trockenwetterzufluss ($Q_{T,d,aM}$) und das aktivierte Volumen der Vorklärbecken (V_{VK}) herangezogen.

5.1.2 Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung

In Rheinland-Pfalz liegt der Median der spezifischen PS-Fracht bei 46,4 g TM/(E·d). Laut (DWA 2014) ist bei Aufenthaltszeiten von 0,5 h ein Schlammanfall von 30 g TM/(E·d) (85-Perzentil) bzw. 24 g TM/(E·d) (50-Perzentil) zu erwarten. Eine Überprüfung, ob die Aufenthaltszeit in der Vorklärung erhöht werden kann, wird empfohlen, wenn eine spezifische PS-Fracht < 24 g/(E·d) und eine Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei mittlerem Trockenwetterzufluss von < 0,5 h vorliegt. Dabei soll ausgeschlossen sein, dass die Vorklärung im Bypass umfahren wird. Die Checkliste und Vorgehensweise ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

In einem ersten Schritt soll überprüft werden, ob derzeit nicht genutztes Vorklärbeckenvolumen vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, sollte ebenso wie der Einsatz einer Vorfällung oder einer Feinsiebung im Einzelfall auch der Neubau einer Vorklärung in Betracht gezogen werden. Bei einem geringen spezifischen Primärschlammfall und einer Aufenthaltszeit in der Vorklärung zwischen 0,5 und 2 h kann zwar die Ausnutzung von freiem Vorklärbeckenvolumen eine Steigerung des Primärschlammfalls bewirken, es wird jedoch kein Neubau der Vorklärung empfohlen. Sollten in diesem Fall keine freien Beckenvolumina vorhanden sein, ist die anfallende spezifische Primärschlammfracht bereits > 45 g/(E·d) oder liegt die Aufenthaltszeit bereits über 2 h, kann vermutlich lediglich durch die Anwendung eines alternativen Verfahrens eine Steigerung des Primärschlammfalls erreicht werden. In diesem Fall sollte eine Fällung oder die Kombination aus Feinsiebung und Flockung in Betracht gezogen werden. Bei dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den angebenen Werten um Orientierungswerte handelt. Sie sollen nicht als scharfe Grenzwerte verstanden werden.

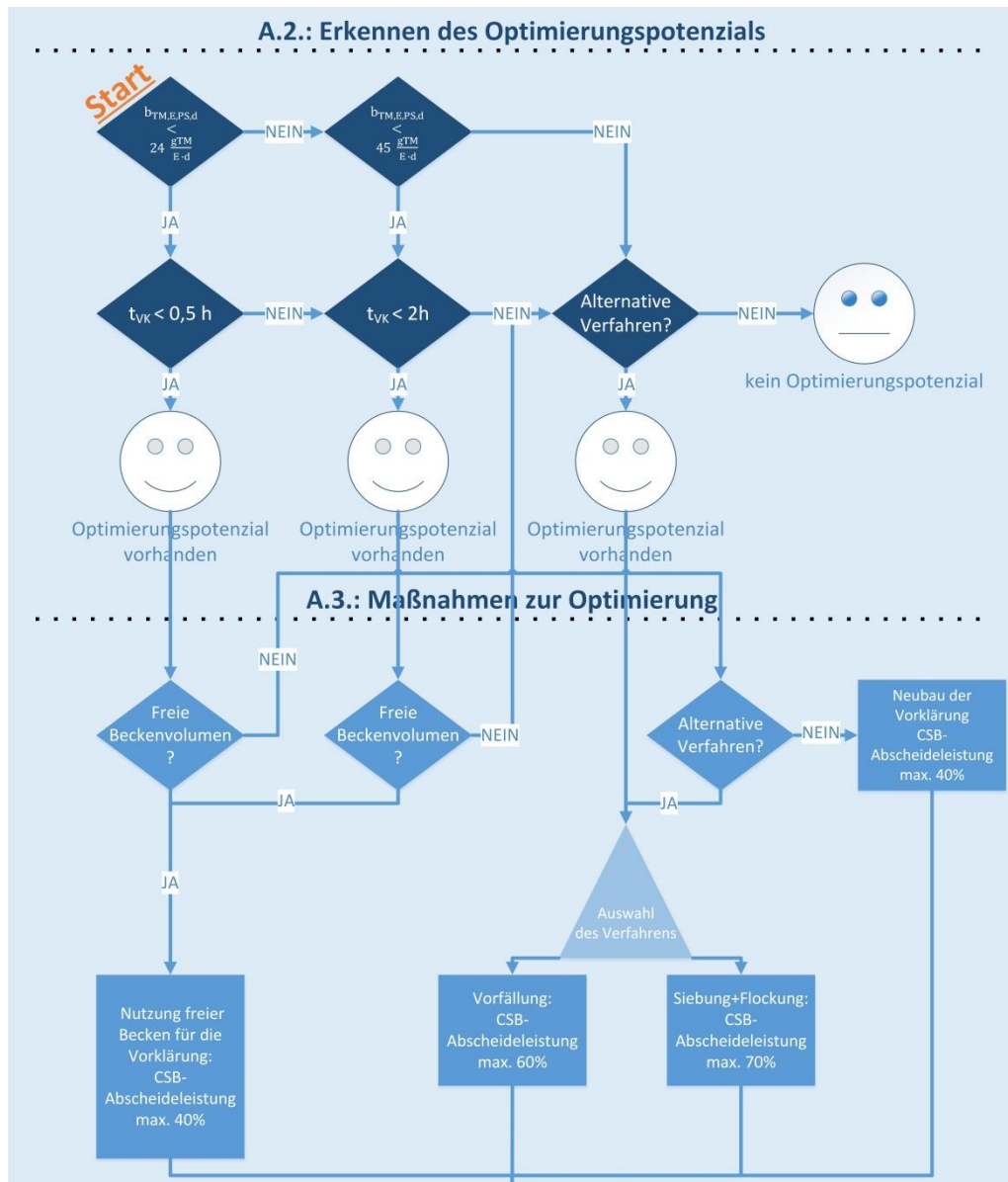


Abbildung 5.2: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung

5.1.3 Auswirkungen auf die Verfahrenskette

Das Ausnutzen freier Vorklärbeckenvolumen führt zu einer Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung. Für die Abscheideleistungen bei konventionellen Vorklärungen werden von der DWA Richtwerte in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit angegeben (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997; ATV-DVWK 2000; DWA 2016).

Die chemische Fällung in der Vorklärung wird bei der Abwasserreinigung vorwiegend zur Phosphorelimination eingesetzt. Bei der Vorfällung werden jedoch abgesehen vom Phosphor generell gelöste organische Abwasserinhaltsstoffe an die Fällmittel gebunden und der Vorkläreffekt wird erhöht. Die zusätzlich zu den absetzbaren Stoffen in der Vorklärung abgeschiedenen Fällprodukte und ausgeflockten organischen Substanzen führen somit zu einer erheblichen Entlastung der biologischen Stufe und einem deutlich gesteigerten Primärschlammanfall (Bischofsberger 1978). Im Jahr 1983 wurde in einer Studie von Klute et al. (1984) eine Befragung von Kläranlagenbetreibern zur Verwendung von Fäll- und

Flockungsmitteln durchgeführt. Die Studie zeigt, dass Fällungs- und Flockungsverfahren in 47,6% der Fälle mit dem Ziel der Phosphorelimination durchgeführt wurden, 7,6 % der Befragten als Ziel die Erhöhung der Reinigungsleistung hatten und 20% der Befragten als Ziel die Entlastung der biologischen Stufe der Kläranlage verfolgten. Dies verdeutlicht, dass die Ausschleusung von Kohlenstoff in der Vorklärung zu diesem Zeitpunkt bei einem Viertel der Befragten ausschlaggebend für die Verwendung von Fällungs- und Flockungsmitteln war.

Laut Bischofsberger (1978) ist in Abhängigkeit vom Fällmitteleinsatz eine BSB₅-Elimination von über 85% möglich. Von Zerres (1979) wurden bei Vorfällungsversuchen auf der Kläranlage Stuttgart-Büsnau Eliminationsraten in der Vorklärung bei einer phosphatfrachtproportionalen Fällmitteldosierung von 57% bezogen auf CSB und 51 % bezogen auf den BSB₅ erreicht. Typische Abscheideleistungen in der chemisch unterstützten Vorklärung werden in der englischsprachigen Literatur für TSS mit 70-90 %, für BOD mit 55-80%, für P_{ges} mit 65-95% und für N mit 35-40% angegeben (Poon und Chu 1999; Teleman et al. 2004). Die Abscheideleistungen sind dabei sehr stark von der Kontaktzeit, der Durchmischung und der Auswahl des Fällungsmittels abhängig. Feo et al. (2008) beschreiben eine Ausschleusung von CSB in der chemisch unterstützten Vorklärung von üblicherweise 30 bis 70 %. Bei dem Fällmittel Eisenchlorid₅₀ können sie jedoch eine CSB-Ausschleusung von 85,4 % nachweisen. Im ERWAS-Verbundprojekt E-Klär wurde ebenfalls der Chemikalieneinsatz in Hinblick auf eine verbesserte Ausschleusung von Kohlenstoff untersucht. Dort wurde das Ziel verfolgt, die im Primärschlamm gebundene Energie anschließend in der Faulung auszunutzen. Laut Pinnekamp (2017b) wurde in Fällungsversuchen im Labor eine CSB-Ausschleusung von 60% erreicht.

Eine Ausschleusung von CSB kann anstatt mit einer Vorklärung auch mit einer Feinsiebung erreicht werden. Pinnekamp (2017b) gibt als Ergebnis großtechnischer Versuche mit Feinsieben Ausschleusungsraten von 50% CSB bzw. 60% AFS an. Die maximal möglichen Ausschleusungen können jedoch deutlich höher liegen und werden von Pinnekamp (2017a) mit max. 75 % für CSB und max. für 95% AFS angegeben. Horn et al. (2009) geben für ein Feinsieb mit 0,2 mm Maschenweite eine Abscheideleistung von 31,3 % bezogen auf die CSB-Fracht an. Kink (2016) beschreibt eine Abscheideleistung der Feinsiebung für BSB₅ von 34-41%, für CSB von 34-41 %, für TS 53-60%, für TKN von 15-17 % und für P_{ges} von 12-14%.

Durch eine zusätzliche Fällmittelzugabe ist es möglich, die Abscheideleistung von Feinsieben deutlich zu erhöhen. So wird in Abhängigkeit vom Verhältnis des gelösten zum ungelösten CSB eine Abscheideleistung von 20% bis zu 70% des gesamten CSB erreicht, wobei bei einem hohen ungelösten CSB-Anteil die CSB-Reduktion verbessert wird (Horn et al. 2009). Laut Köppl und Frommann (2004), zitiert nach Horn et al. (2009), werden bei der Kombination aus Feinsiebung, Fällungs- und Flockungsmittel eine Reduktion von 95% der AFS, 65 % des BSB₅, 65% des CSB und 90% des P_{ges} bei Rohabwasser erreicht. Im CARISMO-Projekt des Kompetenzzentrums Wasser Berlin gGmbH wurde die Kombination einer Mikrosiebung (Maschenweite 100µm) unter Zugabe von Fällungsmittel in einem halbttechnischen Pilotversuch erprobt. Remy et al. (2014) erreichen dadurch eine Entfernung des CSB zwischen 70-85%, des Gesamt-Phosphors zwischen 70-90% und des Gesamt-Stickstoffs von etwa 20%.

Die im vorliegenden Projekt verwendeten Reduktionsraten sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in %

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	25 ^A	35 ^A	40 ^B	70 ^D	75 ^H
CSB	30 ^C	35 ^C	40 ^C	60 ^E	70 ^F
TS	50 ^C	60 ^C	65 ^C	80 ^D	95 ^F
N _{ges}	10 ^C	10 ^C	10 ^C	38 ^D	20 ^G
P _{ges}	10 ^C	10 ^C	10 ^C	80 ^D	80 ^G

A (ATV-DVWK 2000), B (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997), C (DWA 2016), D (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999) Mittelwerte, E (Pinnekamp 2017b), F (Horn et al. 2009), G (Remy et al. 2014) Mittelwert, H Annahme

Mit Hilfe dieser Informationen können die resultierenden Nährstoffverhältnisse im Zulauf der Biologie abgeschätzt werden. Abgesehen vom C:N-Verhältnis ist auch das C:P-Verhältnis zu beachten.

Das C:N-Verhältnis wird durch die Umsetzung der Maßnahmen abgesenkt und eine Denitrifikation findet nur dann statt, wenn den Mikroorganismen genügend verwertbarer organischer Kohlenstoff zur Verfügung steht⁷. Wird das benötigte Verhältnis nicht eingehalten, wird daher empfohlen zu überprüfen, ob eine Prozesswasserbehandlung das C:N-Verhältnis verbessern kann. Ist dies der Fall und die Prozesswasserbehandlung wirtschaftlich darstellbar, sollte diese umgesetzt werden.

Abbildung 5.3 zeigt, wie in der Checkliste die weiteren Auswirkungen auf die Verfahrenskette berücksichtigt werden. Die Erhöhung des Primärschlammanfalls hat zur Folge, dass auch der Schlammweg überprüft werden muss. So könnte eine Anpassung z.B. der Pumpen auf die sich ändernden Fördermengen notwendig werden. Die höhere Abscheideleistung führt zudem zu einer Erhöhung der Faulgasproduktion und zu einer Entlastung der biologischen Stufe. Hinweise zur Erhöhung der Faulgasproduktion können dem Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) entnommen werden und die Auswirkungen der Entlastung lassen sich mit dem Arbeitsblatt DWA-A 131 (ATV-DVWK 2000; DWA 2016) berechnen. Es ist zu erwarten, dass der Sauerstoffbedarf im Belebungsbecken sinkt. An dieser Stelle sollte auch eine Optimierung der Belebungsstufe in Betracht gezogen werden, weshalb die

⁷ Für die Denitrifikation ungünstig sind BSB₅/Nges-Zulaufverhältnisse <3,5:1 (Baumann et al. 2008) bzw. < 4:1 (Hansen et al. 2009). Entsprechend liegen ungünstige CSB/Nges-Verhältnisse bei 6,7 (LUBW 1997) bzw. 7 (Baumann et al. 2008) vor. Wird ein BSB₅/Nges-Verhältnis von 2,5:1 unterschritten, findet der Denitrifikationsprozess nur eingeschränkt statt und es kommt zu erhöhten Nitratlaufwerten (Winkler 2012). Für überschlägige Berechnungen kann bei der Denitrifikation davon ausgegangen werden, dass pro 1 g NO₃-N mindestens 3,5 g BSB₅ bzw. 5 g CSB benötigt werden (Baumann et al. 2016).

Nach DWA kann anhand des für den Zellaufbau der heterotrophen Biomasse benötigte Phosphor das Verhältnis CSB/P mit 200:1 angenommen werden (DWA 2016).

Checkliste Schlammalter in der Belebung anzuwenden ist. Aus der geringeren Belastung der Belebung folgt in jedem Fall eine Verringerung der Überschussschlammproduktion und dadurch auch eine Abnahme der Faulgasproduktion bezogen auf den Überschussschlamm (DWA 2014). Somit muss der Gasanfall neu berechnet werden, wozu die Checkliste Gasanfall und -verwertung herangezogen werden kann.

Nachdem die Auswirkungen auf die Verfahrenskette bekannt sind, ist eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen und die Umsetzung der Maßnahme im Detail zu planen.

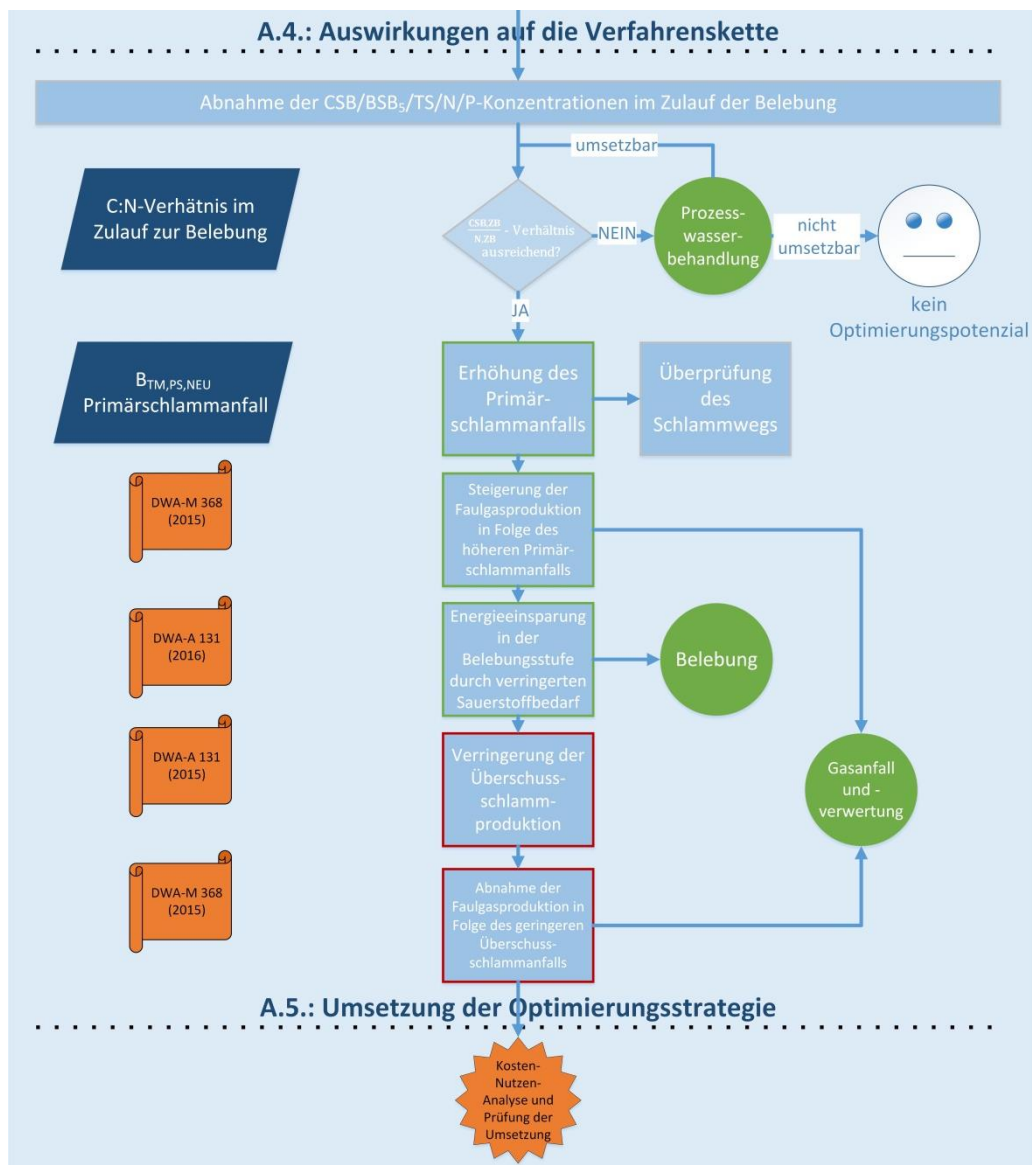


Abbildung 5.3: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette und Umsetzung der Optimierungsstrategie

5.2 Schlammalter in der Belebung

Ziel der Checkliste (Abbildung 5.4) ist es zu überprüfen, ob das Schlammalter in der Belebung gesenkt werden kann. Das Schlammalter kann über die Biomassenkonzentration im Belebungsbecken (TS_{BB}) eingestellt werden. Das erforderliche Schlammalter ist maßgeblich von der Temperatur und dem kläranlagenspezifischen Prozessfaktor abhängig. Der Prozessfaktor berücksichtigt Schwankungen der maximalen Wachstumsrate, die Höhe des Überwachungswerts für den Parameter Ammoniumstickstoff und Auswirkungen von Schwankungen der Stickstofffrachten im Zulauf (siehe Anhang 8.1.7). Bei der Ermittlung des Schlammalters sind das Gesamtschlammalter und das aerobe Schlammalter zu unterscheiden.

Zur Erreichung des Abwasserreinigungsziels ist die Gesamtschlammmasse, die im Belebungsbecken vorgehalten wird, die entscheidende Größe. Die benötigte Schlammmasse kann näherungsweise über das erforderliche Schlammalter und die spezifische Überschussschlammproduktion infolge des Kohlenstoffabbaus (BSB_5) abgeschätzt werden. Da das Belebungsbeckenvolumen bekannt ist, kann somit auch die minimal notwendige Biomassenkonzentration im Belebungsbecken (TS_{BB}) bestimmt werden. Durch eine Erhöhung des Überschussschlammzugs kann der TS_{BB} -Gehalt abgesenkt werden. Der TS_{BB} -Gehalt sollte aus betrieblichen Gründen nicht unter $2,0 \text{ kg/m}^3$ abgesenkt werden. Anlagenspezifisch sind ggf. höhere Werte einzuhalten. Die Checkliste berücksichtigt aus diesem Grund eine Anpassung des Belebungsbeckenvolumens. Durch eine Stilllegung von vorhandenen Beckenvolumen kann bei unterbelasteten Belebungsbecken die erforderliche Schlammmasse eingestellt und trotzdem ein ausreichender TS_{BB} -Gehalt gewährleistet werden. Es ist daher zu prüfen, ob einzelne Becken oder Teile eines Beckens stillgelegt werden können. Auch bauliche Maßnahmen sollten in Einzelfällen in Betracht gezogen werden.

Durch eine Anpassung des TS_{BB} -Gehalts ändern sich in der Regel auch die Absetzeigenschaften des Schlammes in der Nachklärung. Die Funktionsfähigkeit der Nachklärung ist daher zu überprüfen.

Für die Anwendung der Checkliste benötigt man folgende Eingangsdaten:

- Vorhandenes Gesamtschlammalter in der Belebung
- Erforderliches Gesamtschlammalter
- benötigter Feststoffgehalt in der Belebung

Für die Berechnung der Eingangsdaten wird auf den Datenkatalog Anhang 8.1.6 bis 8.1.8 verwiesen.

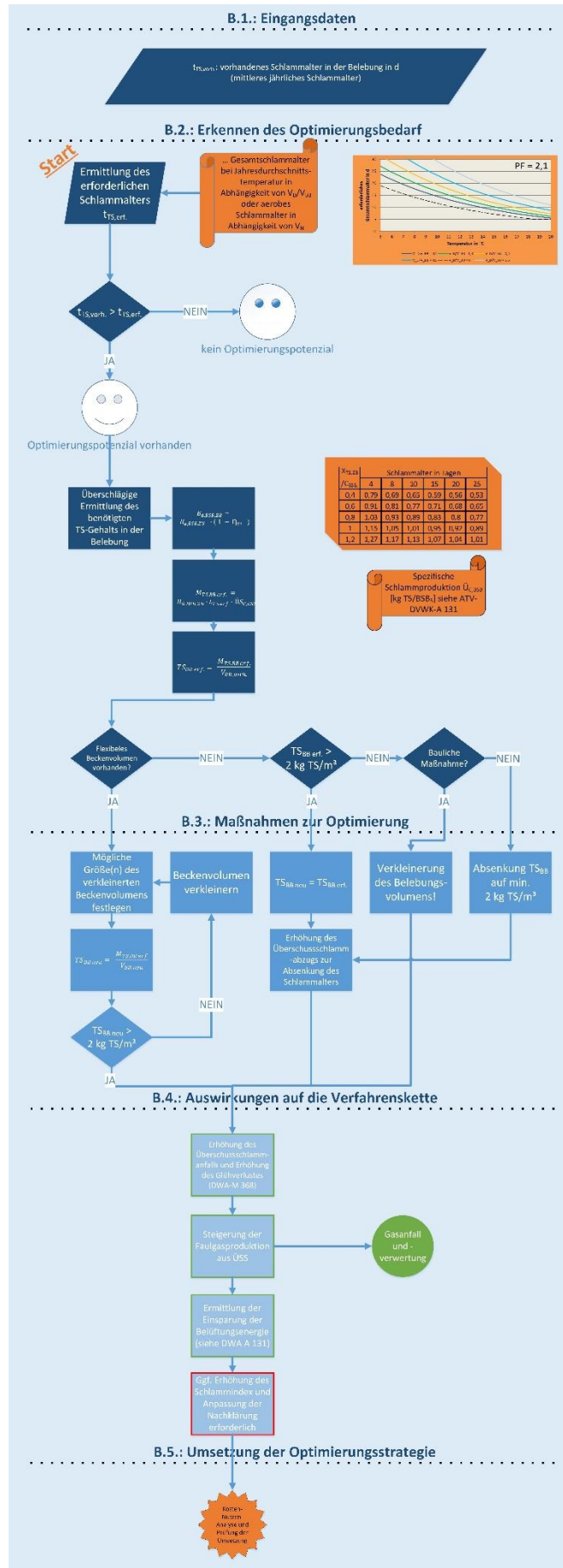


Abbildung 5.4: Checkliste B – Schlammalter in der Belegung

5.3 Desintegration von Überschussschlamm

Ziel der Checkliste (Abbildung 5.5) ist es zu überprüfen, ob eine Desintegration von Überschussschlamm sinnvoll erscheint um die Gasproduktion zu steigern. Primärschlamm ist allgemein sehr gut hydrolysierbar und es ist keine signifikante Erhöhung des Gasertrages durch eine Desintegration des Primärschlammes zu erwarten. Die Desintegration von Überschussschlamm hingegen führt meist zu einer deutlichen Verbesserung des Abbaugrades. Dadurch ist mit einer Mehrgasproduktion und einer Verringerung der zu entsorgenden Schlammmenge zu rechnen. Vor allem Faulreaktoren mit geringen Aufenthaltszeiten profitieren von einer ÜSS-Desintegration, da bei gleicher Aufenthaltszeit ein weitergehender Abbau der organischen Inhaltsstoffe des ÜSS stattfindet und sich somit ein entsprechend höherer Gasertrag einstellt. Rohschlamm, als Gemisch aus Primär- und Überschussschlamm, erreicht nach (DWA 2014) einen Gasertrag von ca. 440 l/kg oTM_{ZU}. Wird dieser Wert deutlich unterschritten, sollte ebenfalls eine Verbesserung des Gasertrags durch eine Implementierung einer Klärschlamm-Desintegration in Betracht gezogen werden, da die Desintegration grundsätzlich bei Schlämmen mit schlechtem Abbauverhalten eine deutliche Verbesserung erzielt.

Die Hydrolysierbarkeit ist nach Merkblatt DWA-M 302 (DWA 2015b) außerdem vom Schlammalter der eingesetzten Überschussschlämme abhängig. So ist bei Schlämmen mit einem hohen Schlammalter die Abbaubarkeit der Schlämme schlechter als bei Schlämmen mit geringen Schlammalter. Um einen hohen Aufschlussgrad zu erreichen, wird in der Regel auch ein Verfahren mit hohem Energiebedarf benötigt. Laut DWA (2015b) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei ÜSS-Schlämmen mit einem niedrigen Schlammalter ein hoher Aufschlussgrad auch durch Verfahren mit geringem Energieeintrag erreicht werden kann (z.B. elektrokinetische Desintegration). ÜSS-Schlämme von nitrifizierenden Anlagen erfordern dagegen Verfahren mit einem hohen Energieeintrag (z.B. thermisch-chemische Verfahren), um einen maximalen Aufschlussgrad zu erzielen. Im Projekt E-Klär wurde durch den Einsatz einer Thermodruckhydrolyse bei einer Faulung mit einer hydraulischen Aufenthaltszeit von 20 Tagen eine Erhöhung der Gasausbeute um 20 % (Pinnekamp 2017b) erreicht. Im gleichen Umfang hat auch der organische Abbaugrad zugenommen und die Entwässerbarkeit der Faulschlämme hat sich um 2-8% verbessert. Dabei war eine gleichzeitige Erhöhung des spezifischen Polymehrbedarfs um 33-75% (Pinnekamp 2017b) festzustellen.

Es ist zu berücksichtigen, dass sich die angegebenen Gasertragssteigerungen lediglich auf den Abbau des desintegrierten Überschussschlammes beziehen. Durch die anteilige Mischung mit Primärschlamm relativieren sich die Gesamtabbaugrade. Für den Anwendungsfall Erhöhung der Gasproduktion und Verringerung der zu entsorgenden Schlammmenge enthält das Merkblatt DWA-M 302 (DWA 2015b) eine Anleitung zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Weitere Gründe für eine Anwendung einer KS-Desintegration können die Vermeidung bzw. Reduzierung von Schaumproblemen, verbesserte Absetzbarkeit von Schlämmen, Verbesserung des Entwässerungsverhaltens und das Freisetzen von Nährstoffen für deren Rückgewinnung sein (DWA 2015b).

Desintegrationsverfahren haben auch nachteilige Auswirkungen auf die Abwasserreinigung und Schlammbehandlung. Abgesehen vom gesteigerten Energiebedarf ist die Erhöhung der Rückbelastung zu nennen. Durch die Erhöhung des Abbaugrades wird auch die Konzentration von Ammonium in der flüssigen Phase des Faulschlammes erhöht. Dies führt zu einer erhöhten Stickstoffrückbelastung in der

Abwasserreinigung, weshalb auch bei diesen Überlegungen die Nährstoffverhältnisse für die Denitrifikation in der Belebung überprüft werden müssen und ggf. eine Prozesswasserbehandlung in Betracht zu ziehen ist. Des Weiteren wurde bei den Versuchen mit der Thermodruckhydrolyse eine signifikante Rücklösung von $\text{PO}_4\text{-P}$ beobachtet (Görlich 2016).

Für die Anwendung der Checkliste benötigt man folgende Eingangsdaten:

- Faulzeit
- Spezifische Faulgasproduktion
- Schlammalter in der Belebung
- Abbaubgrad der organischen Feststoffe bei der Faulung

Für die Berechnung der Eingangsdaten wird auf den Datenkatalog Anhang 8.1.9 bis 8.1.11 verwiesen.

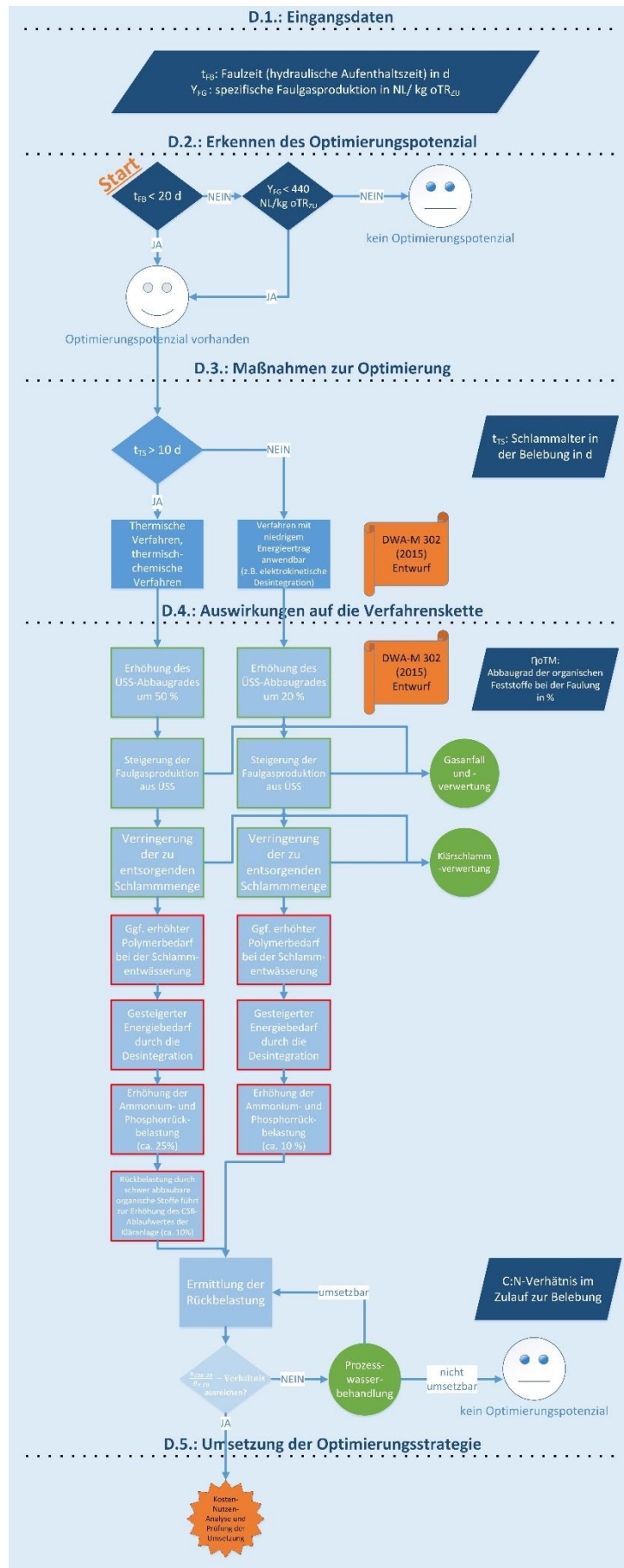


Abbildung 5.5: Checkliste D – Desintegration von Überschussschlamm

5.4 Verbesserung der Überschussschlammeindickung

Ziel der Checkliste (Abbildung 5.7) ist es aufzuzeigen, ob und mit welchen Verfahren eine Erhöhung der Eindickung des Überschussschlammes erreicht werden kann. Durch eine Erhöhung des TR-Gehalts im ÜSS kann die hydraulische Aufenthaltszeit im Faulbehälter (= Faulzeit) erhöht werden. Dies wirkt sich positiv auf die Faulgasproduktion aus, da sich bei längeren Aufenthaltszeiten der Abbaugrad erhöht. Außerdem ist es somit möglich freie Faulraumkapazitäten für die Mitbehandlung von Co-Substraten oder Fremdschlämmen zu generieren sowie hydraulisch überbelastete Faulbehälter zu entlasten.

Beim Neubau von Faulbehältern kann durch eine effektive Eindickung Faulraumvolumen eingespart werden, wodurch die Schlammentwässerung für einen geringeren hydraulischen Schlammumsatz dimensioniert werden kann. Zusätzlich wird der Strom- und Wärmebedarf reduziert. Bei der ÜSS-Eindickung ist auch eine exponentielle Erhöhung der Viskosität in Abhängigkeit des Feststoffgehaltes zu beachten. Die veränderten rheologischen Schlammeneigenschaften sind bei der hydraulischen Berechnung von Rohrleitungen, Pumpen und der Durchmischung zu berücksichtigen (DWA 2014).

Wird bei der Belebungsstufe eine biologische Phosphor-Elimination durchgeführt, ist bei der statischen Eindickung eine mögliche Rücklösung von Phosphor zu beachten. Oft wird die Klärschlammeindickung durch eine Konditionierung unterstützt. Dabei ist zu beachten, dass bei einer hohen Dosierung von synthetischen, polymeren Flockungsmitteln die Faulgasproduktion im Faulbehälter vermindert werden kann (DWA 2014). Es wird hauptsächlich der Überschussschlamm eingedickt, wobei in Deutschland unterschiedliche Verfahren der Eindickung angewandt werden (siehe Abbildung 5.6). Weitere Grundlagen zur Eindickung von Klärschlamm können dem Merkblatt DWA-M 381 (DWA 2007) entnommen werden.

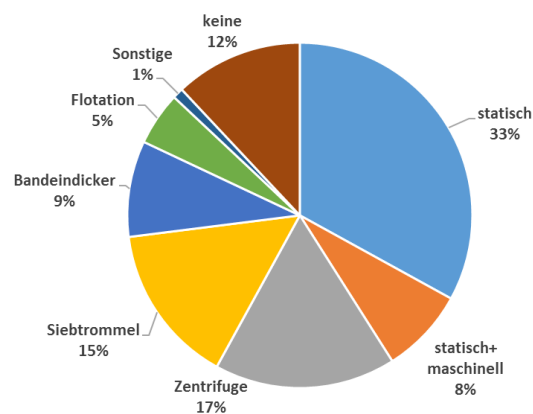


Abbildung 5.6: Voreindickung des Überschussschlammes, bezogen auf Einwohnerwerte (EW) Datenbasis: 97 Mio. (DWA 2007)

Für die Anwendung der Checkliste werden Informationen zum bei der Voreindickung aktuell erreichten Trockenrückstand benötigt. Zur Überprüfung des Trockenrückstands bei der Voreindickung ist der Jahresmittelwert heranzuziehen.

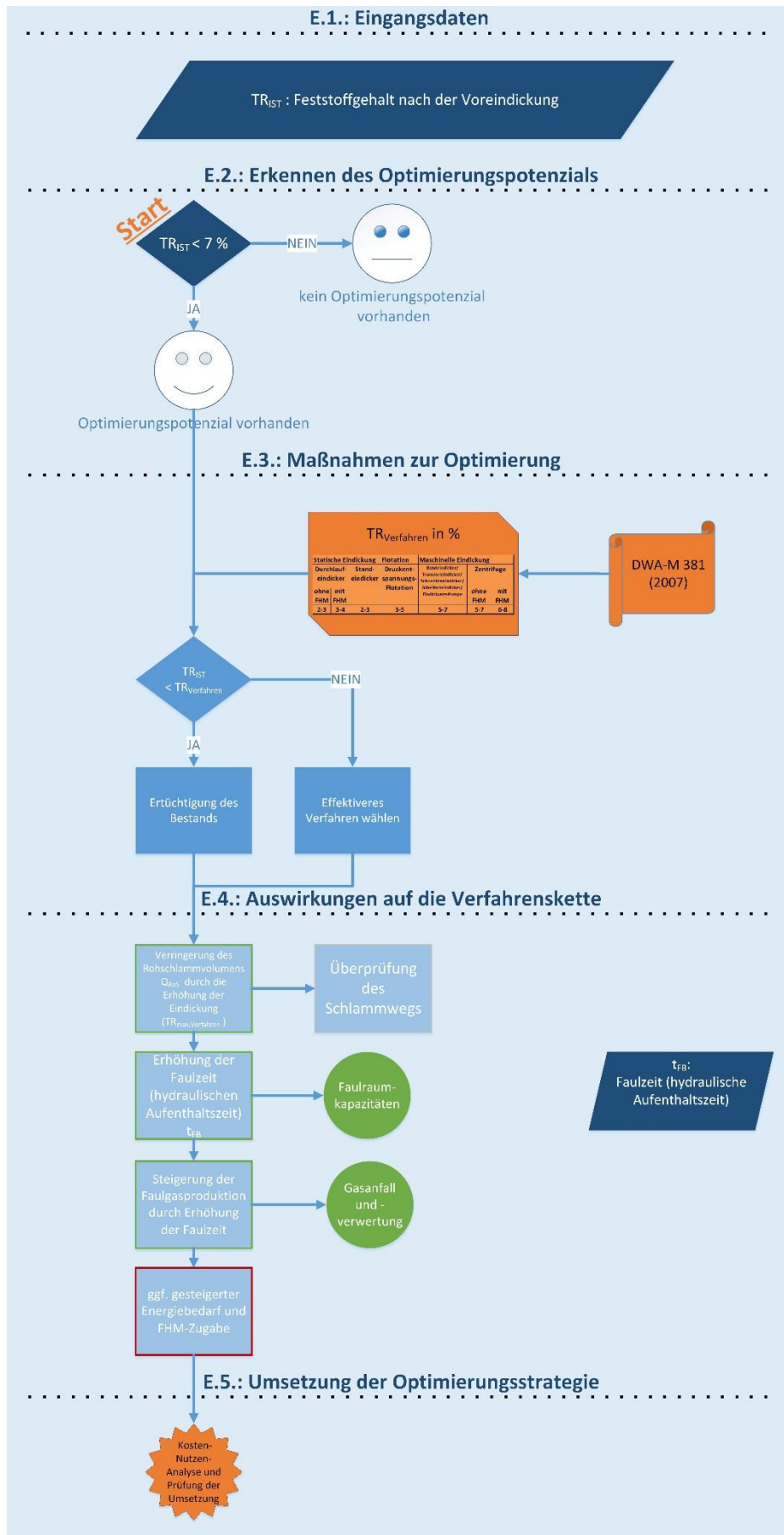


Abbildung 5.7: Checkliste E – Eindickung von Überschussschlamm

5.5 Faulraumkapazität

Ziel der Checkliste (Abbildung 5.8) ist es zu bestimmen, ob freie Faulraumkapazitäten vorhanden sind. D.h. es gilt zu beurteilen, in welchem Maße die Faulbehälter zusätzliche Substrate aufnehmen können. Die Ausnutzung von freien Faulraumkapazitäten durch die Mitbehandlung von Fremdschlämmen oder Co-Substraten führt in der Regel in Abhängigkeit von der zugegebenen Substratmenge zu einer signifikanten Steigerung der Faulgasproduktion.

Zur Beurteilung von freien Faulraumkapazitäten ist die Faulzeit die entscheidende Kenngröße. Bei herkömmlichen Faulungsanlagen ist davon auszugehen, dass die Faulzeit (Aufenthaltszeit der Feststoffe bzw. des Schlamms) der hydraulischen Aufenthaltszeit entspricht. Für einstufige Faulungen kann ab einer Faulzeit von ca. 25 Tagen von freien Kapazitäten ausgegangen werden. Da sich bei mehrstufigen Faulungen ein höherer Gesamtabbaugrad bei gleicher Gesamtfaulzeit einstellt, ist bei diesen bei einer geringeren Faulzeit ab ca. 20 Tage von freien Kapazitäten auszugehen. Generell gilt, je höher die berechnete Faulzeit, desto größer ist das Potenzial Fremdschlämme oder Co-Substrate mitzubehandeln.

Zur Beurteilung, ob Substrate zugegeben werden können, muss der abbaubare organische Anteil der Substrate bekannt sein. In Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) werden Grenzwerte für die organische Raumbelastung und die organische Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe empfohlen. Da die abbaubaren Stoffe auch in flüssiger Form vorliegen können, ist zur Beurteilung die CSB-Schlammbelastung (im Vergleich zur Schlammbelastung durch organische Trockenmasse) bei Co-Substraten der sicherere Parameter. Außerdem sind deren Inhaltsstoffe im Detail zu überprüfen, da diese Störstoffe enthalten können oder ggf. die Faulprozesse hemmen bzw. negativ beeinflussen. An dieser Stelle ist daher auf das Merkblatt DWA-M 380 (DWA 2009) verwiesen, in welchem Anforderungen an die Co-Substrate und Planungshinweise definiert sind. Bei Fremdschlämmen, also Roh- oder voreingedickten Schlämmen anderer Kläranlagen, sind bereits die Aussagen über organische Trockenmasse (bzw. Glühverlust und Trockenrückstand) aussagekräftig. Das Verhältnis von leicht abbaubaren organischen Stoffen zur organischen Trockenmasse kann nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) mit 0,57 abgeschätzt werden.

Durch die Mitbehandlung von zusätzlichen Substraten sind als Auswirkungen eine Steigerung der zu entsorgenden Schlammmenge und eine Erhöhung der Rückbelastung zu berücksichtigen. Auch in diesem Fall sind daher die Nährstoffverhältnisse in der Belebung zu überprüfen und ggf. eine Prozesswasserbehandlung in Betracht zu ziehen.

Für die Anwendung der Checkliste benötigt man folgende Eingangsdaten:

- Faulzeit
- Max. Input zur Ausnutzung der freien Kapazitäten
- Organische Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe

Für die Berechnung der Eingangsdaten wird auf den Datenkatalog Anhang 8.1.9, 8.1.12 und 8.1.13 verwiesen.

5.6 Gasanfall und -verwertung

Mit Hilfe der Checkliste (Abbildung 5.9) kann die Faulgasproduktion einer bestehenden Faulungsanlage abgeschätzt werden. Sie ermöglicht somit den derzeitigen Faulgasanfall zu überprüfen und einzuordnen.

Ebenso kann der zukünftige Faulgasanfall über den zu erwarteten Trockenrückstand, den Glühverlust sowie die prognostizierte Primär- und Überschussschlammmenge bestimmt werden. Die Gasproduktion von Co-Substraten ist substratabhängig zu bestimmen. Für einzelne Substrate sind die Gaserträge bekannt und können der Literatur, z.B. (KTBL 2007; DWA 2009), entnommen werden.

Eine Steigerung der Gasproduktion hat direkte Auswirkungen auf die erforderliche Größe des Faulgasspeichers und die nachfolgenden Prozessschritte der Faulgasverwertung. Die Checkliste dient somit als logische Verknüpfung zwischen den Checklisten der Schlammbehandlung und der Faulgasverwertung.

Für die Anwendung der Checkliste werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- TR-Gehalte der Schlämme
- Glühverluste (=Organikanteil) der getrockneten Schlämme
- Schlammengen
- Max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage
- Elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage
- Methangehalt des Faulgases
- Energiebedarf

Für die Berechnung der Faulgasproduktion wird auf den Datenkatalog Anhang 8.1.14 verwiesen. Für die Checkliste können außerdem die Berechnungshinweise von Anhang 8.1.15 und 8.1.16 verwendet werden.

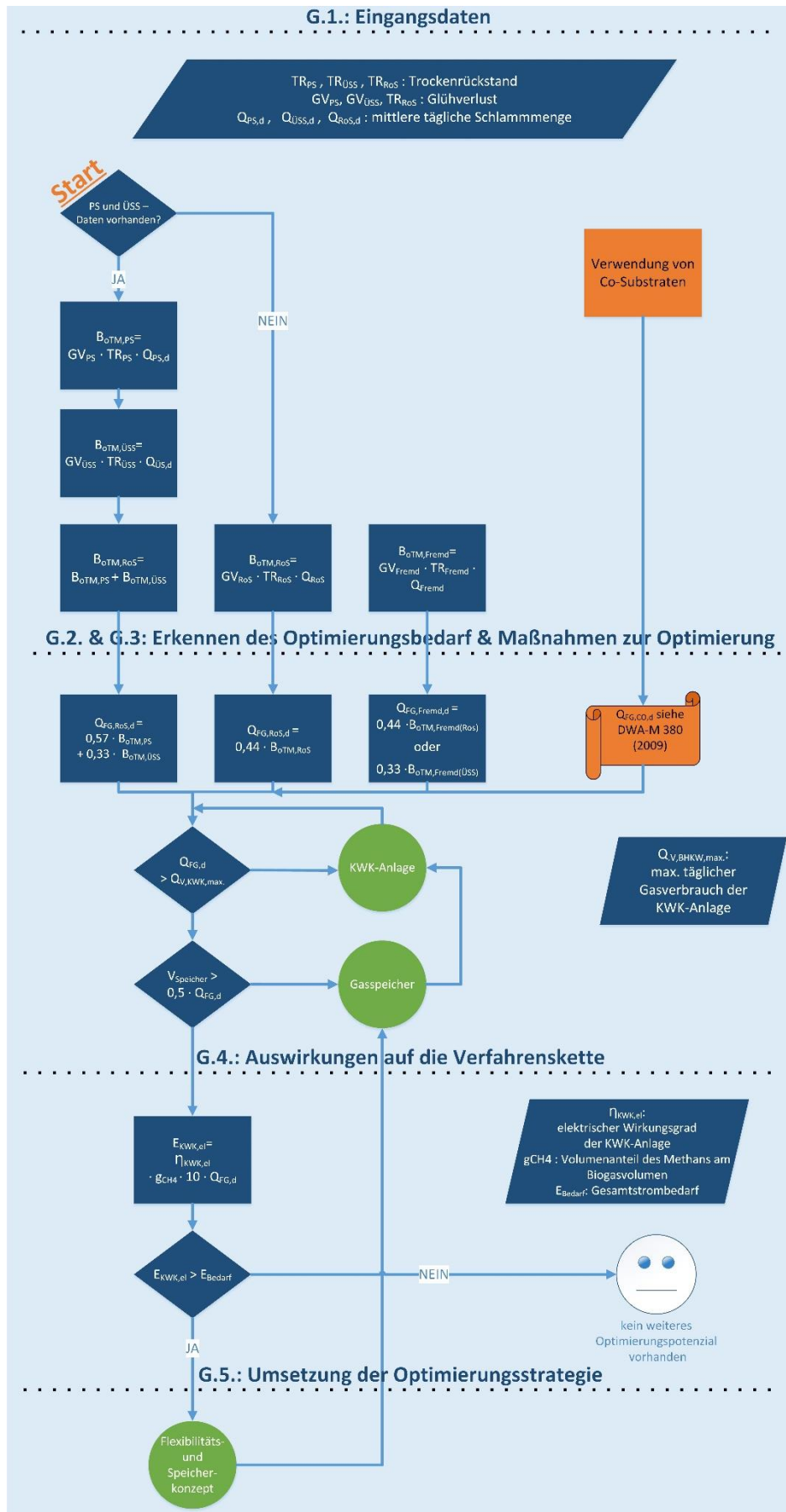


Abbildung 5.9: Checkliste G – Gasanfall und -verwertung

5.7 Durchmischung der Faulbehälter

Die Checkliste (Abbildung 5.10) beschreibt das Vorgehen bei einer Überprüfung der Faulbehälterdurchmischung. Es liegen keine verbindlichen Regeln zur Bemessung und Gestaltung von Einrichtungen zur Faulbehälterdurchmischung vor.

Hinweise hierzu können dem Merkblatt DWA-M 368 „Biologische Stabilisierung von Klärschlamm“ (DWA 2014), dem DWA-Themenband T1/2015 „Schlammfäulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe“ (DWA 2015a) sowie der DIN EN 12255-8 „Kläranlagen – Teil 8: Schlammbehandlung und -lagerung“ (DIN EN 12255-8:2001) entnommen werden. Nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) kann die Aufgabe der Durchmischung wie folgt zusammengefasst werden (*Zitat*):

- schnelle und gleichmäßige Verteilung des Rohschlammes im Faulbehälter
- Vermeidung von Temperatur- und Konzentrationsgradienten
- Beschleunigung von Stoff- und Wärmetransportvorgängen
- Vermeidung von Totzonen und Ablagerungen
- Minimierung von Kurzschlussströmungen
- Vermeidung von Schwimmdecken
- Förderung der Entgasung

In der Praxis finden zur Durchmischung folgende Ansätze Anwendung:

- außenliegende Umwälzpumpen
- Faulschlammischer (Schraubenschaufler)
- Faulgaseinpressung
- Rührwerke

Ferner werden diese Ansätze z. T. kombiniert.

Häufig ist ein geringer Organikabbau bzw. ein unbefriedigender Gasanfall ein Indiz für eine unzureichende Durchmischung des Faulbehälters. In Abhängigkeit von der technischen Ausrüstung sind Zielwerte genannt, anhand derer bewertet werden kann, ob auf der untersuchten Anlage ein Optimierungspotential vorliegt.

Hierbei ist zu beachten, dass die Zielwerte von dem Feststoffgehalt des Schlammes abhängen. Bedingt durch eine höhere Viskosität des eingedickten Klärschlammes liegt der Soll-Wert im oberen Bereich der in der Checkliste genannten Bandbreite. Je höher der Feststoffgehalt, desto höher sollte auch die Leistungsdichte ausfallen.

Bei Kombination verschiedener Ansätze sei auf eine Veröffentlichung von Roediger aus dem Jahre 1997 (Roediger 1997) verwiesen. Sind die dort angegebenen Zielwerte unterschritten, sollte die mögliche Optimierung der Durchmischung fachtechnisch geprüft werden. Dabei ist dann auch im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu untersuchen, inwieweit diese Optimierung auch wirtschaftlich darstellbar ist.

Eine optimierte Durchmischung des Faulbehälters fördert einen erhöhten Organikabbau und erhöht in der Folge auch den Faulgasanfall. Die zu entsorgenden Klärschlammengen sinken entsprechend.

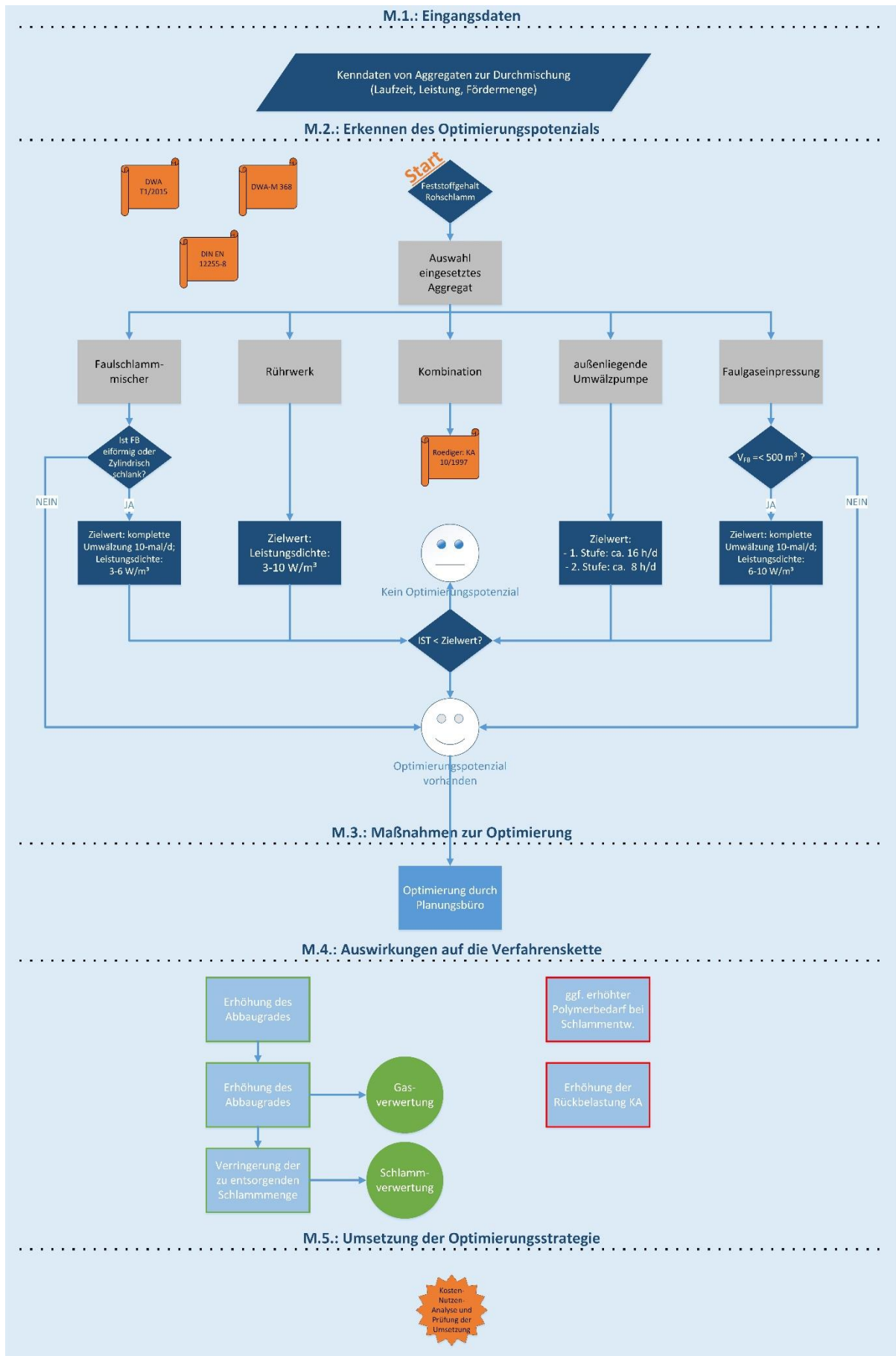


Abbildung 5.10: Checkliste M – Durchmischung des Faulbehälters

5.8 Gasspeicher

Die Checkliste (Abbildung 5.11) enthält Empfehlungen für die Gasspeicherdimensionierung. Es liegen keine verbindlichen Regeln zur Dimensionierung von Einrichtungen zur Faulgasspeicherung vor. Im Kontext der Flexibilisierung des Anlagenbetriebs für einen energetisch optimierten Betrieb von Kläranlagen gewinnt die Größe des Faulgasspeichers künftig an Bedeutung (Schäfer et al. 2017b). Sollten Ansätze zur Flexibilisierung des Anlagenbetriebs in Betracht kommen, sind entsprechende Konzepte zu entwickeln bzw. Planungen zu konkretisieren, um eine hierauf abgestimmte Auslegung des Faulgasspeichers umzusetzen.

Erfahrungswerte⁸ zeigen, dass das Speichervolumen des Gasbehälters mindestens 50 % der täglich produzierten Faulgasmenge betragen sollte. Sollte das vorhandene Speichervolumen kleiner als dieser Orientierungswert sein, so kann eine Erweiterung des Speichervolumens bzw. ein Ersatzneubau sinnvoll sein.

In diesem Kontext ist zu prüfen, inwieweit eine bedarfsorientierte Beschickung des Faulbehälters umgesetzt werden kann, um den Faulgasanfall zu steuern. Auch die Zugabe von Co-Substraten kann hinsichtlich des Gasanfalls als Stellgröße genutzt werden (vgl. Engelhart et al. 2018).

Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung sollte jedoch zwingend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (dynamische Kostenvergleichsrechnung – KVR) erfolgen, um Aspekte wie z. B. die Restnutzungsdauer des bestehenden Speichers monetär zu erfassen. Folglich ist der anlagenspezifische Optimierungsbedarf erst nach einer solch ganzheitlichen Betrachtung feststellbar.

Eine Optimierung des Faulgasspeichers hat direkten Einfluss auf die Gasverwertung. Wenn ein Repowering vorgesehen ist, ist die Auslegung des Faulgasspeichers hierauf abzustimmen. Auf Kläranlagen kommen die folgenden drei Gasbehältertypen zum Einsatz:

- Niederdruckgasbehälter mit Gewichtsbelastung
- Drucklose Gasbehälter
- Gasbehälter mit Druckluftpolster

Stehle (2016) beschreibt die wesentlichen Unterschiede wie folgt:

Tabelle 4: Gasbehältertypen und deren Eigenschaften

Niederdruckgasbehälter	Druckloser Gasbehälter	GB mit Druckluftpolster
Gas wird durch Belastungseinrichtung unter Druck gesetzt	Gas wird durch Druckerhöhungsanlage abgesaugt	Gas wird durch Luftpolster unter Druck gehalten
Gesamte Oberfläche der Membran und Luftraum oberhalb der Membran einsehbar	Luftraumseite der Membran ist einsehbar	Innenmembran ist nicht einsehbar

Im Rahmen eines Abwägungsprozesses sind Vor- und Nachteile der Techniken einander gegenüberzustellen.

⁸ Erfahrungswerte der Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH

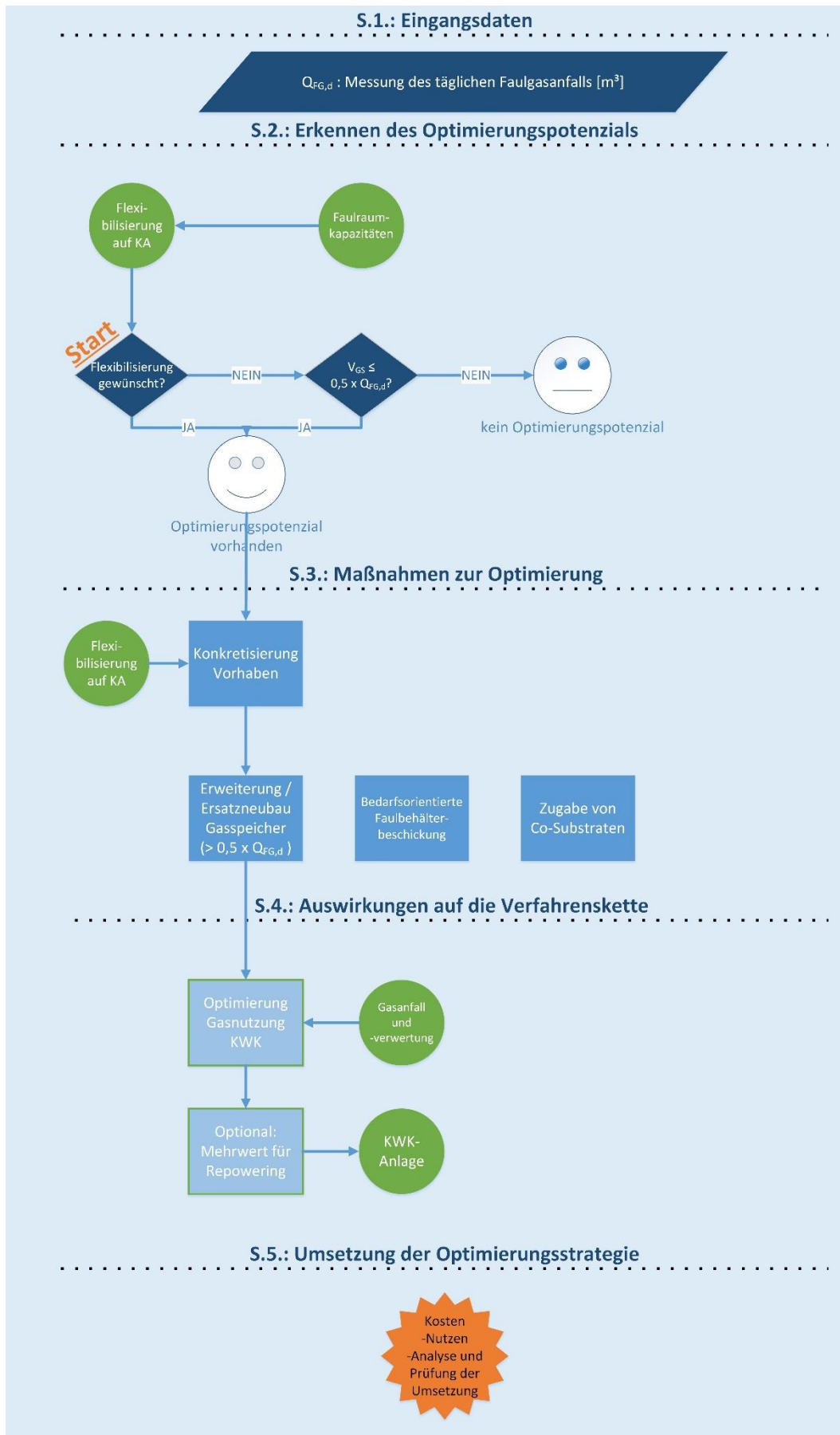


Abbildung 5.11: Checkliste S - Gasspeicher

5.9 KWK-Anlage

Blockheizkraftwerke (BHKW) und Mikrogasturbinen (MGT) sind die üblichen Stromerzeuger bei Faulungsanlagen. Wird bei der Verbrennung des Faulgases Strom und nutzbare Wärme produziert, spricht man von einer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

Bei diesen Aggregaten unterscheidet man zwischen wärme-, strom- und gasgeführten Betriebsweisen. Stromgeführte Aggregate werden nach dem aktuellen Strombedarf der Anlage betrieben. Wird dabei zu viel Wärme produziert, die nicht auf der Anlage genutzt bzw. gespeichert werden kann, muss der Wärmeüberschuss an die Umgebung abgegeben werden. Der wärmegeführte Betrieb ist an den Wärmebedarf der Kläranlage angepasst. Sollte die Stromproduktion dabei den Bedarf überschreiten, wird der Überschuss in das Stromnetz eingespeist. Eine kombinierte wärme- und stromgeführte Betriebsweise ist ebenfalls möglich. Da der Faulgasanfall nicht konstant und vor allem nicht unbegrenzt ist, sind diese Betriebsweisen bei Faulungsanlagen immer vom Gasspeichervolumen abhängig. Ein größerer Gasspeicher ermöglicht einen höheren Grad der Flexibilität hinsichtlich der Betriebsweise. Bei der gasgeführten Betriebsweise hingegen werden Aggregate in Abhängigkeit vom Füllstand des Gasspeichers zu- oder abgeschaltet. Auch eine Kombination der genannten Betriebsweisen, z.B. gas/wärmegeführt oder gas/stromgeführt findet in der Praxis Anwendung. Dabei ist jedoch immer der Wärmebedarf für die Beheizung des Faulbehälters zu beachten. (Schmitt et al. 2017a)

Tabelle 5 listet die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade von KWK-Anlagen im Vollastbetrieb auf. BHKWs verfügen bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 bis 45% üblicherweise über einen Gesamtwirkungsgrad von über 85%. Der Wirkungsgrad von BHKWs verschlechtert sich deutlich, wenn das BHKW im Teillastbereich betrieben wird. Anders als bei BHKWs sind mit MGT auch im Teillastbereich ab 60% gute Wirkungsgrade zu erzielen (MUKW BW 2015). Sie besitzen jedoch verglichen mit BHKWs einen niedrigeren elektrischen Wirkungsgrad von 25 bis 33% im Vollastbetrieb.

Tabelle 5: Auflistung elektrischen und thermischen Wirkungsgrade von KWK-Anlagen (DWA 2015d; ASUE 2014)

Größe (kW _{el})	Elektrischer Wirkungsgrad [%]			Thermischer Wirkungsgrad [%]		
	Zündstrahl (Dieselmotor)	Gas-Otto- Motor	Mikro-Gas- turbine*	Zündstrahl (Dieselmotor)	Gas-Otto- Motor	Mikro-Gas- turbine
1-30	-	30-31	26 (24)	-	54-70	59
Bis 50	40	32-35	26 (24)	53	47-55	-
Bis 100	40	35-39	29 (27)	50	43-55	56
Bis 250	40-43	38-40	33 (31)	39-40	40-54	52
>250	43-45	40-43	-	36-43	40-52	-

*Werte in Klammer berücksichtigen die Verluste für die erforderliche Faulgasverdichtung

Die KWK-Anlagen müssen die Immissionsanforderungen nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (Bundesregierung 2017b) erfüllen. Bei Verbrennungsmotoren sind nach Bundes-Immissionsschutzgesetz die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft und TA-Lärm (BMU 2002) einzuhalten. Für Verbrennungsmotoranlagen sind in der TA-Luft Emissionsgrenzwerte für Kohlenstoffmonoxid, Stickstoffoxide,

Schwefeloxide und Formaldehyd angegeben. Beim Einsatz von Biogas oder Faulgas sind die Möglichkeiten die Emissionen weiter zu vermindern, durch Maßnahmen nach dem Stand der Technik (z.B. Gasreinigung), auszuschöpfen.

Tabelle 6: Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für Verbrennungsmotoranlagen (BMU 2002)

Schadstoff	Einheit	Gas-Otto-Motoren		Zündstrahlmotoren	
		<3 MW	≥ 3MW	< 3 MW	≥ 3MW
Kohlenstoffmonoxid	g/m ³	1,0	0,65	2,0	0,65
Stickstoffoxide	g/m ³	0,5	0,5	1,0	0,5
Schwefeloxide	g/m ³	0,35	0,35	0,35	0,35
Gesamtstaub	mg/m ³	20	20	20	20
Organische Stoffe (Formaldehyd)	mg/m ³	60	60	60	60

Im Zuge einer Optimierung ist eine Änderung der Betriebsweise der KWK-Anlage und eine Vergrößerung des Faulgasspeichers zu überprüfen. Ist ein Repowering bzw. eine Erneuerung der KWK-Anlage angebracht, sollten abgesehen vom Strom- und Wärmebedarf der Kläranlage auch Überlegungen bezüglich einer zukünftigen Flexibilisierung der Stromerzeugung berücksichtigt werden. Generell sollte der Wärmebedarf der Kläranlage durch die Erzeugung von Wärmeenergie aus Faulgas gedeckt werden können.

Bei Anwendung der Checkliste muss der elektrische Wirkungsgrad der KWK-Anlage berechnet werden. Hinweise zur Berechnung sind dem Datenkatalog Anhang 8.1.17 zu entnehmen.

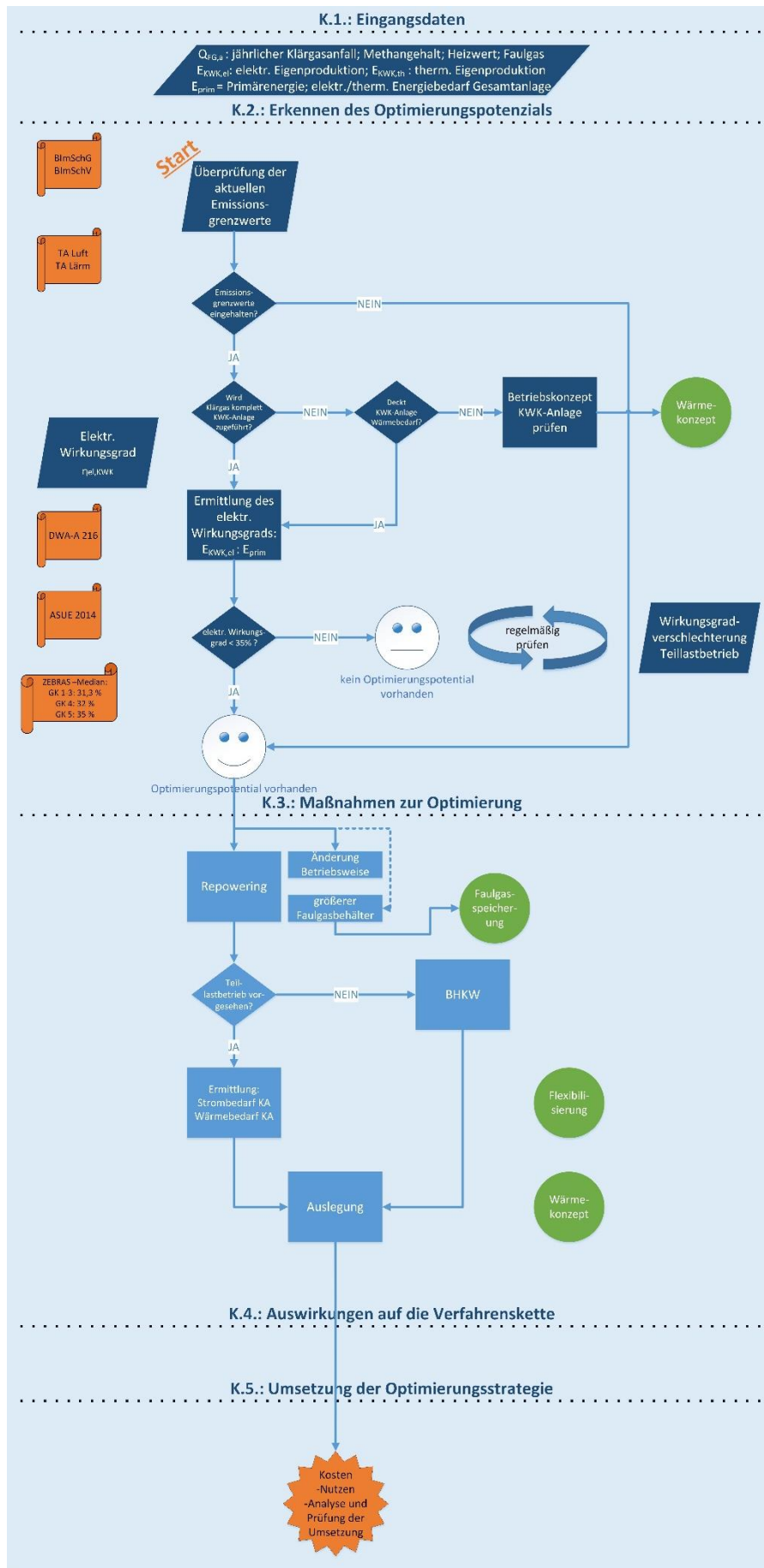


Abbildung 5.12: Checkliste K – KWK-Anlage

5.10 Flexibilitäts- und Speicherkonzept

Regenerative Energiequellen spielen bereits heute eine bedeutende Rolle in der Energieerzeugung. Zukünftig wird diese Bedeutung noch weiter wachsen, wobei im Besonderen Wind- und Solaranlagen wetterabhängig sind, weshalb die erzeugte Energiemenge stark fluktuieren kann. Um diese Fluktuationen zu kompensieren und das Stromnetz zu stabilisieren, werden nachfrageorientierte Energieerzeuger benötigt. In diesem Zusammenhang können regelbare Kraft-Wärme-Kopplungssysteme (KWK) ein entscheidendes Instrument darstellen. Hierbei konnte vor allem ein großes Potenzial zur flexiblen Stromproduktion und Bereitstellung von Regelenergie bei biogasnutzenden Systemen wie Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung identifiziert werden. Ein Vorteil hierbei ist die Fähigkeit sehr flexibel Strom zu produzieren, da das verwendete Biogas im Bedarfsfall auch gespeichert werden kann. Während große Energieverbraucher gezielt Energie aus dem Netz `abnehmen` können, müssen kleinere Anlagen zur Teilnahme an Strommärkten oft zu sogenannten virtuellen Kraftwerken gebündelt werden, da die erzeugte Strommenge einer Anlage sonst nicht ausreichend für eine Teilnahme am Strommarkt ist. Virtuelle Kraftwerke kombinieren kleine dezentrale Energieerzeuger zu einer virtuellen Einheit, welche gegenüber dem Strommarkt als ein Kraftwerk auftreten. Eine detaillierte Aufbereitung des Themas Flexibilitäts- und Speicherkonzept kann dem arrivee-Schlussbericht (Schmitt et al. 2017a) entnommen werden.

In diesem Kontext kann Flexibilität definiert werden, als die Fähigkeit die Stromproduktion einerseits nach Zeitplänen und andererseits auch sehr kurzfristig, für abgerufene Systemdienstleistungen, zu verschieben. Hierbei wird vor allem die Steigerung der Flexibilität durch zusätzliche KWK-Systeme, Gasspeicherkonzepte und ein fortschrittliches Substratdosierungsmanagement diskutiert.

Kläranlagen mit Faulung können somit sowohl positive Regelenergie bereitstellen (durch Produktion von Biogas und Verstromung und darauffolgende Einspeisung ins Netz, aber auch durch Abschalten von Verbrauchern), sind jedoch auch in der Lage, für negative Regelenergie zu sorgen. Die konkreten Möglichkeiten sowie die Überprüfung, inwieweit eine Kläranlage zu dieser Flexibilität beitragen kann, ist in der Checkliste FS `Flexibilitäts- und Speicherkonzepte` (Abbildung 5.13) dargestellt.

Im Rahmen der Überprüfung werden zunächst einmal im Rahmen eines Energiechecks bzw. einer Energieanalyse (bspw. nach DWA-A216 (2015)) die größten Energieverbraucher auf der Kläranlage und insbesondere im Bereich der biologischen Stufe identifiziert. Die Checkliste liefert dann eine Beschreibung, inwieweit bei den großen Energiekonsumenten Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlammführung Flexibilität bereitgestellt werden kann. So ist es bspw. bei der Belüftung als in der Regel größtem Verbraucher bei vielen Anlagen möglich, diese für gewisse Zeiträume abzustellen, um damit positive Regelenergie bereitzustellen. Die Checkliste weist darauf hin, dass hierbei insbesondere auf die Ablaufwerte von Ammonium sowie Phosphor (Rücklösung während anaerober Milieubedingungen) zu achten ist. Auf der anderen Seite kann über die Belüftung auch negative Regelenergie bereitgestellt werden, indem die Belüftungsphase verlängert bzw. intensiviert wird und damit gezielt die Konzentrationen für BSB, CSB und $\text{NH}_4\text{-N}$ reduziert werden. Sofern die Kläranlage über eine Faulung verfügt, kann diese ebenfalls zur Bereitstellung von Regelenergie über die Verfahrensschritte Biogaserzeugung und Biogaverwertung genutzt werden. Die Checkliste basiert dabei in einem ersten Schritt auf der Ermittlung und Bewertung der erzeugten (spezifischen) Biogasmenge. In einem zweiten Schritt wird abgefragt, ob im Bereich der Faulung (Volumen des Faulbehälters) bzw. des

BHKW noch Potenzial besteht. Besitzt der Faulbehälter freie Faulraumkapazitäten, kann die Biogasmenge bspw. über Zugabe von Co-Substraten erhöht werden. Das Faulgas kann dann je nach Bedarf auf der Anlage zwischengespeichert, in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist oder aber auf der Kläranlage selbst verstromt werden. Die Checkliste zeigt auch die Möglichkeit auf, inwieweit der erzeugte Strom entweder in einer Batterie gespeichert werden kann oder aber in eine speicherbare Form – bspw. durch Power-2-Gas oder Power-2-Heat-Konzepte – überführt werden kann.

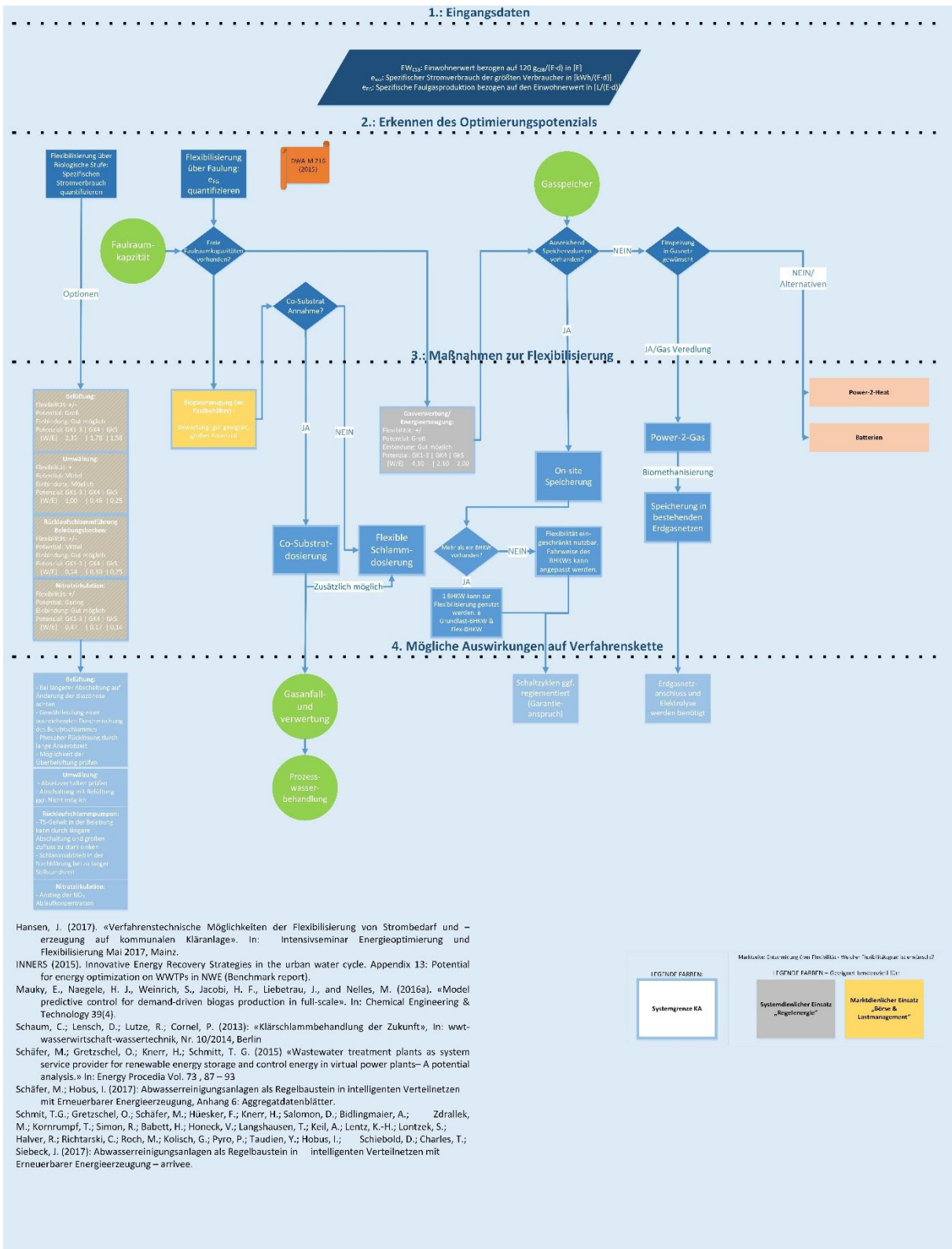


Abbildung 5.13: Checkliste FS – Flexibilität und Speicherkonzept

5.11 Schlammverwertung

Obwohl das bodenbezogene Verwertungsverbot sich – entgegen früher geäußerten Regelungsabsichten - mittlerweile nur noch auf Kläranlagen mit einer Ausbaugröße > 50.000 EW bezieht, wird die bodenbezogene Verwertung durch das Inkrafttreten der novellierten Klärschlammverordnung (Abf-KlärV) (Bundesregierung 2017c), der Düngemittelverordnung (DüMV) (Bundesregierung 2012) sowie der Düngeverordnung (DüV) (Bundesregierung 2017a) künftig mit vielen zusätzlichen Auflagen verbunden sein. Neben den bereits seit 01.01.2015 geltenden niedrigeren Schadstoffgrenzwerten der Düngemittelverordnung (DüMV) (Bundesregierung 2012) betrifft dies im Wesentlichen die Verlängerung der Sperrfristen für die Schlammausbringung und die Einschränkung der Aufbringungsmengen. Weiterhin ist mittlerweile eine starke Flächennutzungskonkurrenz durch die zumindest derzeit wirtschaftlich attraktivere Verwertung von Gülle und Gärresten auf den Ackerflächen entstanden.

Die aufgezeigten Veränderungen führen zu Kostensteigerungen bei der Klärschlammentsorgung, denen im Wesentlichen nur durch eine Reduzierung der zu entsorgenden Schlammengen begegnet werden kann.

Diesen Aspekt greift die Checkliste V „Schlammverwertung“ auf. Durch die Umsetzung einer Schlammfäulung wird durch einen im Vergleich mit der Simultanstabilisierung erhöhten Abbau organischer Inhaltsstoffe bereits eine geringere Klärschlammmenge entsorgt. Durch einen optimierten Betrieb der Faulungsanlage gilt es einen erhöhten Abbau sicherzustellen. An dieser Stelle sei beispielhaft auf die Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“ verwiesen.

Als Referenz dient eine mittlere einwohnerspezifische Faulschlammfracht nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) von rd. 40 g TM/(E·d). Sollte eine höhere Schlammfracht vorliegen, sollten Maßnahmen zur Optimierung der Faulung auf deren Umsetzbarkeit geprüft werden. Die Reduzierung des Wasseranteils des zu entsorgenden Faulschlammes kann durch eine technische Entwässerung erfolgen. Sollten in unmittelbarer Nähe Felder für eine bodenbezogene Verwertung des Klärschlammes zur Verfügung stehen, kann eine Nassaufbringung im Einzelfall günstiger sein. Grundsätzlich gilt jedoch, dass jeder Kubikmeter weniger (Wasser) zu entsprechend geringeren Entsorgungskosten führt.

Die Wirtschaftlichkeit einer technischen Entwässerung hängt wesentlich von der Durchsatzmenge ab. Je höher die zu entwässernde Menge, desto geringer fallen die spezifischen Kosten hierfür aus. Sollten weitere Kläranlagen in der Nähe liegen, kann auch eine gemeinsame Entwässerung sinnvoll sein. Dies ist im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zu prüfen.

Neben dem wesentlichen Vorteil einer reduzierten Klärschlammmenge ist zu beachten, dass bei zentralisierter Entwässerung durch Filtratwasser eine Mehrbelastung der KA zu erwarten ist. Als Alternativen zu einer Bewirtschaftung des Filtratwassers im Hauptstrom auf der annehmenden KA, kann das Filtratwasser wieder zu den Satellitenanlagen verbracht oder ggf. auch eine Behandlung im Nebenstrom erfolgen. Ferner ist zu beachten, dass nach Lesart der novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (Bundesregierung 2017c) bei einer gemeinsamen Klärschlammmentwässerung die Summe der Ausbaugrößen als Referenz hinsichtlich der Bagatellgrenze (100.000 EW bzw. 50.000 EW) für die bodenbezogene Verwertung gilt. Dies gilt im Übrigen auch für bei Mitfäulung von Fremdschlämmen. Zur weitergehenden Reduzierung des Wasseranteils kann zusätzlich eine Trocknung erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass bei einer bodenbezogenen Verwertung – bedingt durch Staubentwicklung – Grenzen hinsichtlich des Feststoffgehalts bestehen.

Sollte die Ausbaugröße der Kläranlage > 50.000 EW sein, so sind grundsätzlich Entsorgungsalternativen zu prüfen, da ab dem Jahr 2032 für die Schlämme aus Anlagen dieser Ausbaugröße eine bodenbezogene Verwertung nicht mehr möglich ist. Dies gilt auch unmittelbar, wenn Grenzwerte nach Dünge-

oder Abfallrecht überschritten werden. In diesen Fällen sind Alternativen der thermischen Behandlung zu prüfen. Eine Prüfung von Alternativen kann auch dann angezeigt sein, wenn sich Engpässe bei zu düngender Flächen einstellen. Hintergründe hierfür wurden zuvor erläutert.

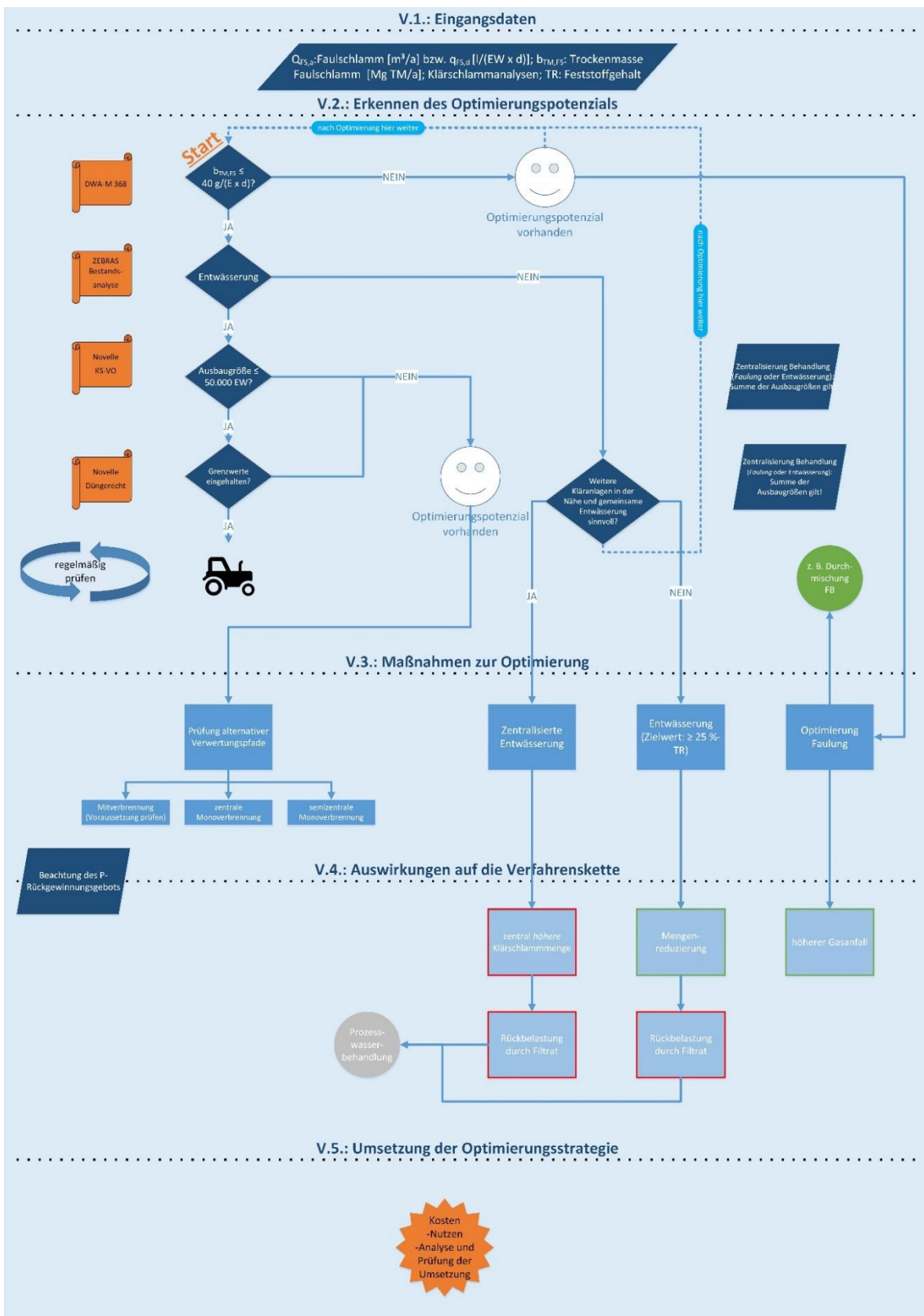


Abbildung 5.14: Checkliste V – Schlammverwertung

5.12 Wärmemanagement

Kläranlagen haben neben einem Bedarf an elektrischer Energie auch einen nicht unerheblichen Wärmebedarf. Große Wärmemengen werden bspw. für die Beheizung von Betriebsgebäuden oder aber für die Schlammaufheizung sowie die Temperierung von Faulbehältern benötigt. Daneben nimmt auch der Bedarf an Kühlleistung für Schaltanlagen, Serverräume und Betriebsgebäude zu. Kläranlagen sind jedoch nicht nur Wärmeverbraucher, sondern gleichzeitig auch Wärmeproduzenten. Bei Anlagen mit Faulung und anschließender Nutzung des Faulgases durch ein BHKW fällt Abwärme aus dem Verbrennungsprozess an. Auch die Abwärmenutzung von Motoren bietet Potenziale. Daneben kann die im Abwasser vorhandene Wärme genutzt werden.

Bei der Diskussion zum Energiebedarf von Kläranlagen werden die vielfältigen Möglichkeiten der Nutzung von Wärme oft vernachlässigt. Eine nachhaltige Energieproduktion und -nutzung bedingt neben einer Senkung des Verbrauchs die effiziente Verwendung der dabei entstehenden Wärme. Diese Wärme ist dabei einer möglichst sinnvollen Verwertung zuzuführen. Die Nutzungsmöglichkeiten reichen von der direkten Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken bis hin zur Umwandlung in andere Energieformen.

Die Checkliste W 'Wärmemanagement' (Abbildung 5.15) zeigt die Möglichkeiten zum Umgang mit Wärme hierbei auf. In einem ersten Schritt wird über einen Energiecheck (bspw. nach (DWA 2015d)) der Deckungsgrad für Wärme auf der Anlage ermittelt. Liegt dieser bei weniger als 100%, bestehen Handlungsoptionen. In einem nächsten Schritt werden dann die wesentlichen Erzeuger und Verbraucher für Wärme und Kälte im Rahmen einer detaillierten Bestandsaufnahme ermittelt und die aufgenommenen Daten übersichtlich – bspw. in einem Sankey-Diagramm oder Fließbild – dargestellt.

Entsprechend der Checkliste bieten sich nun drei generelle Optionen an, die im Rahmen der Checkliste ausführlich beschrieben werden:

- Möglichkeiten der Reduzierung des Wärmebedarfs: bspw. durch Absenken der Faulbehältertemperatur, aber auch durch Sanierungsmaßnahmen wie Wärmedämmung der Gebäudehüllen, Heizungssanierung; bis hin zur Reduzierung der Raumtemperatur in den Gebäuden
- Erhöhung des Wärmenutzungsgrades: bspw. durch kaskadierte Wärmenutzung oder aber durch Nutzung von Überschusswärme zur Faulbehälteraufheizung ('FB als Wärmespeicher')
- Darstellung weiterer Optionen (sofern andere Möglichkeiten ausgeschöpft sind) wie bspw. Nutzung von Überschusswärme zur Schlamm Trocknung oder aber zur Dampferzeugung

Abschließend erfolgt dann eine Überprüfung, ob nach Umsetzung der Maßnahmen die wärmetechnischen Zielsetzungen erfüllt sind.

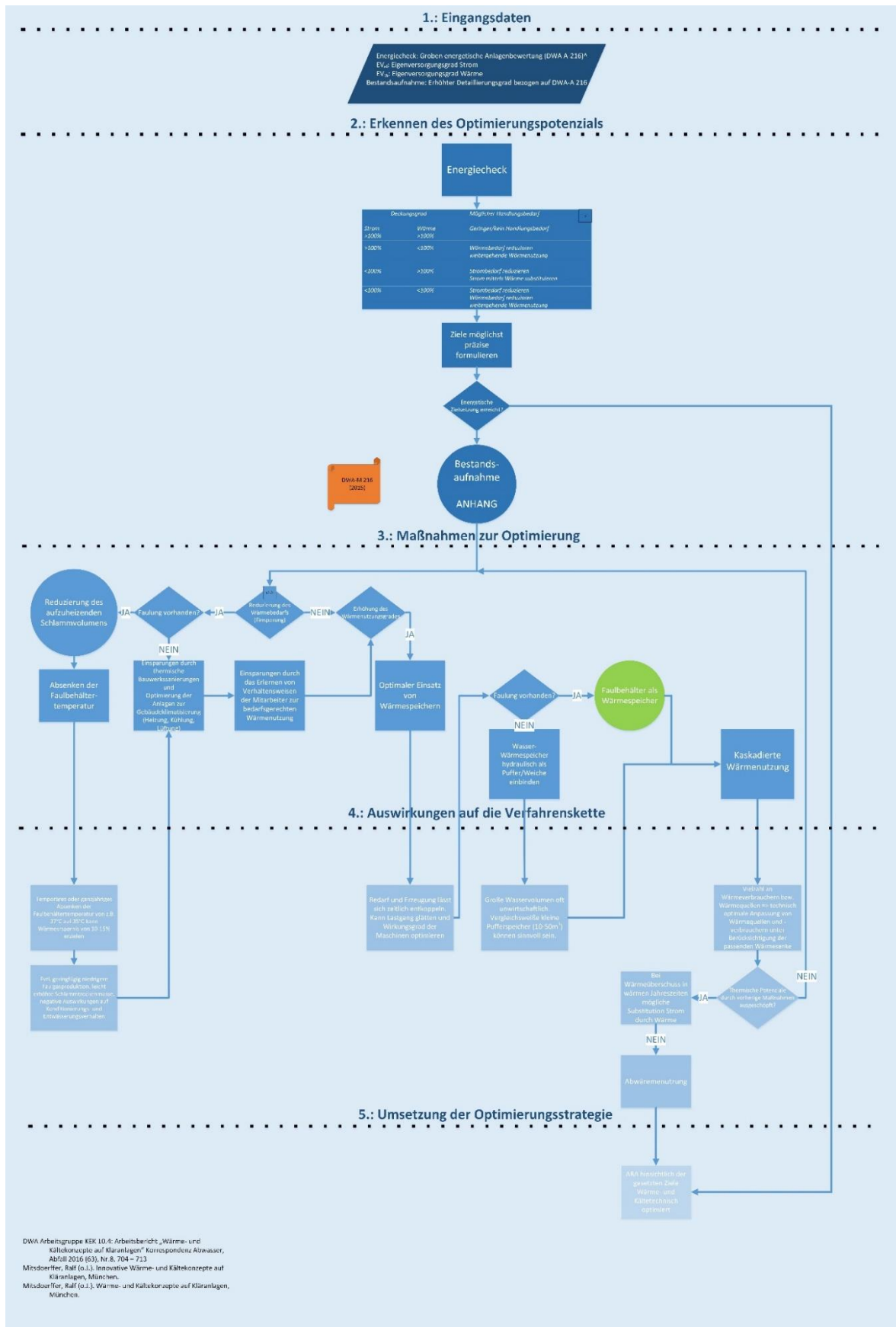


Abbildung 5.15: Checkliste W - Wärmemanagement

5.13 Faulbehälter als Wärmespeicher

Faulbehälter auf Kläranlagen können prinzipiell als Wärmespeicher genutzt werden. Der anaerobe Abbauprozess mit der Umwandlung der organischen Stoffe im Faulschlamm zu Biogas kann prinzipiell in einem vergleichsweise weiten Temperaturbereich um das (in der Regel wirtschaftliche) Optimum von ca. 37°C verlaufen. Eine leichte Erhöhung der Faulraumtemperatur (bspw. auf 40°C) kann dabei zu einer Erhöhung der erzeugten Biogasmenge führen, während eine Reduzierung der Temperatur (bspw. auf 35°C) zu einer Abnahme der Biogasmenge führt. Die Checkliste WS 'Faulbehälter als Wärmespeicher' zeigt die Überprüfung dieser Möglichkeit anhand eines strukturierten Handlungsschemas auf.

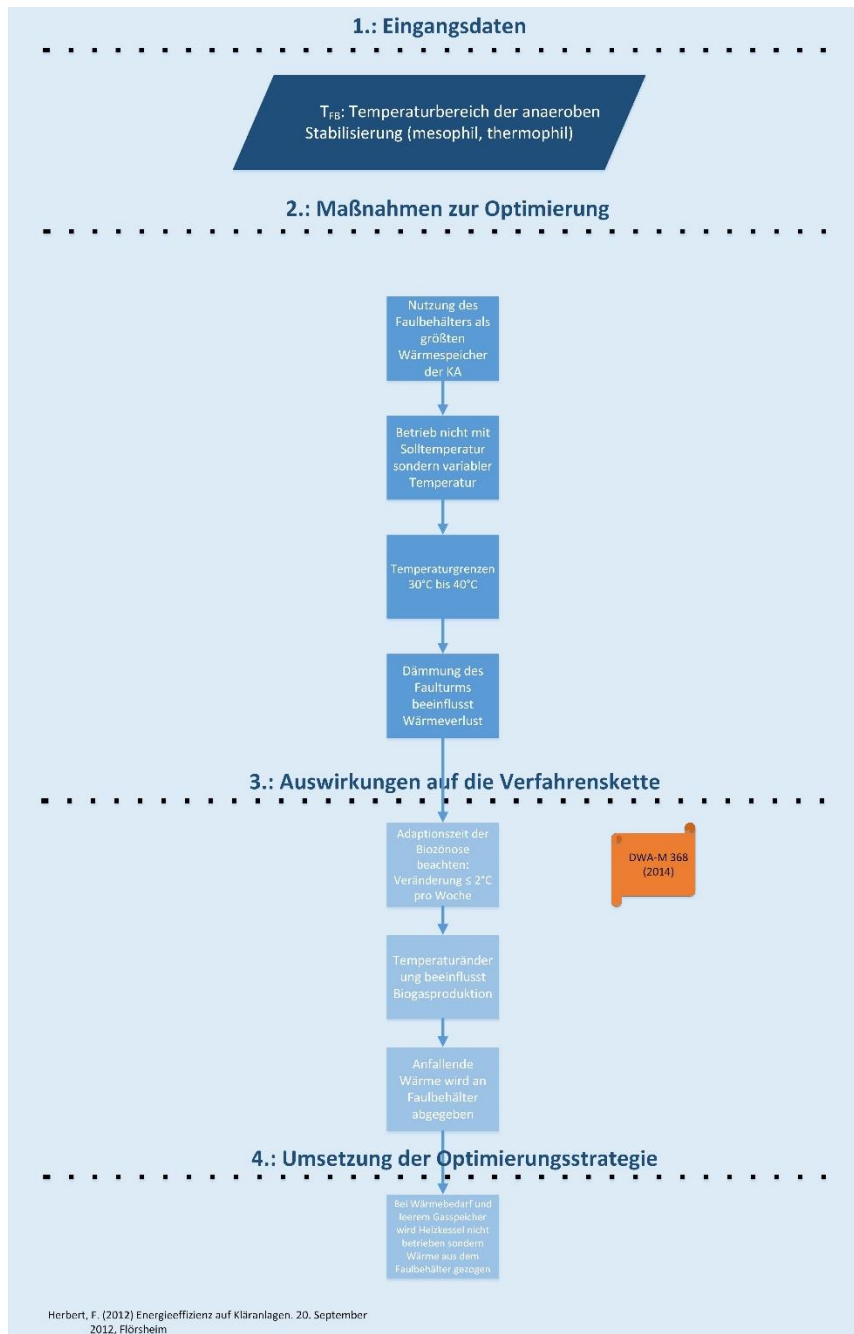


Abbildung 5.16: Checkliste WS – Faulbehälter als Wärmespeicher

Die im Kapitel 5 dargestellten Checklisten werden in Kapitel 6 beispielhaft angewendet, um die Vorgehensweise bei der Überprüfung von Optimierungspotenzialen einer Faulungsanlage zu verdeutlichen.

6 Anwendung der Checklisten an Beispielanlagen

In Kapitel 6.1 werden die Checklisten Abscheideleistung in der Vorklärung, Schlammalter in der Belüftung, Faulraumkapazitäten und Gasanfall und -verwertung beispielhaft für die Kläranlage Mayen angewendet. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf der Identifizierung des Optimierungspotenzials.

In Kapitel 6.2 wird ergänzend am Beispiel der Kläranlage Kaiserslautern auf die Eingangswertermittlung für die Checklisten Desintegration von Überschussschlamm und Eindickung von Überschussschlamm eingegangen.

In Kapitel 6.3 wird die Checkliste Abscheideleistung in der Vorklärung beispielhaft für die Kläranlage Obere Kyll angewendet. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf der Darstellung der Auswirkungen auf die gesamte Verfahrenskette. In unterschiedlichen Szenarien werden die Auswirkungen der Maßnahmen für die Kläranlage beschrieben. Ergänzt wird die Auswertung durch eine Betrachtung einer Anlage mit den Zulaufbedingungen nach DWA.

In Kapitel 6.4 wird die Praxistauglichkeit der Checklisten im Rahmen der Erstellung eines Zukunftskonzepts für die Kläranlage Untere Selz überprüft. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf den Potenzialen und Grenzen bei der Nutzung der Checklisten.

6.1 Kläranlage Mayen

6.1.1 Allgemein

Die Kläranlage der Stadt Mayen befindet sich im Landkreis Mayen-Koblenz. Sie besitzt eine Ausbaugröße von 30.000 EW und weist laut Fragebogen (Bezugsjahr 2014) eine Anschlussbelastung von 24.267 EW bei 15.729 angeschlossenen Einwohnern auf. In Anlehnung an das Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) wurden die CSB-Frachten und die Anschlussbelastungen als Jahresmittelwert berechnet. Diese sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Kläranlage der Größenklasse 4 ist demnach im Mittel deutlich geringer belastet, als die Ausbaugröße vermuten lässt.

Tabelle 7: Mittlere CSB-Anschlussbelastung der KA Mayen

	2014	2015	2016
CSB-Tagesfracht (Jahresmittelwert)	1.894 kg/d	2.076 kg/d	2.178 kg/d
EW ₁₂₀	15.783 E	17.300 E	18.150 E

Die Kläranlage wurde im Jahr 1961 ursprünglich als Tropfkörperkläranlage konzipiert und 1965 in Betrieb genommen. 1988 wurde mit der Neuplanung der Kläranlage begonnen. Die neue Kläranlage mit einer biologischen Reinigungsstufe nach dem Belebungsverfahren ist seit 1998 in Betrieb. Die Kläranlage verfügt über zwei zylinderförmige Faulbehälter aus dem Jahr 2004 mit einem Volumen von je 1.350 m³. Die Aufenthaltszeit im Faulbehälter 1 wird vom Kläranlagenbetreiber mit 30 Tagen angegeben. Der Faulbehälter 2 wird nicht mehr zur anaeroben Schlammstabilisierung genutzt, sondern dient derzeit als Schlammstapelbehälter. Die Kläranlage besitzt seit dem Jahr 2007 ein BHKW.

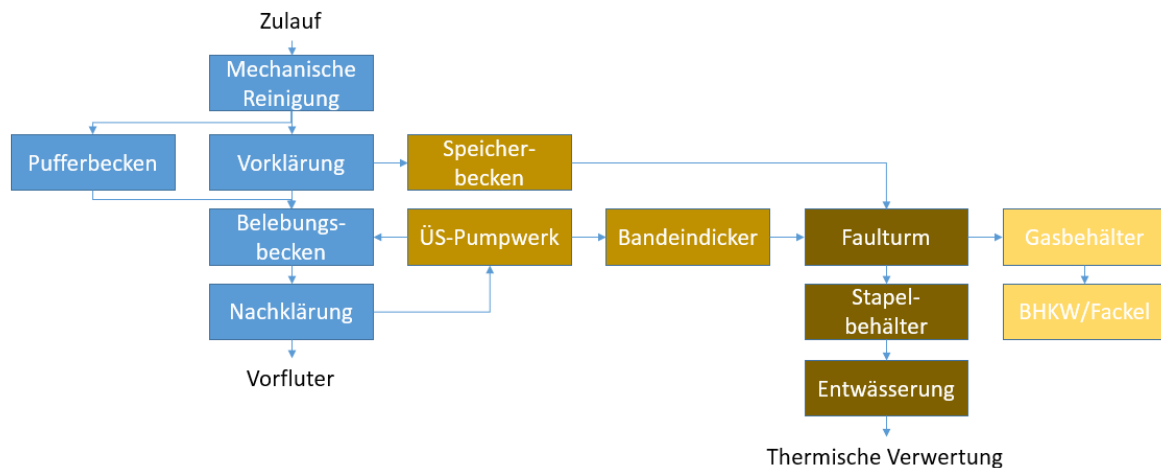


Abbildung 6.1: Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Mayen

Im Folgenden werden ausgewählte Checklisten beispielhaft für die Kläranlage Mayen angewendet. Die Auswertung wurde für das Bezugsjahr 2016 durchgeführt.

6.1.2 Checkliste A: Abscheideleistung in der Vorklärung

Zur Anwendung der Checkliste A werden die in Abbildung 6.2 dargestellten Eingangsdaten benötigt. Die Berechnung der Eingangsdaten ist im [Datenkatalog \(Kapitel 1-3\) \[8.1.1, 8.1.2, 8.1.3\]](#) detailliert beschrieben.

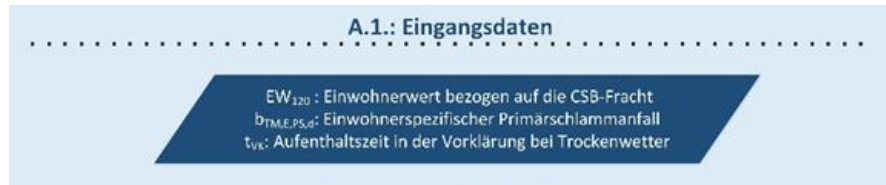


Abbildung 6.2: Eingangsdaten in die Checkliste A: „Abscheideleistung in der Vorklärung“

Mithilfe der 24h-Mischproben der CSB-Konzentration im Zulauf und den korrespondierenden Zulaufmengen kann tagesspezifisch eine CSB-Fracht errechnet werden. Der Mittelwert im Jahr 2016 beträgt 2.178 kg/d.

Entsprechend des Datenkatalogs ergeben sich folgende Kennwerte:

(1.2)

$$\begin{aligned} \frac{EW_{120}}{\text{CSB-Fracht}} : \text{Einwohnerwert bezogen auf die mittlere CSB-Fracht} &= \text{CSB-Fracht [kg/d]} / 0,12 \text{ [kg/(E·d)]} \\ &= 2178/0,12 = 18.150 \text{ [E]} \end{aligned}$$

(2.1)

$$\begin{aligned} \text{Primärschlammfracht} &= (\text{Jährlicher Primärschlammbabzug [m}^3\text{/a]} \cdot 1000 / 365) \\ &\quad \cdot \text{Mittlerer Trockenrückstand des Primärschlamms [%]} \\ &= (6.849 \cdot 1000/365) \cdot 3,2/100 = 599 \text{ [kg/d]} \end{aligned}$$

(2.2)

$$\begin{aligned} \frac{b_{TM,E,PS,d}}{\text{Primärschlammanfall}} : \text{Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall} &= 1000 \cdot (\text{Primärschlammfracht [kg/d]} / \text{Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht [E]}) \\ &= 1000 \cdot (599 / 18.150) = 33 \text{ [g/(E·d)]} \end{aligned}$$

(3.1)

$$\begin{aligned} \frac{t_{VK}}{\text{Vorklärung}} : \text{Aufenthaltszeit in der Vorklärung} &= \frac{\text{Aktiviertes Vorklärbeckenvolumen [m}^3\text{]}}{\text{Trockenwetterzufluss im Jahresmittel [m}^3\text{/d]} / 24 \frac{\text{h}}{\text{d}}} \\ &= 420 / (4.687/24) = 2,15 \text{ [h]} \end{aligned}$$

Abbildung 5.1: Checkliste A - Abscheideleistung in der Vorklärung, S. 39) zeigt, dass die Abscheideleistung in der Vorklärung durch die Implementierung einer Vorfällung erhöht werden kann. Gleiches gilt für den alternativen Einsatz eines Mikrosiebes. Im Fall der Kläranlage Mayen sind jedoch negative

Auswirkungen auf Denitrifikation zu erwarten. Die C:N-Verhältnisse im Zulauf zur Kläranlage liegen im Ausgangszustand bei:

- CSB/N_{ges}-Verhältnis im Zulauf der Kläranlage: 9,4
- BSB₅/N_{ges}-Verhältnis im Zulauf der Kläranlage: 5,5

Werden die Auswirkungen der Maßnahme Mikrosiebung in Kombination mit Fällung und Flockung mithilfe der Abscheideleistungen theoretisch betrachtet, ergeben sich die in Tabelle 8, 4. Spalte dargestellten Konzentrationen im Zulauf der biologischen Stufe.

Tabelle 8: CSB-, BSB₅- und N_{ges}- Konzentration im Zulauf und im Zulauf der biologischen Stufe nach Mikrosiebung in Kombination mit Fällung/Flockung (MS+F)

	Konzentration im Zulauf der KA in mg/l	Zuschlag Prozesswasser	Konzentration Zulauf + Prozesswasser in mg/l	Abscheideleistungen MS in %	Konzentration im Zulauf der BB nach MS+F in mg/l
CSB	360	10%	396	75%	99
BSB ₅	210	10%	231	70%	69,3
N _{ges}	38	15-25%	43,7-47,5	20%	35-38
P _{ges}	6,5	5%	6,8	80%	1,36

Unter der Annahme, dass für den Zellaufbau der heterotrophen Biomasse Phosphor im CSB/P_{ges}-Verhältnis von 200:1 benötigt wird, ergeben sich 0,45 mg P für die 90 mg CSB. Daher ist trotz der hohen Phosphorabscheideleistung von 80% nicht mit einer Phosphormangelsituation zu rechnen.

Es ist festzustellen, dass sich ein sehr geringes CSB/N_{ges}-Verhältnis von ca. 2,7 bzw. eine BSB₅/N_{ges}-Verhältnis von etwa 2 im Zulauf der biologischen Stufe einstellen würde, womit die Denitrifikation nur noch substratlimitiert abläuft. Auch bei einer vollständigen Elimination des Stickstoffs aus dem Prozesswasser, ergibt sich ein niedriges CSB/N_{ges}-Verhältnis von ca. 3,3 bzw. eine BSB₅/N_{ges}-Verhältnis von etwa 2,3. Somit ist eine vollständige Denitrifikation ohne die Zugabe von externen Kohlenstoffquellen in beiden Fällen nicht möglich.

Generell ist durch die starke Absenkung der Konzentration im Zulauf der biologischen Stufe in einem nächsten Planungsschritt die biologische Stufe zu überprüfen. Dabei sind eine deutliche Anpassung des Trockensubstanzgehaltes oder eine Verkleinerung der Belebungsbecken in Betracht zu ziehen. Bei der sich darstellenden Kohlenstoffmangelsituation zur vollständigen Stickstoffelimination ist außerdem über alternative Stickstoffeliminationsverfahren, wie die Deammonifikation im Hauptstrom, nachzudenken. Diese kann jedoch nicht für eine Anwendung empfohlen werden, da unterschiedliche Forschungsfragen für eine großtechnische Umsetzung noch nicht geklärt sind. U.a. ist der Temperaturbereich für eine technische Nutzung im Hauptstrom noch nicht abschließend bestimmt (Schäpers et al. 2016) (vgl. Anhang 8.3).

Die Maßnahme Mikrosiebung in Kombination mit Fällung und Flockung wird daher für die Kläranlage Mayen nicht empfohlen. Entsprechend ist kein Optimierungspotenzial bei der Abscheideleistung in der Vorklärung vorhanden.

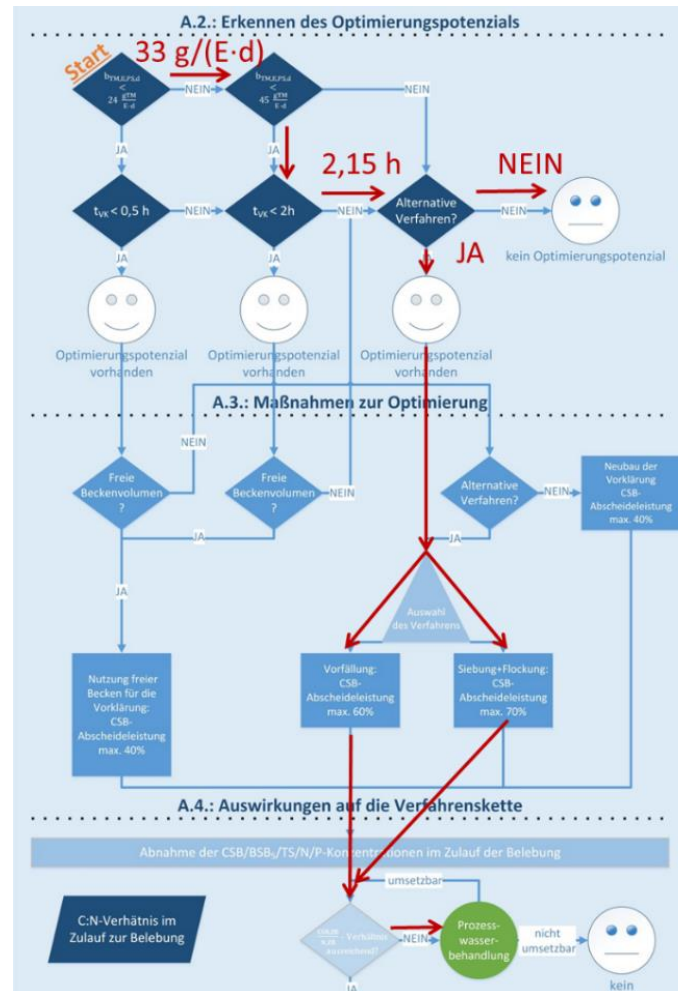


Abbildung 6.3: Beispiel „Abscheideleistung in der Vorklärung“ für die Kläranlage Mayen

6.1.3 Checkliste B: Schlammalter in der Belebung

Zur Anwendung der Checkliste B wird der Jahresmittelwert des vorhandenen Gesamtschlammalters benötigt. Dieses kann mithilfe des [Datenkatalogs \(Kapitel 6\) \[8.1.6\]](#) näherungsweise bestimmt werden. Die Stickstoffelimination erfolgt durch intermittierende Nitrifikation/Denitrifikation. Abbildung 6.4 zeigt die tägliche Belüftungsdauer.

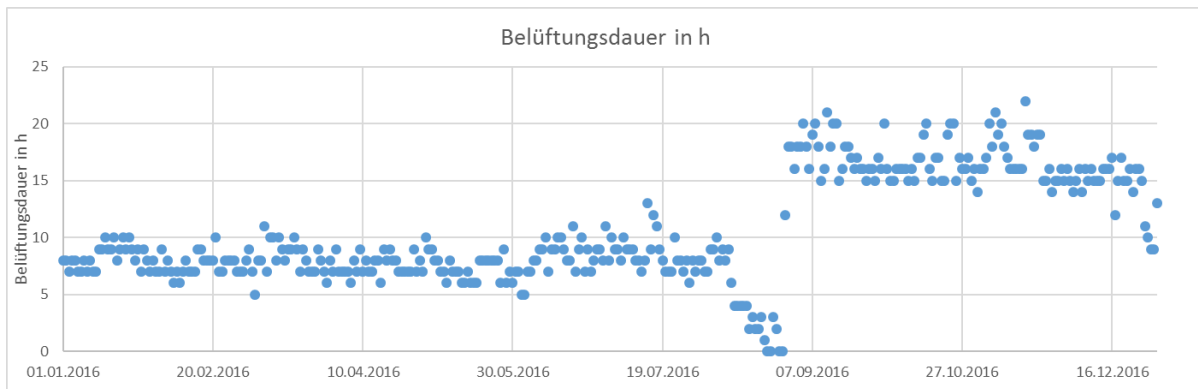


Abbildung 6.4: Tägliche Belüftungszeit im Jahr 2016 der Kläranlage Mayen

Die Belüftungsdauer im Jahr 2016 beträgt im Mittel 10,6 h/d. Der Faktor f für anteilige Belüftungszeit beträgt somit:

(6.3)

$$f = \frac{t_N}{24} = \frac{10,6}{24} = 0,44$$

Das Belebungsbeckenvolumen beträgt 5.000m^3 .

Der TS-Gehalt im Belebungsbecken beträgt im Jahresmittel $4,5\text{ g/l}$.

Der mittlere tägliche Überschussschlammabzug beträgt $96\text{ m}^3/\text{d}$ und der Trockenrückstand des Überschussschlammes beträgt vor der Eindickung im Mittel $0,86\%$ ($= 8,6\text{ g/l}$)

Das aerobe Schlammalter errechnet sich somit nach [\[8.1.6\]](#) zu:

(6.2)

$$\underline{t_{\text{TS(aerob)}}\text{vorh.}} = \frac{f \cdot V_{\text{BB}} \cdot \text{TS}_{\text{BB}}}{Q_{\text{ÜS,d}} \cdot \text{TR}_{\text{ÜS}}} = \frac{0,44 \cdot 5000\text{m}^3 \cdot 4,5\text{ g/l}}{96\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 8,6\text{ g/l}} = \underline{12\text{ d}}$$

Das Gesamtschlammalter liegt bei:

(6.4)

$$\underline{t_{\text{TS(gesamt)}}\text{vorh.}} = \frac{V_{\text{BB}} \cdot \text{TS}_{\text{BB}}}{Q_{\text{ÜS,d}} \cdot \text{TR}_{\text{ÜS}}} = \frac{5000\text{m}^3 \cdot 4,5\text{ g/l}}{96\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot 8,6\text{ g/l}} = \underline{27,3\text{ d}}$$

Bei der Anwendung der Checkliste muss im nächsten Schritt das erforderliche Schlammalter ermittelt werden. Das durchschnittlich erforderliche Schlammalter wird über die Jahresdurchschnittstemperatur und den Prozessfaktor bestimmt. Im [Datenkatalog \(Kapitel 7\) \[8.1.7\]](#) sind hierfür entsprechende Diagramme hinterlegt.

Nach Arbeitsblatt DWA-A 131 (DWA 2016) berücksichtigt der Prozessfaktor:

- Schwankungen der maximalen Wachstumsrate durch bestimmte Abwasserinhaltsstoffe
- Höhe des Überwachungswerts für den Parameter Ammoniumstickstoff
- Auswirkungen von Schwankungen der Stickstofffrachten

Hilfsweise kann für eine überschlägige Berechnung ein Prozessfaktor von 2,1 für eine Kläranlage $< 20.000\text{ EW}$ gewählt werden. (7.1)

Die Abwassertemperatur beträgt im Jahresmittel 14°C.

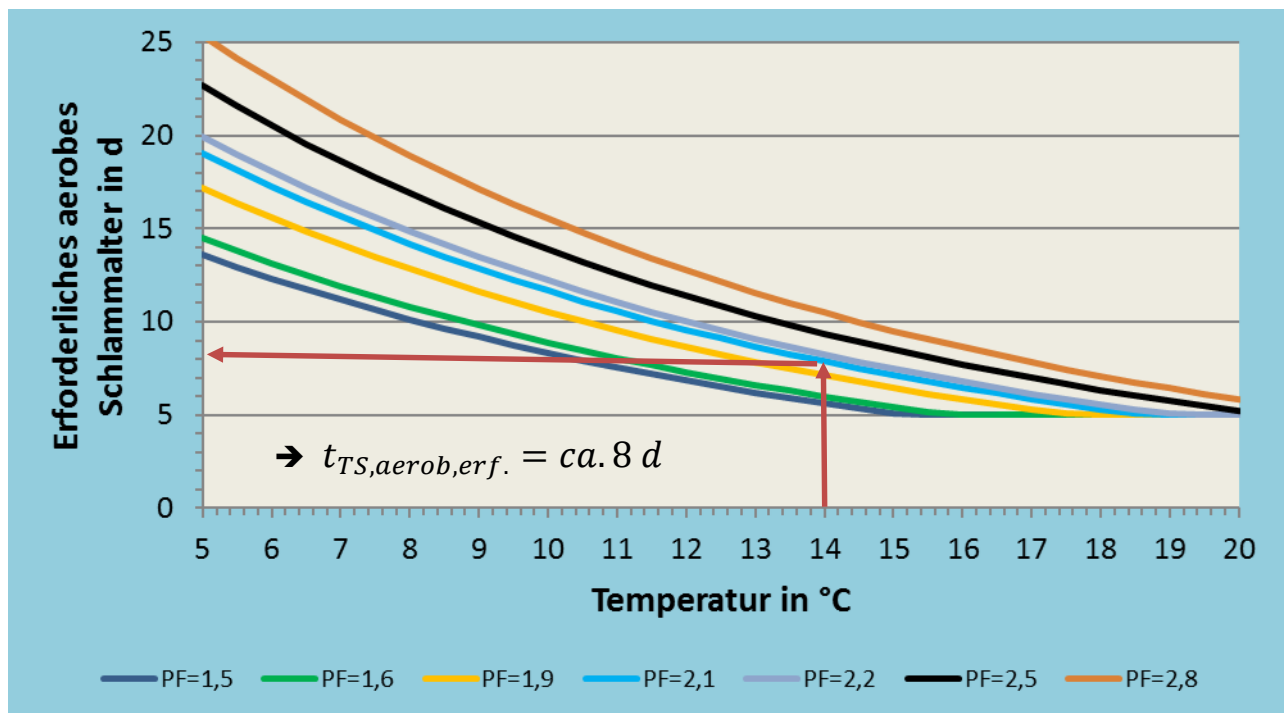


Abbildung 6.5: Diagramm zu Bestimmung des erforderlichen aeroben Schlammalters (siehe Anhang Abbildung A)

Das erforderliche aerobe Schlammalter beträgt demnach ca. 8 d.

Das im Jahresdurchschnitt erforderliche Gesamtschlammalter entspricht dem Bemessungsschlammalter. Daher kann das erforderliche Gesamtschlammalter mithilfe des V_D/V_{BB} -Verhältnisses ermittelt werden.

(7.3)

$$\frac{V_D}{V_{BB}} = \frac{t_D}{t_D + t_N} = \frac{13,4}{24} = 0,56$$

Mit der derzeitigen Belüftungsstrategie beträgt der V_D/V_{BB} -Verhältniswert 0,56.

Das erforderliche Gesamtschlammalter kann demnach nach [8.1.7] (7.4) berechnet oder in Abbildung 6.6 abgelesen werden.

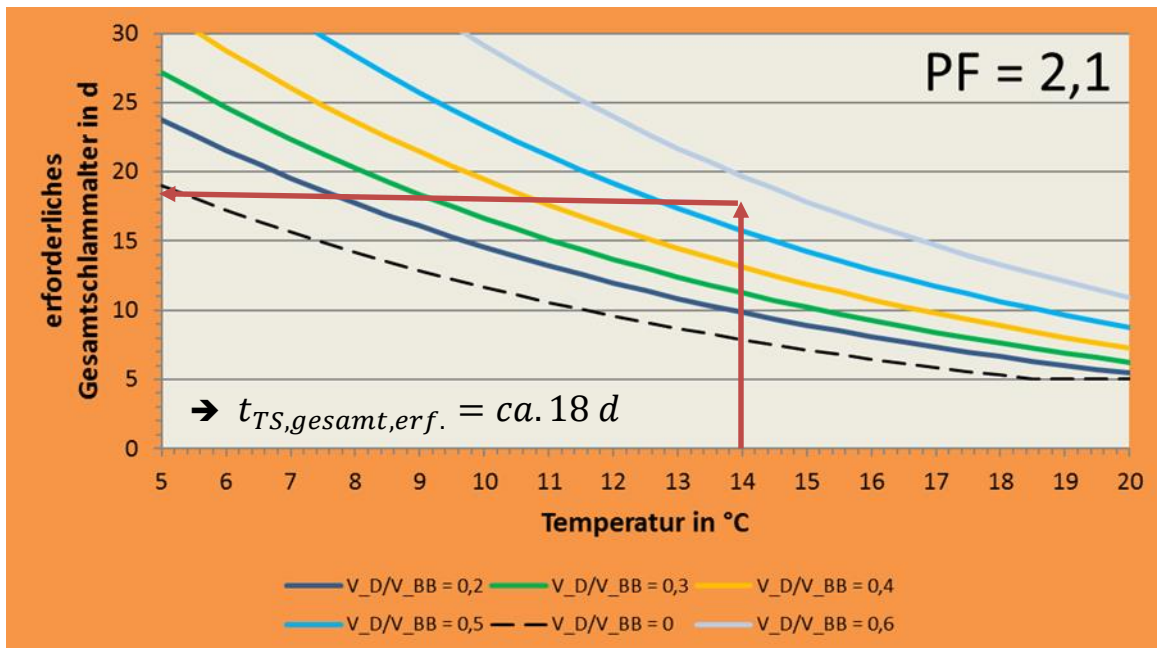


Abbildung 6.6: Diagramm zu Bestimmung des erforderlichen Gesamtschlammalters (siehe Anhang Abbildung D)

Das erforderliche Gesamtschlammalter zur Sicherstellung der Stickstoffelimination auf der KA Mayen beträgt demnach rd. 18 d. Dies weist im Vergleich zum tatsächlich vorhandenen Schlammalter auf eine enormes Einsparpotenzial im Bereich der biologischen Behandlungsstufe hin. Auch bei einer Betrachtung des aeroben Schlammalters scheint das Potenzial, wenn auch in geringerem Ausmaß, vorhanden zu sein.

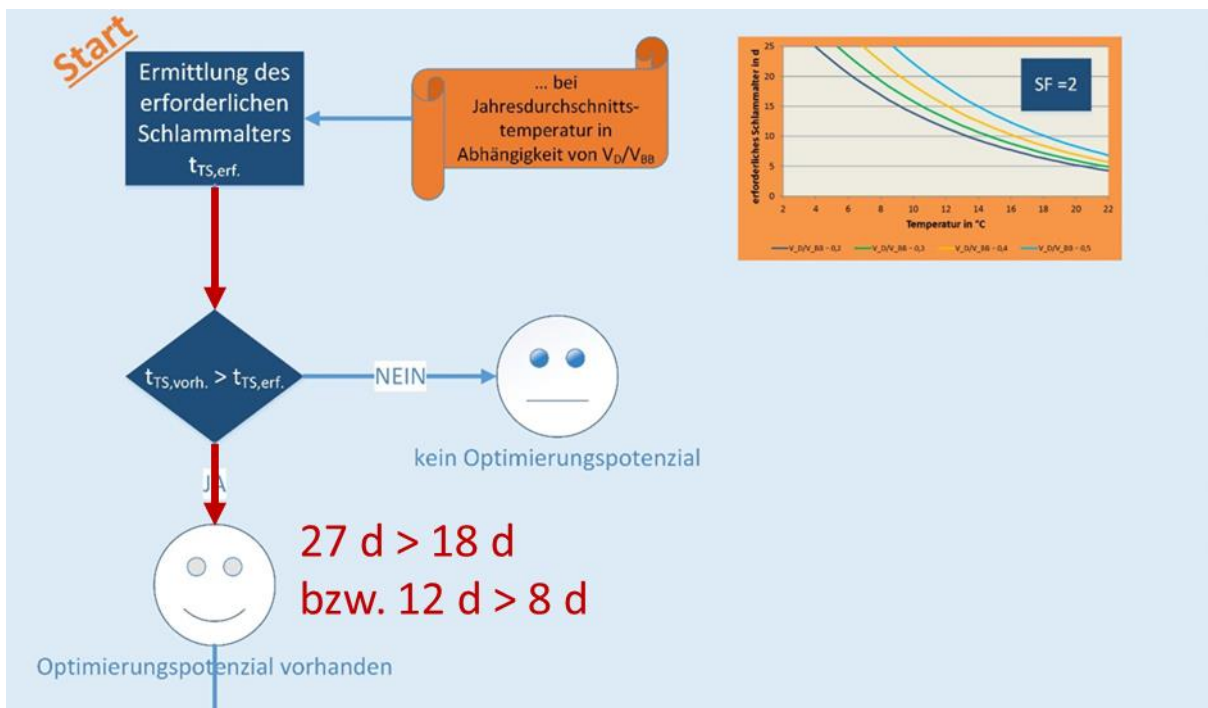


Abbildung 6.7: Erkennung des Optimierungspotenzials bezogen auf das Schlammalter in der Belegung

Im Folgenden ist überschlägig der erforderliche TS_{BB} -Gehalt ermittelt (vgl. Abbildung 6.8 und [Datenkatalog Kapitel 8](#)). Zur Bestimmung der BSB_5 -Fracht im Zulauf der biologischen Stufe muss die Abscheideleistung in der Vorklärung (Tabelle 9) berücksichtigt werden.

(8.1)

$$B_{d,BSB,ZB} = B_{d,BSB,Z} \cdot (1 - \eta_{VK}) = 1102 \text{ kg/d} \cdot (1 - 0,35) = 716,3 \text{ kg/d}$$

Tabelle 9: Abscheideleistungen (η_{VK}) in der Vorklärung für den BSB_5

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB_5	0,25 ¹	0,35 ¹	0,40 ²	0,70 ³	0,75 ⁴

Quelle: 1 (ATV-DVWK 2000) / 2 (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997) / 3 (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999) / 4 Annahme

Unter Vernachlässigung der Überschussschlammproduktion durch Phosphorelimination (\dot{U}_{S_p}) und unter der Annahme, dass keine zusätzlichen Kohlenstoffquellen eingebracht werden, kann die im Belebungsbecken vorzuhaltende Gesamtschlammmasse wie folgt berechnet werden:

(8.4)

$$M_{TS,BB,erf.} = B_{d,BSB,ZB} \cdot t_{TS,gesamt,erf} \cdot \dot{U}_{S_{C,BSB}} = 716,3 \frac{kg}{d} \cdot 17,9 \text{ d} \cdot 0,82 = 10.514 \text{ kg TS}$$

Da keine Messdaten für den TS-Gehalt im Zulauf zur Belebung vorliegen, wurde folgende Annahme getroffen, um die spezifische Überschussschlammproduktion $\dot{U}_{S_{C,BSB}}$ abzuschätzen:

(8.2)

$$\frac{B_{d,TS,ZB}}{B_{d,BSB,ZB}} = 0,8 \text{ (Annahme)}$$

Die Annahme muss immer unter Berücksichtigung der Abscheideleistung in der Vorklärung getroffen werden. Mit Hilfe des Trockensubstanzgehalts und der BSB_5 -Konzentration im Zulauf der biologischen Stufe lässt sich nach ATV-DVWK (2000) die spezifische Schlammproduktion abschätzen.

Tabelle 10: Spezifische Schlammproduktion $\dot{U}_{S_{C,BSB}}$ [kg TS/kg BSB_5] bei 10 bis 12°C (ATV-DVWK 2000)

$X_{TS,ZB} / C_{BSB}$	Schlammalter in Tagen					
	4	8	10	15	20	25
0,4	0,79	0,69	0,65	0,59	0,56	0,53
0,6	0,91	0,81	0,77	0,71	0,68	0,65
0,8	1,03	0,93	0,89	0,83	0,8	0,77
1	1,15	1,05	1,01	0,95	0,92	0,89
1,2	1,27	1,17	1,13	1,07	1,04	1,01

Aus dem Quotienten von der erforderlichen Schlammmasse und dem Belebungsbeckenvolumen resultiert der erforderliche TS-Gehalt im Belebungsbecken.

(8.5)

$$\rightarrow TS_{BB} = \frac{M_{TS, BB, erf.}}{V_{BB}} = \frac{10.514 \text{ kg TS}}{5.000 \text{ m}^3} = 2,1 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

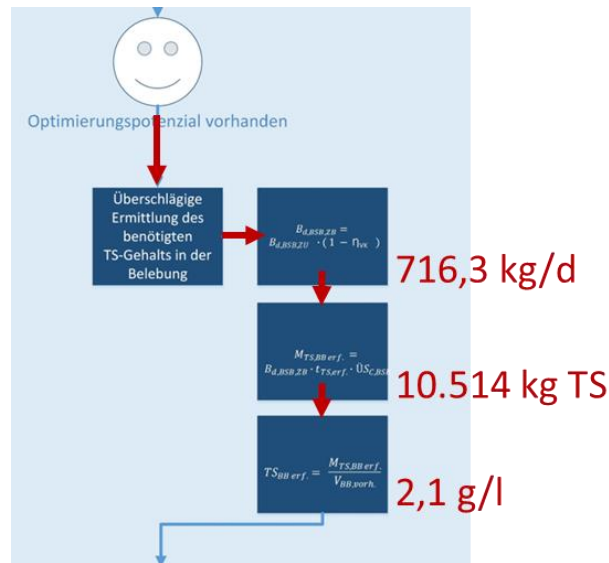


Abbildung 6.8: Überschlägige Ermittlung des benötigten TS-Gehalts

Der überschlägig ermittelte TS_{BB} -Gehalt von 2,1 g/l liegt deutlich unter dem derzeit eingestellten TS_{BB} -Gehalt von 4,5 g/l. Eine Absenkung des TS_{BB} -Gehaltes erscheint daher möglich. Dieser niedrigere Wert ist durch eine schrittweise Erhöhung des Überschussschlammabzugs zu erreichen. Die Ammoniumkonzentrationen im Ablauf muss dabei kontrolliert werden.

Das Belebungsbecken besteht aus zwei parallel betriebenen Umlaufbecken ($V = 2 \cdot 2.500 \text{ m}^3$). Da eine Stilllegung eines Beckens mit relativ geringem Aufwand möglich erscheint, wird zudem die Außerbetriebnahme eines Umlaufbeckens überprüft. Bei der Stilllegung eines Beckens könnte das berechnete erforderliche Gesamtschlammalter von 18 Tagen bei einem TS von ca. 4,2 g/l erreicht werden.

(8.5)

$$TS_{BB} = \frac{M_{TS, BB, erf.}}{V_{BB}} = \frac{10.514 \text{ kg TS}}{2.500 \text{ m}^3} = 4,2 \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

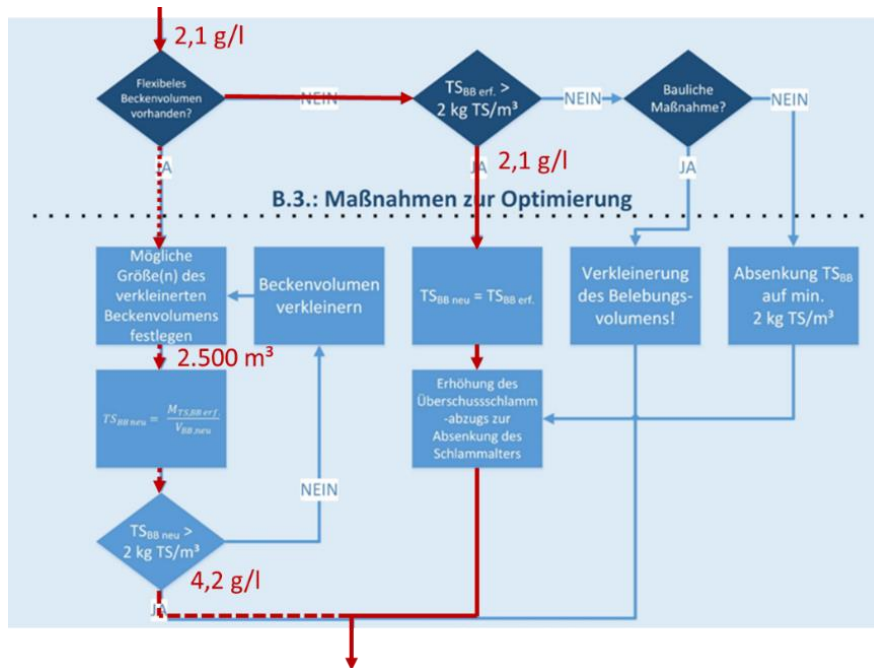


Abbildung 6.9: Maßnahmen zur Optimierung - Entscheidungsfindung

Durch die Absenkung des Schlammalters ist mit einer deutlichen Verbesserung der Energiebilanz der Anlage zu rechnen. Zum einen erhöht der gestiegene organische Trockenmassegehalt des Überschussschlamm den Faulgasanfall und damit die Stromproduktion. Zum anderen ist durch die Reduktion des Belebungsbeckenvolumens mit deutlichen Einsparungen im Energiebedarf durch nicht benötigte Belüftungsenergie zu rechnen.

Bei einer weitergehenden Detailbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass durch die Außerbetriebnahme von 2.500 m³ Beckenvolumen auch die Belüftungsdauern bei der intermittierenden Belüftung anzupassen sind. Dadurch wäre eine weitere Absenkung des aeroben Schlammalters möglich. Des Weiteren müssen die Hydraulik der Anlage (inklusive Nachklärung) und die Belüftungsaggregate (Belebungsichte, Beaufschlagung etc.) überprüft werden. Die angeführten Aspekte sollten im Rahmen einer Fachplanung untersucht werden.

6.1.4 Checkliste F: Faulraumkapazitäten

Die Anwendung der Checkliste F „Faulraumkapazitäten“ hilft zu beurteilen, in welchem Maße die Faulbehälter zusätzliche Substrate aufnehmen können. Zur Beurteilung von freien Faulraumkapazitäten ist die Faulzeit die entscheidende Kenngröße. Dieses kann mithilfe des **Datenkatalogs (Kapitel 9) [8.1.9]** ermittelt werden. Dazu werden das Volumen der vorhandenen Faulbehälter und die mittlere tägliche Rohschlammmenge benötigt.

Die mittlere tägliche Rohschlammmenge beträgt 32,7 m³ RoS/d.

(9.1)

$$Q_{RoS,d} = Q_{PS,d} + Q_{ÜSS,d} + Q_{FS,d} = 19,8 \text{ m}^3 \text{ PS/d} + 12,9 \text{ m}^3 \text{ ÜSS/d} = 32,7 \text{ m}^3 \text{ RoS/d}$$

Auf der Kläranlage Mayen wird nur einer der Faulbehälter als Faulraum betrieben. Der andere Faulbehälter dient als Schlammstapelbehälter.

(9.2)

$$V_{FB,ges} = V_1 = 1.350 \text{ m}^3$$

(9.3)

$$t_{FB} = \frac{V_{FB,ges}}{Q_{RoS,d,ges}} = \frac{1.350 \text{ m}^3}{32,7 \text{ m}^3/\text{d}} = 41,3 \text{ d}$$

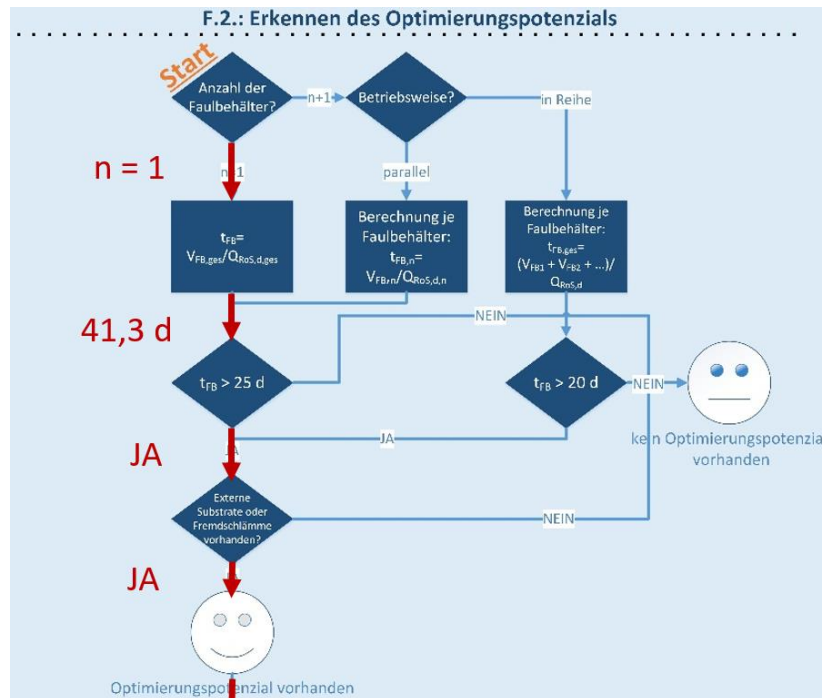


Abbildung 6.10: Ermittlung der Faulzeit zur Erkennung des Optimierungspotenzials bei der Checkliste Faulraumkapazitäten

Die Faulzeit ist mit 41,3 d sehr lang. Der zur Faulung betriebene Faulbehälter könnte daher zusätzliche Substrate aufnehmen. In einen nächsten Schritt wird überprüft, ob externe Fremdschlämme für eine Mitbehandlung vorhanden sind. Abbildung 6.11 zeigt die Kläranlagenstandorte im unmittelbaren Umkreis der Kläranlage Mayen.

Mit Hilfe der folgenden Annahmen wird der Fremdschlammanfall über die Anschlussbelastung der Anlagen überschlägig ermittelt:

- Einwohnerspezifischer Schlammanfall bei Tropf- und Tauchkörper: 30 g/(E·d) (vgl. DWA 2014): 85-Perzentil)
- Einwohnerspezifischer Überschussschlammanfall ohne Stabilisierung ($t_{TS,Bem} < 15 \text{ d}$): 60 g/(E·d)
- Maschinelle Überschussschlammverdickung auf einen TR von 6%

Im näheren Umkreis der Kläranlage sind Fremdschlämme vorhanden. Daher ist von einem Optimierungspotenzial auszugehen.

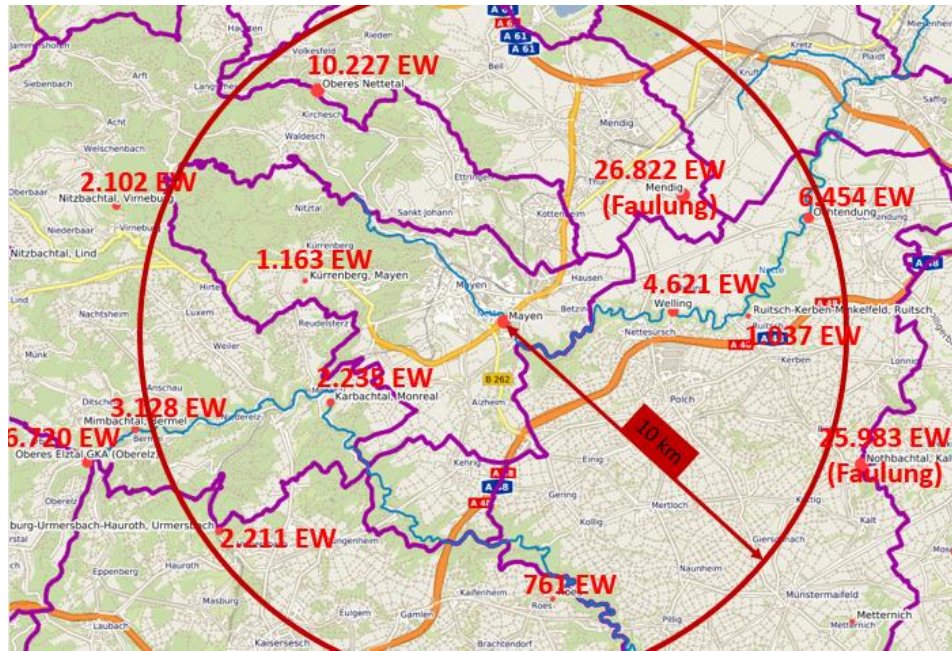


Abbildung 6.11: Kläranlagenstandorte inklusive der Anschlussgröße (Einwohner + Einwohnergleichwert) im Umkreis der Kläranlage Mayen (Quelle: geoportal-wasser.rlp.de)

Tabelle 11: Klärschlammmanfall der Kläranlagen im Umkreis der Kläranlage Mayen

Kläranlage	Anschlussbelastung	Verfahren/Anmerkung	Schlamm-trockenmasse	Schlamm-anfall	Entfernung	Fahrzeit
	EW in E		$B_{TM,ÜSS,d}$ in kg/d	$Q_{ÜSS}$ in m ³ /d	in km	in Minuten
Karbachtal, Moreal	2.238	Belüftete Teiche	-	-	-	-
Kürrenberg	1.163	Tropfkörper + Stilllegung geplant	-	-	-	-
Masburg-Urtemersbach-Hauroth	2.117	Tropfkörper	64	1,1	15,1	22
Mimbachtal	3.128	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	188	3,1	15,4	19
Nitzbachtal	2.102	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	126	2,1	17,3	20
Oberes Elztal Umersbach	6.720	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	403	6,7	16,2	18
Oberes Nettetal	10.227	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	614	10,2	12,4	18
Ochtendung	6.454	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	387	6,5	12,4	15
Roes	761	Tauchkörper	23	0,4	11,0	17
Ruitsch-Kerben-Minkelfeld	1.037	Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	62	1,0	14,4	19
Welling	4.621	Tropfkörper + Belebung & gemeinsam aerobe Stabilisierung	277	4,6	8,0	12

Beispiel Oberes Nettetal:

$$B_{TM,ÜSS,d} = 10.227 E \cdot 60 \text{ g}/(E \cdot d) = 614 \text{ kg/d}$$

$$Q_{ÜSS,d} = 614 \text{ kg/d} / 0,06 = 10,2 \text{ m}^3/\text{d}$$

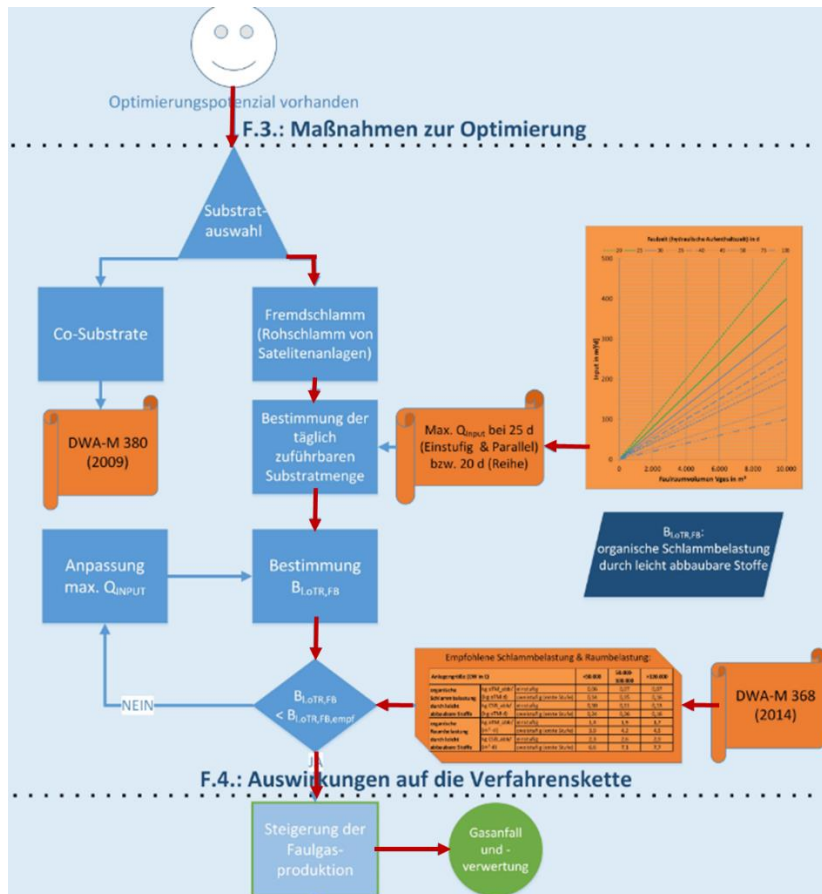


Abbildung 6.12: Anwendung der Checkliste F (Faulraumkapazitäten)

Im nächsten Schritt wird daher die täglich der Faulung der KA Mayen zuführbare Fremdschlammmenge ermittelt. Die täglich zuführbare Substratmenge kann aus dem Diagramm „Bestimmung der täglich zuführbaren Substratmenge“ (Abbildung 6.13, vgl. [Datenkatalog Kapitel 12 \[8.1.12\]](#)) abgelesen oder anhand folgender Formel [\[8.1.12\]](#) ([12.1](#)) berechnet werden:

$$Input_{Substrat} = \frac{V_{FB,ges}}{t_{gewählt}} - Q_{RoS,d,ges} = \frac{1.350 \text{ m}^3}{25 \text{ d}} - 32,7 \text{ m}^3/\text{d} = 21,3 \text{ m}^3/\text{d}$$

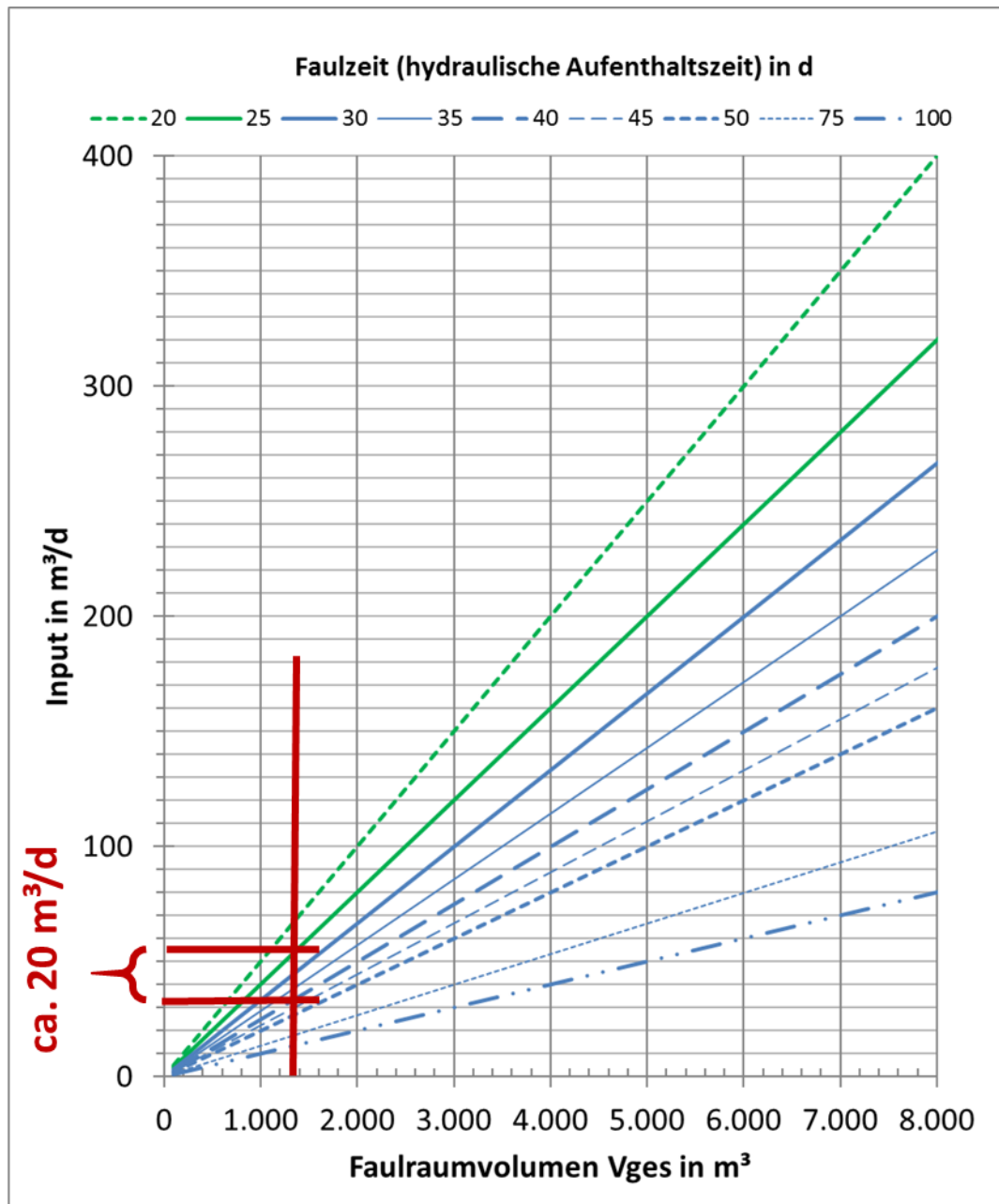


Abbildung 6.13: Bestimmung der täglich zuführbaren Substratmenge

Die Kläranlage Kürrenberg soll zukünftig an die Kläranlage Mayen angeschlossen werden. Dadurch ist auch mit einem höheren Schlammanfall auf der Kläranlage Mayen zu rechnen. Dieser wird anhand der angeschlossenen Einwohner mit ca. 5% des derzeitigen Schlammanfalls abgeschätzt. Die täglich von extern zuführbare Substratmenge verringert sich somit auf 19,7 m^3/d .

Zur Auslastung der Faulraumkapazitäten sind unterschiedliche Varianten denkbar:

Variante A: Kläranlage Welling und Ochtendung – ca. 11,1 m³/d

Variante B: Kläranlage Mimbachtal und Oberes Elztal GKA – ca. 9,8 m³/d

Variante C: Oberes Nettetal – ca. 10,2 m³/d

Diese Volumina können auch im Jahresverlauf dem Faulbehälter 1 zugegeben werden, ohne dass die hydraulische Verweilzeit unter 25 Tage absinkt (siehe Abbildung 6.14).

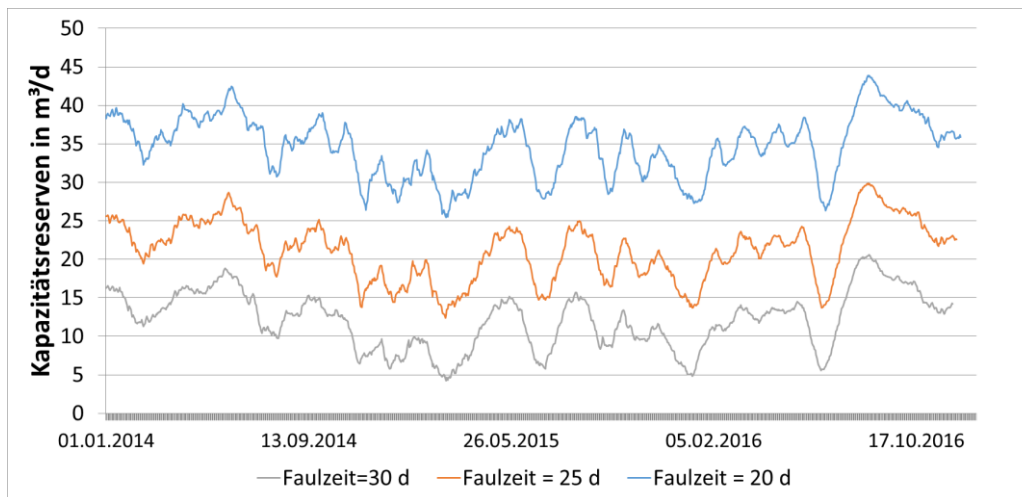


Abbildung 6.14: Kapazitätsreserven im Jahresverlauf

Es ist zu berücksichtigen, dass sich in Umkreis der Kläranlage Mayen auch die Faulungsanlagen Mendig und Nothbachtal befinden, die ebenfalls über freie Faulraumvolumen verfügen könnten. Im Rahmen des Projekts ZEBRAS wurden zu diesen Faulungsanlagen jedoch keine Daten erhoben, weshalb das freie Faulraumvolumen der Anlagen nicht bekannt ist.

Für **Variante B** wird beispielhaft dargestellt, wie die Checkliste angewendet wird. In Summe fallen bei Variante B 591 kg TM an. Bei einem zu erwarteten Glühverlust von 70% werden somit ca. 414 kg oTM pro Tag der Faulung zugeführt. Sind Menge und Beschaffenheit der mit zu behandelnden Fremdschlämme bekannt, ist die organische Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe zu überprüfen. Eine Einhaltung der Raum- und Schlammbelastungen ist zu gewährleisten. Entsprechende Kenngrößen sind dem Datenkatalog bzw. Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Empfohlene Raum- und Schlammbelastung nach Merkblatt DWA-M 368 (2014) in Abhängigkeit von der Anlagengröße

Anlagengröße (EW in E)			<50.000
organische Schlammbelastung	kg oTM_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,06
		zweistufig (erste Stufe)	0,14
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,10
		zweistufig (erste Stufe)	0,24
organische Raumbelastung	kg oTM_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	1,4
		zweistufig (erste Stufe)	3,9
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	2,3
		zweistufig (erste Stufe)	6,6

Für die Berechnung wird die organische Trockenmasse im Faulbehälter benötigt. Diese kann über den TR und GV des Faulschlammes der Kläranlage Mayen bestimmt werden:

TR Faulschlamm = 3,2% (Quelle: ZEBRAS-Fragebogen)

GV Faulschlamm = 57,8 % (Quelle: ZEBRAS-Fragebogen)

Sind keine Informationen zum Anteil der leicht abbaubaren Stoffe des Rohschlammes der Satellitenanlagen vorhanden, können die Angaben aus Tabelle 13 verwendet werden.

Tabelle 13: Anteil der leicht abbaubaren Stoffe bezogen je organischer Trockenmasse (DWA 2014)

Primärschlamm	70 %
Überschussschlamm	45 %
Rohschlamm	57 %

Zur Bestimmung der Schlammbelastung durch leicht abbaubare organische Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Rohschlammes mit der organischen Schlammmasse im Reaktor ins Verhältnis gesetzt.

Nachweis: (13.1)

$$B_{L.oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS}} < B_{l.oTM,FS,empf.}$$

$$\begin{aligned} B_{L.oTM,FB} &= \\ &= \frac{0,7 \cdot \left(19,8 \frac{m^3}{d} \cdot 3,5\% \cdot 75\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) \right) + 0,45 \cdot \left(12,9 \frac{m^3}{d} \cdot 5\% \cdot 70\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) + 9,8 \frac{m^3}{d} \cdot 6\% \cdot 70\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) \right)}{0,032 \cdot 0,578 \cdot 1.350 m^3 \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right)} = \\ &= \frac{0,7 \cdot (520 kg oTM/d) + 0,57 \cdot (452 kg oTM/d + 412 g oTM/d)}{3,2\% \cdot 57,8\% \cdot 1.350 m^3 \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{856 kg oTM_{abb}}{24.970 kg oTM \cdot d} = \\ &= 0,034 \frac{kg oTM_{abb}}{kg oTM \cdot d} < 0,05-0,06 \end{aligned}$$

Zur Bestimmung der Raumbelastung durch leicht abbaubare Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Rohschlammes mit dem Reaktorvolumen ins Verhältnis gesetzt.

Nachweis: (13.3)

$$B_{R,l.oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB}} < B_{R,l.oTM,FS,empf.}$$

$$\begin{aligned} B_{R,l.oTM,FB} &= \\ &= \frac{0,7 \cdot \left(19,8 \frac{m^3}{d} \cdot 3,5\% \cdot 75\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) \right) + 0,45 \cdot \left(12,9 \frac{m^3}{d} \cdot 5\% \cdot 70\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) + 9,8 \frac{m^3}{d} \cdot 6\% \cdot 70\% \cdot \left(1.000 \frac{kg}{m^3} \right) \right)}{1.350 m^3} = \\ &= 0,634 \frac{kg oTM_{abb}}{m^3 \cdot d} < 1,0-1,4 \end{aligned}$$

Sowohl der Nachweis für die organische Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe als auch der Nachweis für die organische Raumbelastung werden eingehalten bzw. deutlich unterschritten (vgl. Tabelle 12). Dies bestätigt das Optimierungspotenzial, zeigt jedoch, dass zusätzlich weitere Fremdschlämme angenommen werden können.

Zur Berechnung der zukünftigen Faulgasproduktion verweist die Checkliste F (Faulraumkapazitäten) auf die Checkliste G (Gasanfall & -verwertung). Auf die Checkliste G (Gasanfall & -verwertung) wird in Kapitel 6.1.5 näher eingegangen. Durch Mitfaulung der Fremdschlämme wird – durch einen erhöhten Organikabbau – anlagenübergreifend die Entsorgungsmenge reduziert. Die Rückbelastung durch Filtratwasser wird sich um ca. 40% erhöhen.

6.1.5 Checkliste G: Gasanfall und -verwertung

Die Checkliste G „Gasanfall und -verwertung“ wird unter der Annahme angewendet, dass die Fremdschlämme der Kläranlage Mimbachtal und Oberes Elztal GKA (Variante B Kapitel 6.1.4) mitbehandelt werden. Es werden keine Co-Substrate berücksichtigt.

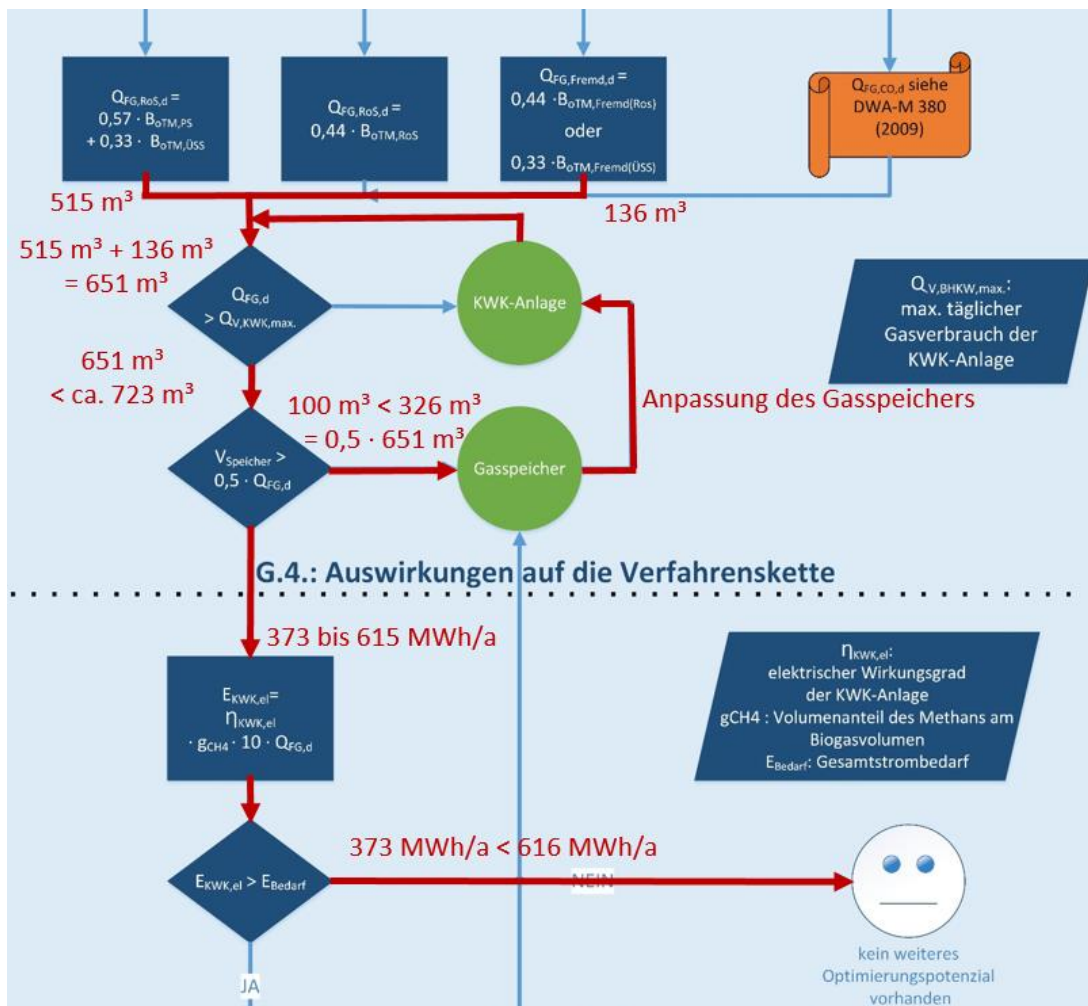


Abbildung 6.15: Anwendung der Checkliste G: Gasanfall und -verwertung

Die derzeitige Faulgasproduktion beträgt im Mittel 500 m³/d. Die zusätzliche Faulgasproduktion lässt sich anhand der organischen Trockenmasse der mitbehandelten Fremdschlämme wie folgt berechnen:

(14.7) und (14.4)

$$Q_{FG,d} = 0,33 \cdot B_{oTM,Fremd(\ddot{U}SS)} = 0,33 \frac{\text{m}^3}{\text{kg oTM}} \cdot 411,6 \text{ kg oTM/d} = 136 \text{ m}^3/\text{d}$$

In Summe resultiert damit eine täglich Faulgasproduktion von 651 m³.

Nach Aussagen des Betreibers wird das BHKW derzeit nur mit ca. 60% der Leistung betrieben. Der maximale tägliche Gasverbrauch wird anhand von Formel 15.1 abgeschätzt:

(15.1)

$$Q_{V,KWK,max.} \approx \frac{\text{elektrische Nennleistung} + \text{thermische Nennleistung}}{\text{Gesamtwirkungsgrad}} \cdot \frac{1}{\text{Methangehalt} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} \cdot 24 \text{ h/d} =$$

$$\frac{78 \text{ kW} + 105 \text{ kW}}{86,8\%} \cdot \frac{1}{70\% \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} \cdot 24 \text{ h/d} = 723 \text{ m}^3/\text{d}$$

Insgesamt kann das BHKW ca. 720 m³/d Faulgas verwerten und damit die zukünftig anfallenden 636 m³/d verwerten.

Das vorhandene Gasspeichervolumen beträgt 100 m³ und ist bereits für den Ist-Zustand deutlich kleiner als empfohlen (siehe Checkliste S: Gasspeicher).

Der Methangehalt des anfallenden Gases beträgt laut Betriebstagebuch im Mittel ca. 70%. Der vom Betreiber angegebene elektrische Wirkungsgrad des BHKWs beträgt 37%. Der rechnerisch ermittelte elektrische Wirkungsgrad weicht allerdings von diesem deutlich ab. Wie in Abbildung 6.16 zu erkennen ist, schwankt er im Jahresverlauf jahreszeitenabhängig zwischen 20% und 26% und beträgt im Mittel lediglich 22,4%.

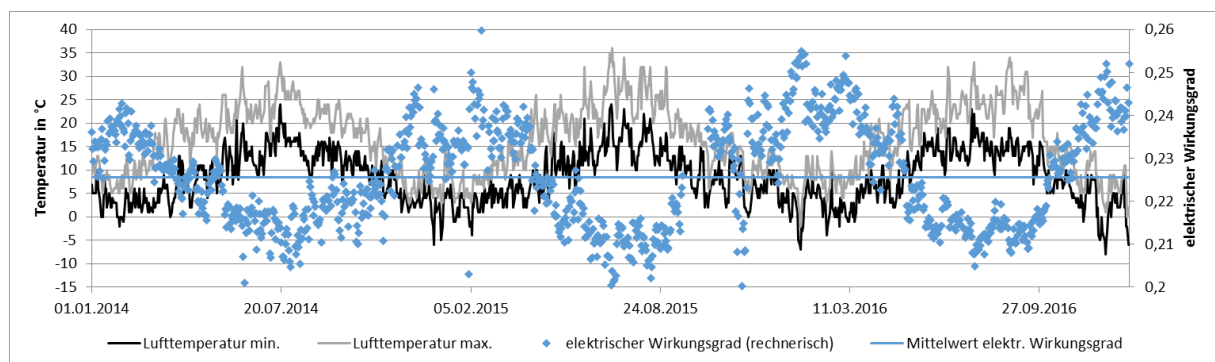


Abbildung 6.16: Elektrischer Wirkungsgrad im Jahresverlauf

Die Ermittlung des mittleren elektrischen Wirkungsgrades für das Jahr 2016 erfolgt nach [9.1.17]:

$E_{KWK,el}$ = Jährliche Stromerzeugung der KWK-Anlage = 315.522 kWh (Summe 2016)

$Q_{FG,a}$ = Jährlicher Faulgasverbrauch (Messwert) = 195.778 m³

g_{CH4} = Methangehalt = 71 %

(17.1)

$$E_{Prim} = Q_{FG,a} \cdot g_{CH4} \cdot 10 \text{ kWh/m}^3 = 195.778 \text{ m}^3 \cdot 0,71 \cdot 10 \text{ kWh/m}^3 = 1.380.024 \text{ kWh}$$

(17.2)

$$\eta_{el,KWK} = \frac{E_{KWK,el}}{E_{Prim}} = \frac{315.522 kWh}{1.380.024 kWh} = 0,228 \approx 23\%$$

Eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades erscheint bei einer besseren Auslastung des BHWK von zukünftig ca. 90 % durchaus möglich. Maximal ist ein Wirkungsgrad von 37% möglich. Demnach ist durch Mitfaulung der Schlämme der beiden KAs eine Stromproduktion auf der KA Mayen zwischen minimal 373 MWh/a und maximal 615 MWh/a zu erwarten:

$$E_{KWK,el,IST} = 298.000 \text{ kWh/a (Mittelwert 2014-2016)}$$

(16.1)

$$\begin{aligned} E_{KWK,el} &= \eta_{KWK,e\ddot{o}} \cdot g_{CH_4} \cdot 10 \cdot Q_{FG,d} = \\ &= 0,224 \cdot 0,7 \cdot 10 \cdot 651 \text{ m}^3/d = 1.021 \text{ kWh/d} = 372.580 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{KWK,el} &= \eta_{KWK,el} \cdot g_{CH_4} \cdot 10 \cdot Q_{FG,d} = \\ &= 0,37 \cdot 0,7 \cdot 10 \cdot 651 \text{ m}^3/d = 1.686 \text{ kWh/d} = 615.422 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

Der Gesamtstromverbrauch im Jahr 2016 betrug rund 740.000 kWh/a. Unter Annahme eines Wirkungsgrades von max. 37% könnte der Strombedarf der Kläranlage durch die Mitbehandlung der Fremdschlämme im Jahresmittel zu 80% gedeckt werden. Durch die damit einhergehende Erhöhung der Rückbelastung ist jedoch mit einer leichten Erhöhung des Energiebedarfs bei der Schlammbehandlung und mit einem erhöhten Energieaufwand bei der Stickstoffelimination zu rechnen.

6.2 Kläranlage Kaiserslautern

Die Checkliste D „Desintegration von Überschussschlamm“ und die Checkliste E „Eindickung von Überschussschlamm“ werden im Folgenden beispielhaft für die Kläranlage Kaiserslautern angewendet.

Die Kläranlage Kaiserslautern besitzt eine Ausbaugröße von 210.000 EW. Es handelt sich um eine mechanisch-biologische Abwasserreinigungsanlage mit biologischer Stickstoff- und Phosphorelimination sowie chemischer Phosphorelimination mittels Simultanfällung. Die Anlage besitzt zwei ÜSS-Zentrifugen, zwei eiförmige Faulbehälter, zwei Zentrifugen zur Faulschlammeindickung inklusive Vorlagebehälter sowie zwei Schlammsilos für den entwässerten Faulschlamm (Abbildung 6.17).

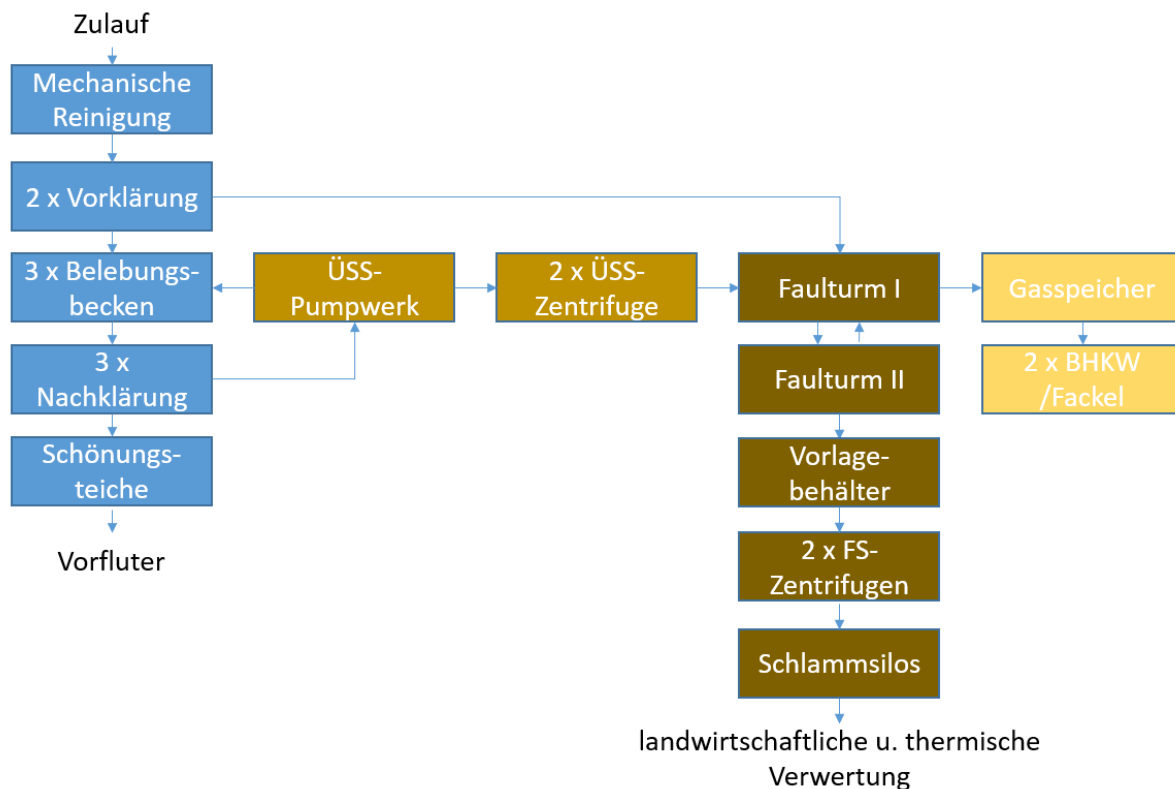


Abbildung 6.17: Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Kaiserslautern

Die im Jahr 1972 errichteten gleichgroßen Faulbehälter mit einem Volumen von je 4.000 m³ haben in Summe ein Nutzvolumen von 7.200 m³. Die Beschickung des Faulbehälters I mit Rohschlamm erfolgt über den Heizschlammkreislauf (siehe Abbildung 6.18). In Faulbehälter I sorgt ein Schraubenschaufler für die Durchmischung. Eine zusätzliche Durchmischung erfolgt durch außenliegende Umwälzpumpen. Diese fördern den Schlamm von Faulbehälter I in Faulbehälter II. Von dort aus wird der Schlamm über die Heizschlammumpen in den Faulbehälter I zurückgeführt. Die Ablaufmenge entspricht der Zulaufmenge in den FB I. Die verwendete Umwälzschlammpumpe kann bis zu 300 m³/h Schlamm aus FB II in FB I zurückführen. Daher ist davon auszugehen, dass Schlamm innerhalb eines Tages mehrfach beide Faulbehälter durchläuft. Daher wird vereinfacht davon ausgegangen, dass es sich um ein einstufiges, vollaufgemischtes, kontinuierlich durchflossenes System handelt. Es ist jedoch zu beachten, dass FB I besser durchmischt ist und der Rohschlamm nach der Einbringung erst in FB I verbleibt, wodurch im FB I weitere reaktionskinetische Vorteile zu erwarten sind.

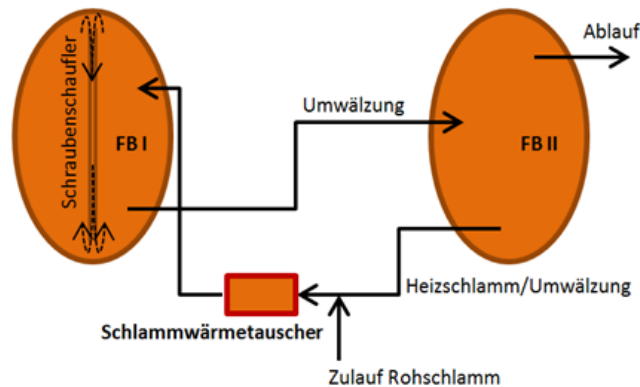


Abbildung 6.18: Fließschema der Faulung der KA KL im Jahr 2014 (Dilly 2015)

6.2.1 Checkliste D: Desintegration von Überschussschlamm

Zur Anwendung der Checkliste D werden die Faulzeit (hydraulische Aufenthaltszeit) und die spezifische Faulgasproduktion benötigt. (vgl. [Datenkatalog Kapitel 9 und 10 \[8.1.9\]\[8.1.10\]](#))



Abbildung 6.19: Eingangsdaten in die Checkliste D: Desintegration

Für die Ermittlung der spezifischen Faulgasproduktion und der Faulzeit wurden die Betriebsdaten aus dem Jahr 2014 ausgewertet (Dilly 2015). Zur Ermittlung der Faulzeit muss die mittlere tägliche Rohschlammmenge ermittelt werden. Bei der Kläranlage Kaiserslautern werden keine Co-Substrate und Fremdschlämme der Schlammbehandlung bzw. Faulung direkt zugegeben. Fremdschlämme anderer Kläranlagen werden im Zulauf der Kläranlage eingeleitet. Somit sind diese Frachten im abgezogenen Primärschlamm und im geringeren Umfang im Überschussschlamm enthalten.

Mittlere tägliche Rohschlammmenge = Mittlere Primärschlammmenge
 + Mittlere Überschussschlammmenge
 (nach der Eindickung)
 + Mittlere Fremdschlammmenge

(9.1)

$$Q_{ROS,d} = Q_{PS,d} + Q_{ÜSS,d} = 270 \text{ m}^3/\text{d}$$

Die vorhandene Faulzeit ermittelt sich unter der vereinfachten Annahme, dass es sich bei dem System der beiden Faulbehälter um ein einstufiges, volldurchmischtes, kontinuierlich durchflossenes System handelt, wie folgt:

(9.2)

$$V_{FB,ges} = V_1 + V_2 = 7.200 \text{ m}^3$$

(9.3)

$$\text{Faulzeit} = t_{FB} = \frac{V_{FB,ges}}{Q_{ROS,d}} = \frac{7200 \text{ m}^3}{270 \text{ m}^3/\text{d}} = \text{ca. } 27 \text{ d}$$

Zur Berechnung der spezifischen Faulgasproduktion wird die jährlich erzeugte Faulgasmenge auf die jährlich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse bezogen. Alternativ kann mit mittleren Tagesmengen gerechnet werden. Da bei der Kläranlage Kaiserslautern die Primärschlammmenge und die Überschussschlammmenge getrennt erfasst werden, ist eine getrennte Ermittlung der organischen Trockenmassen notwendig.

Jährlicher Faulgaserzeugung $Q_{FG,a} = 1.435.899 \text{ m}^3/\text{a}$

Jährlicher Primärschlammanfall $Q_{PS,a} = 68.652 \text{ m}^3/\text{a}$

Trockenrückstand des Primärschlammes (Jahresmittelwert) $TR_{PS} = 3,65 \%$

Glühverlust des Primärschlammes (Jahresmittelwert) $GV_{PS} = 74,6 \%$

(10.1)

Jährliche organische Trockenmasse im Primärschlamm:

$$B_{oTM,PS,a} = Q_{PS,a} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} = 1869 \text{ t oTM/a}$$

Jährlicher Überschussschlammanfall $Q_{ÜSS,a} = 32.530 \text{ m}^3/\text{a}$

Trockenrückstand des Überschussschlammes (Jahresmittelwert) $TR_{ÜSS} = 7,58 \%$

Glühverlust des Überschussschlammes (Jahresmittelwert) $GV_{ÜSS} = 70,4 \%$

(10.1)

Jährliche organische Trockenmasse im Überschussschlamm:

$$B_{oTM,ÜSS,a} = Q_{ÜSS,a} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS} = 1736 \text{ t oTM/a}$$

(10.2)

Summe von Primär- und Überschussschlamm:

$$B_{oTM, RoS, a} = B_{oTM, PS, a} + B_{oTM, ÜSS, a} = 1869 \text{ t oTM/a} + 1736 \text{ t oTM/a} = 3605 \text{ t oTM/a}$$

(10.3)

Spezifische Faulgasproduktion:

$$Y_{FG} = Q_{FG, a} / B_{oTM, RoS, a} = 1.435.899 \text{ m}^3 / 3605 \text{ t oTM/a} = 398 \text{ NI/kg oTM}$$

Die spezifische Faulgasproduktion liegt unter der zu erwarteten Faulgasproduktion von 440 NL/kg oTM. Der geringe Gasanfall ist jedoch auf eine Störung bei der Messung des Gasanfalls von Faulbehälter 1 zurückzuführen, die in Monaten Juni bis Oktober (siehe Abbildung 6.20) vorgelegen hat.

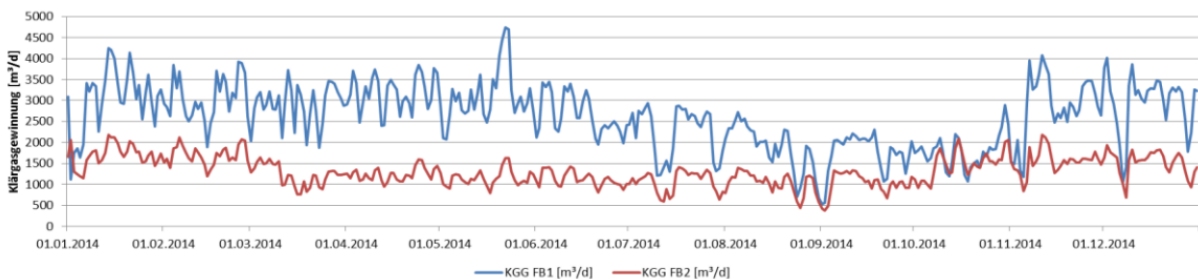


Abbildung 6.20: Faulgasanfall der Kläranlage Kaiserslautern im Jahresverlauf des Jahres 2014 (Dilly 2015)

Betrachtet man den mittleren täglichen Faulgasanfall alle Messwerte der Jahre 2014 bis 2016, liegt dieser bei 4.166 m³/d. Unter Vernachlässigung der Messwerte im Zeitraum der Messstörung im Jahr 2014, liegt der mittlere tägliche Gasanfall bei 4.322 m³/d für die Jahre 2014 bis 2016 und bei 4.460 m³/d für das Jahr 2014. Im Jahr 2014 ist daher vielmehr von einer Faulgasproduktion von rund 1,6 Millionen m³ Faulgas auszugehen. Dieser Wert wird auch durch den Verbrauch der BHKWs bestätigt.

$$Y_{FG} = Q_{FG, a} / B_{TM, RoS, a} = 1.600.000 \text{ m}^3 / 3605 \text{ t oTM/a} = 444 \text{ NI/kg oTM}$$

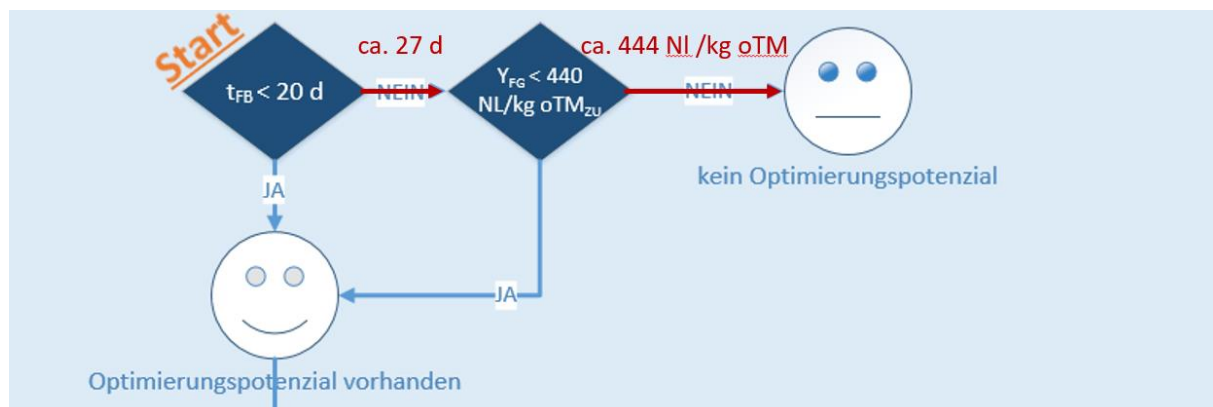


Abbildung 6.21: Anwendung der Checkliste D: Desintegration von Überschussschlamm

Eine Optimierung durch eine ÜSS-Desintegration erscheint unter der gegebenen Voraussetzung nicht notwendig. Sollte den Faulbehältern zukünftig zusätzliche Schlämme zugeführt werden (z.B. Fremdschlämme), ist mit einer Absenkung der Faulzeit zu rechnen. In diesem Fall sollte eine Desintegration des Überschussschlammes (und ggf. der Fremdschlämme) erneut in Betracht gezogen werden.

Da es sich bei der Kläranlage um eine nitrifizierende Anlage handelt, wäre dabei ein Verfahren mit hohem Energieeintrag notwendig um einen maximalen Aufschlussgrad zu erreichen.

Eine Implementierung einer Desintegration des ÜSS-Schlammes hat folgende unmittelbaren Auswirkungen auf die Verfahrenskette:

- Steigerung der Faulgasproduktion
- Verringerung der zu entsorgenden Schlammmenge
- Ggf. erhöhter Polymerbedarf bei der Schlammentwässerung
- Gesteigerter Energiebedarf durch die Desintegration
- Erhöhung der Ammonium- und Phosphorrückbelastung
- Rückbelastung durch schwer abbaubare organische Stoffe kann zu einer Erhöhung der Ablaufwerte führen

6.2.2 Checkliste E: Eindickung von Überschussschlamm

Zur Anwendung der Checkliste E (Verbesserung der Überschussschlammeindickung) wird der Feststoffgehalt nach der Voreindickung benötigt. Dieser liegt bei der Kläranlage Kaiserslautern in Mittel bei 7,5 % (siehe Abbildung 6.22) und somit im oberen Bereich der Literaturwerte von 6 bis 8% für Zentrifugen mit Fällmitteleinsatz. Wie Abbildung 6.23 zeigt, ist in diesem Fall von keinem einem Optimierungspotenzial bei der Überschussschlammeindickung auszugehen.

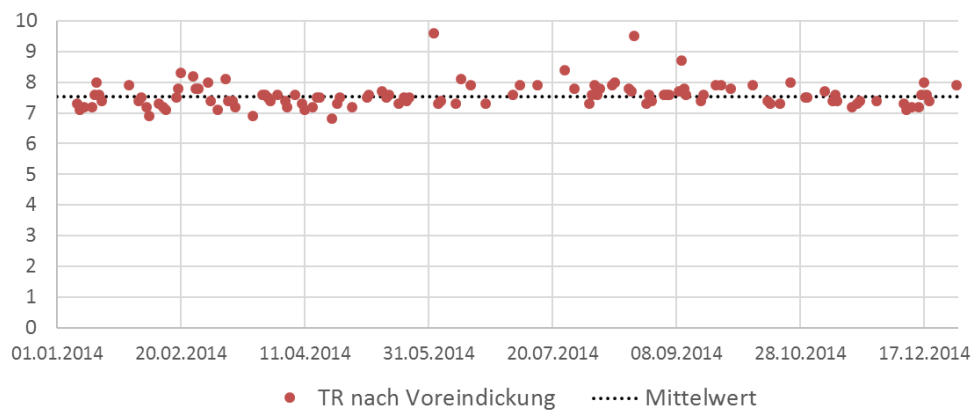


Abbildung 6.22: TR-Gehalt des Überschussschlammes nach der Voreindickung

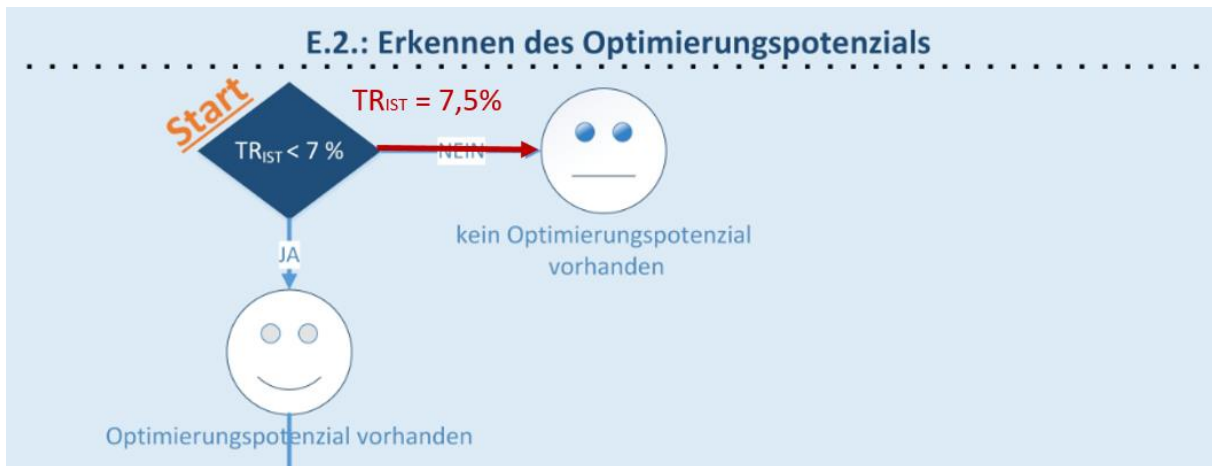


Abbildung 6.23: Anwendung der Checkliste E: Eindickung von Überschussschlamm

6.3 Kläranlage OberKyll⁹

Die betrachtete Kläranlage ist auf 18.000 Einwohnerwerte ausgelegt und derzeit mit etwa 11.000 – 12.000 EW belastet. Bei der Kläranlage handelt es sich um eine mechanisch-biologische Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung. Die Faulungsanlage weist ein sehr hohes Schlammalter in der Belebungsstufe von über 25 d auf. Auf diesen Punkt wird im Verlauf der Evaluierung der Checklisten hingewiesen.

Das Fließschema der Anlage ist Abbildung 6.24 zu entnehmen.

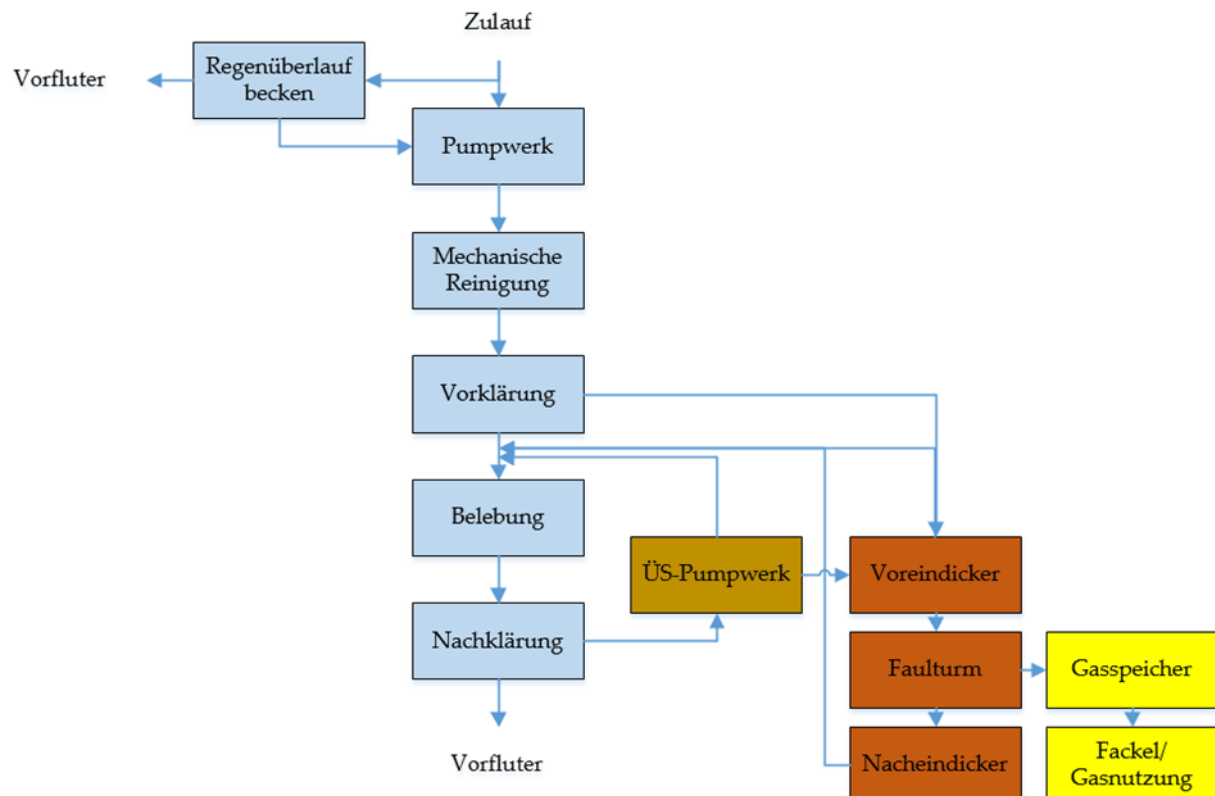


Abbildung 6.24: Vereinfachtes Verfahrensschema der KA Obere Kyll (Hien et al. 2017)

Der Schwerpunkt der Auswertung der Kläranlage Obere Kyll liegt auf der Darstellung der Auswirkungen auf die Verfahrenskette bei einer Anwendung der Checkliste A „Abscheideleistung in der Vorklärung“. Diese Checkliste zielt durch Erhöhung des Primärschlammfalls auf eine Erhöhung des Gasanfalls bei gleichzeitiger Reduzierung des Sauerstoffbedarfs in der Belebungsstufe durch Reduzierung der organischen Belastung.

⁹ Kapitel 6.3 wurde im Tagungsband der Fachtagung „Faulung optimieren & Flexibilität wagen“ veröffentlicht. Zitiervorschlag: Hien, S.; Hansen, J.; Dilly, T. C. (2017): Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammfäulung an Beispielanlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

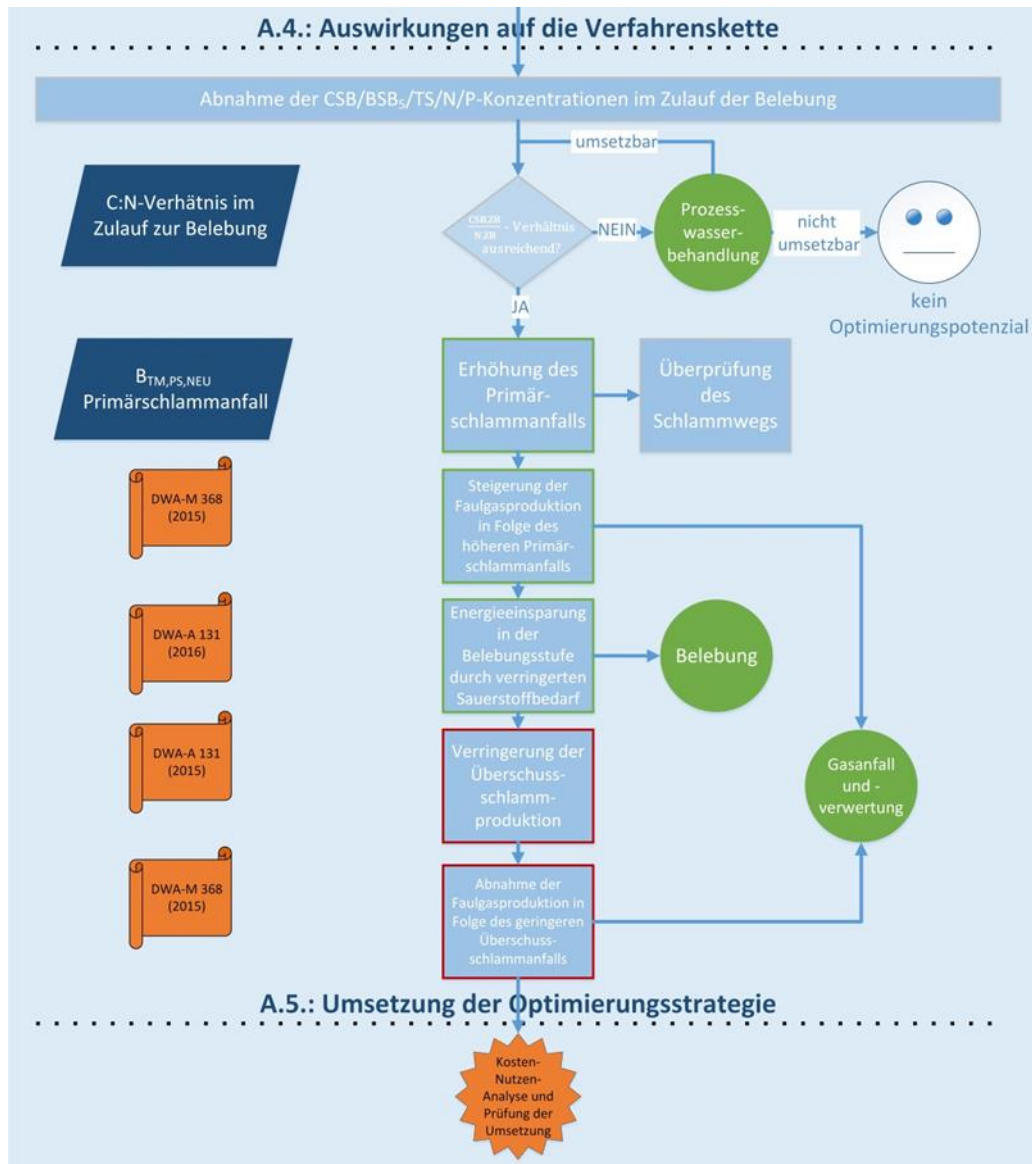


Abbildung 6.25: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette und Umsetzung der Optimierungsstrategie (siehe Abbildung 5.3, S. 41)

Wie Abbildung 6.25 zu entnehmen ist, werden in dem Abschnitt die Auswirkungen von Optimierungsstrategien im Bereich der Vorklärung beleuchtet. Diese werden hierbei bilanziell betrachtet und dabei je nach Auswirkung grün (bilanziell positiv) bzw. rot (bilanziell negativ) gefärbt. Im Folgendem werden Optimierungsstrategien inklusive ihrer Auswirkungen für verschiedene Szenarien berechnet und dabei die Punkte

- Erhöhung des Primärschlammanfalls
- Steigerung der Faulgasproduktion in Folge des höheren Primärschlammanfalls
- Energieeinsparung in der Belebung durch verringerten Sauerstoffbedarf
- Verringerung der Überschussschlammproduktion
- Abnahme der Faulgasproduktion in Folge des geringen Überschussschlammanfalls

aus Abbildung 6.25 für die aufgezeigten Optimierungsmöglichkeiten beurteilt. Bei der Auswertung wird hierbei nicht mehr die gesamte Anwendung des Flussdiagramms gezeigt, sondern sich auf die Darstellung der Resultate konzentriert.

Zur Anwendung der Checkliste A (siehe Abbildung 5.1, S.35) werden folgende Eingangswerte benötigt:

- $b_{TM,E,PS,d}$: täglicher Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall
- t_{VK} : Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei Trockenwetter

Die Kläranlage weist mit ca. 16 g TM/(E·d) einen sehr geringen einwohnerspezifischen Primärschlammanfall auf. Die durchschnittliche Aufenthaltszeit in der Vorklärung bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss beträgt, wenn nur eine Straße der Vorklärung genutzt wird, circa 1,2 h. Es ist zu beachten, dass die Vorklärung nach Bedarf umfahren wird, wobei bis zu 1/3 des Zulaufs über einen Bypass direkt in die Belebung geleitet wird, um die Denitrifikation sicherzustellen. Zur Ableitung von Grunddaten für die anschließenden Berechnungen mittels BelebungsExpert wurden die Betriebstagebücher der Kläranlage für den Zeitraum 2014 - 2016 statistisch ausgewertet.

Die Anwendung der Checkliste auf die Kläranlage Obere Kyll ist in Abbildung 6.26 durch schwarze Pfeile hervorgehoben. Da auf der Kläranlage im Moment nur eine von zwei Vorklärungstraßen genutzt wird, steht hier zusätzliches Beckenvolumen zur Verfügung. Durch die Nutzung dieses derzeit ungenutzten Volumens kann die Aufenthaltszeit und damit die Abscheideleistung der Vorklärung, erhöht werden (Abbildung 6.26, gestrichelter Pfeil). Im vorliegenden Fall sind neben der Nutzung des vorhandenen Vorklärbeckenvolumens weitere Varianten möglich. Für den Weg des gepunkteten Pfeils werden alternative Verfahren an der fiktiven Anlage untersucht.

Zur Berechnung der jeweiligen Varianten und deren Auswirkungen wurde wie folgt vorgegangen:

Im ersten Schritt wurden die Zulaufkonzentrationen mittels der in Tabelle 3 dargestellten Abscheideleistungen abgemindert, um den Primärschlammanfall und die Konzentrationen im Zulauf der Belebung abzuschätzen.

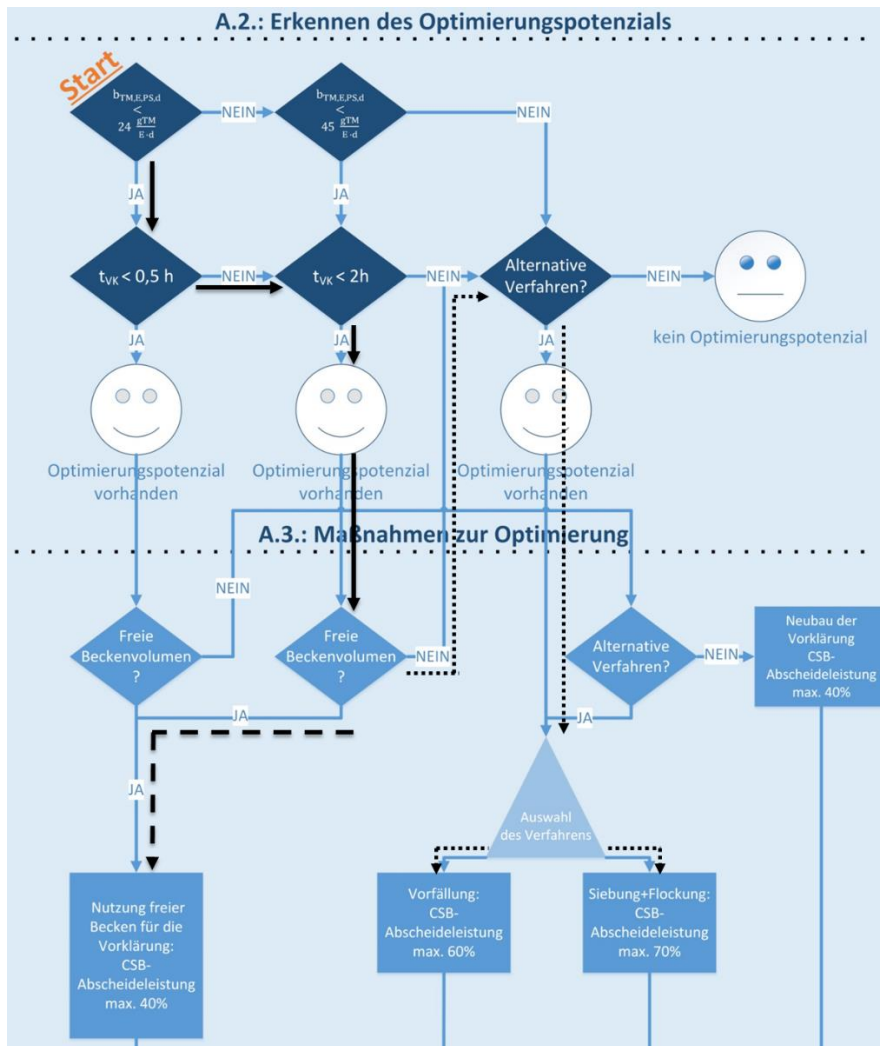


Abbildung 6.26: Darstellung der Wege zu den Optimierungsstrategien für die Beispielkläranlage (gestrichelter Pfeil) und fiktive Kläranlage (gepunkteter Pfeil)

Hieraus ergeben sich für die Kläranlage folgende Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens.

Tabelle 14: Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens basierend auf Tabelle 3

	Vorklämung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)		
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h	> 2,5 h
$C_{CSB,ZB}$ [mg/L]	222	206	190
$S_{CSB,ZB}$ [mg/L]	104	111	107
$S_{BSB,ZB}$ [mg/L]	92	80	74
$X_{TS,ZB}$ [mg/L]	92	74	65
$C_{TKN,ZB}$ [mg/L]	20	20	20
$S_{NH4,ZB}$ [mg/L]	15	15	15
$S_{NO3,ZB}$ [mg/L]	0	0	0
$C_{P,ZB}$ [mg/L]	3.2	3.2	3.2

$C_{CSB,ZB}$: Chemischer Sauerstoffbedarf; $S_{CSB,ZB}$: Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf; $S_{BSB,ZB}$: Biochemischer Sauerstoffbedarf; $X_{TS,ZB}$: Abfiltrierbare Stoffe (0,45 μ m); $C_{TKN,ZB}$: Kjeldahl-Stickstoff; $S_{NH4,ZB}$: Ammoniumstickstoff; $S_{NO3,ZB}$: Nitratstickstoff; $C_{P,ZB}$: Gesamt-Phosphor

Die so ermittelten Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens wurden anschließend mit BelebungsExpert 2.0 ausgewertet, um die Überschussschlammproduktion sowie den Sauerstoffbedarf in der Belebung zu ermitteln. Aus den ermittelten Daten wird angelehnt an das Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) mit Tabelle 15 die zu erwartende Faulgasproduktion bestimmt.

Tabelle 15: Gasertrag der Schlämme im Jahresmittel bei einem technischen Abbaugrad der leicht abbaubaren organischen Trockenmasse von $\eta_{abb} = 85\%$ (nach DWA 2014))

Schlammart	Gasertrag(m ³ i. N./kgo _{TM_{zu}})
Primärschlamm (PS)	0,57
Überschussschlamm (ÜSS)	0,33
Rohschlamm (RoS)	0,44

o_{TM_{zu}}: zugeführte organische Trockenmasse

Für die Auswertung der Varianten werden anschließend die einwohnerspezifische Primärschlammproduktion ($b_{TM,E,PS,d}$), die einwohnerspezifische Überschlammproduktion ($b_{TM,E,ÜSS,d}$) als Anhaltspunkt für den erforderlichen Energiebedarf in der Belebung der tägliche Sauerstoffbedarf (OV_d) und – zur Beurteilung der möglichen Energieeigenproduktion – der einwohnerspezifische Faulgasanfall (e_{FG}) herangezogen und gegenübergestellt.

6.3.1 Variante 1: Ausgangsszenario 0,75 – 1 h Aufenthaltszeit

Im ersten Schritt der Optimierung wird die gesamte der Kläranlage zufließende Abwassermenge über die Vorklärung geleitet. Hierdurch ergibt sich eine Erhöhung der spezifischen Primärschlammmanfalls ($b_{TM,E,PS,d}$) auf 22 g_{TM}/(E·d) bei gleichzeitig verminderter Aufenthaltszeit in der VK auf ca. eine Stunde. Die Überschussschlammproduktion ($b_{TM,E,ÜSS,d}$) beträgt dann 22 g_{TM}/(E·d), der Sauerstoffbedarf (OV_d) 427 kg/d und die spezifische Faulgasproduktion (e_{FG}) 15 L/(E·d).

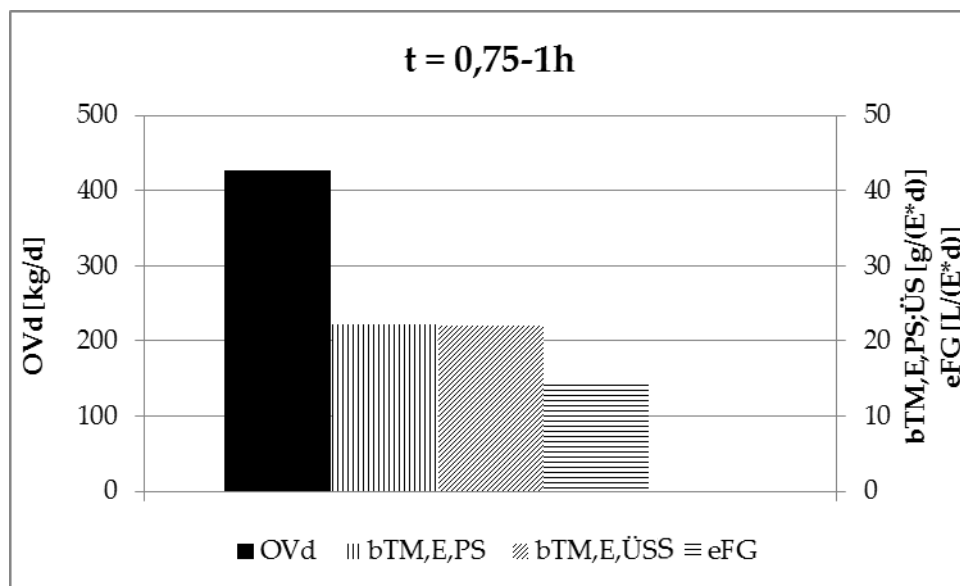


Abbildung 6.27: Ausgangsszenario mit einer Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei Trockenwetter Zufluss von 0,75 - 1h

6.3.2 Variante 2: Aufenthaltszeit auf 1,5 – 2 h erhöhen

Bei zusätzlicher Verwendung des freien Beckenvolums erhöht sich die Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf 1,5 – 2 h. Damit wird eine Erhöhung des Primärschlammmanfalls auf 27 g_{TM}/(E·d) und wie in Abbildung 6.28 dargestellt, auch eine leichte Erhöhung der spezifische Faulgasproduktion (e_{FG}) auf

16 L/(E·d) erreicht. Weiterhin sinkt die Überschussschlammproduktion ($b_{TM,E,ÜSS,d}$) auf 19 $g_{TM}/(E·d)$ und demzufolge auch der Sauerstoffbedarf (OV_d) auf 426 kg/d .

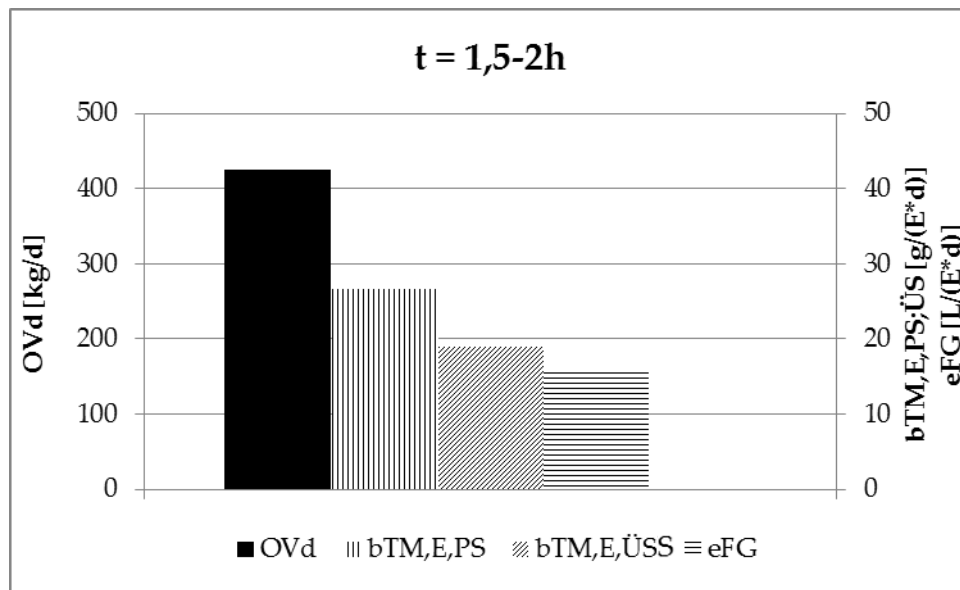


Abbildung 6.28: Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf 1,5 - 2h

6.3.3 Variante 3: Aufenthaltszeit auf über 2,5 h erhöhen

Um die maximale Ausbeute an Primärschlamm durch Sedimentation in der Vorklärung zu erreichen, kann die Aufenthaltszeit theoretisch auf über 2,5 h verlängert werden. Abbildung 6.29 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen für dieses Szenario mit einer spezifischen Primärschlammanfall und Faulgasproduktion von 29 $g_{TM}/(E·d)$ bzw. 16,4 L/(E·d). Die Überschussschlammproduktion sinkt auf 17 $g_{TM}/(E·d)$ und der Sauerstoffbedarf auf 416 kg/d .

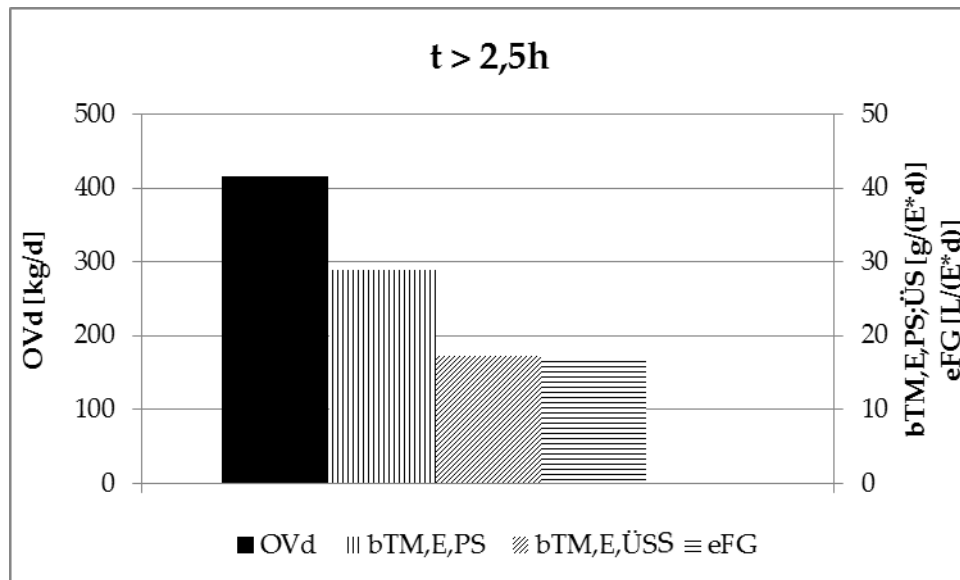


Abbildung 6.29: Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf über 2,5h

6.3.4 Vergleich der Varianten

Der Methananteil bei der anaeroben Faulung von kommunalem Mischschlamm wird im Allgemeinen mit 65 % (DWA 2014) angenommen. Bei einem Energiegehalt von Methan von circa 10 kWh/m^3 (KTBL

2013) entspricht der Energiegehalt von Faulgas etwa $6,5 \text{ kWh/m}^3$. Bei einem angenommenen elektrischen Wirkungsgrad von 33 % bei der Verwertung mittels einer Blockheizkraftwerks entstehen somit pro m^3 Faulgas $2,1 \text{ kWh}$ elektrische Energie.

Übertragen auf die verschiedenen Szenarien ergibt sich folgendes Bild (Angaben jeweils pro Tag), wobei der tägliche Gasanfall mit 11.500 E berechnet wurde:

- Variante 1: $170 \text{ m}^3 \cdot 2,1 \text{ kWh/m}^3 = 358 \text{ kWh}_{\text{el}}$
- Variante 2: $184 \text{ m}^3 \cdot 2,1 \text{ kWh/m}^3 = 386 \text{ kWh}_{\text{el}}$
- Variante 3: $190 \text{ m}^3 \cdot 2,1 \text{ kWh/m}^3 = 399 \text{ kWh}_{\text{el}}$

Insgesamt können die in Tabelle 16 dargestellten Erhöhungen bzw. Verringerungen der Variante 2 und 3 im Vergleich zum Ausgangs-Variante 1 beobachtet werden.

Tabelle 16: Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlammanfall, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zur Ausgangsvariante

	Durchflusszeit in der Vorklä rung t_{VK} bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss	
	1,5 – 2h Variante 2	> 2,5 h Variante 3
$b_{\text{TM,E,PS,d}}$	+20,0 %	+30,0 %
$b_{\text{TM,E,ÜSS,d}}$	-13.8 %	-22.0 %
e_{FG}	+8.03 %	+11.6 %
OV_d	-0.23 %	-2.58 %

Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass mit den untersuchten Maßnahmen zur Erhöhung des Primärschlammaustrags in diesem Fall eine Steigerung des Faulgasanfalls um über 10 % erzielt werden kann. Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass unter anderem durch den geringeren Eintrag von Feststoffen sowie die Reduzierung der organischen Frachten der TS-Gehalt im Belebungsbecken sinkt. Da ein Mindestwert von 2 g/L nicht unterschritten werden sollte, erhöht sich das Schlammalter in der Belebung auf 27 d. Dies bedeutet, dass hier für den Betreiber eine Anpassung des Belebungsbeckenvolumens angezeigt ist. Im Flussdiagramm wird dies durch den grünen Punkt „Belebungsbecken“ signalisiert. Hierdurch erhält der Betreiber aus der Anwendung des Flussdiagrammes die für ihn wichtige Information, vor einer Optimierung der Vorklä rung erst über Maßnahmen in der Belebungsbecken nachzudenken.

Um die Auswirkungen der aller Optimierungsmaßnahmen zur Abscheideleistung in der Vorklä rung zu untersuchen, wird in Kapitel 6.3.5 eine fiktive Referenzanlage nach DWA mit einem Schlammalter im Ausgangsszenario von 12,6 d betrachtet.

6.3.5 Betrachtung einer Anlage mit Zulaufbedingungen nach DWA

Wie bereits erwähnt, wird in diesem Abschnitt nicht mehr das gesamte Procedere dargestellt, sondern es werden hauptsächlich die Ergebnisse beleuchtet.

Tabelle 17 zeigt die berechneten Eingangswerte in BelebungsExpert 3.0 für eine Kläranlage mit typischen Zulaufkonzentrationen. Ausgangsvariante stellt die Vorklärung mit einer Aufenthaltszeit von 0,75-1,0 h dar.

Tabelle 17: Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens basierend auf Tabelle 3

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h	> 2,5 h		
$C_{CSB,ZB}$ [mg/L]	467	433	400	267	200
$S_{CSB,ZB}$ [mg/L]	218	234	226	167	175
$X_{TS,ZB}$ [mg/L]	194	156	136	78	19
$C_{TKN,ZB}$ [mg/L]	55	55	55	38	49
$S_{NH4,ZB}$ [mg/L]	41	41	41	28	37
$S_{NO3,ZB}$ [mg/L]	0	0	0	0	0
$C_{P,ZB}$ [mg/L]	9	9	9	2	2

$C_{CSB,ZB}$: Chemischer Sauerstoffbedarf; $S_{CSB,ZB}$: Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf; $X_{TS,ZB}$: Abfiltrierbare Stoffe (0,45 μ m); $C_{TKN,ZB}$: Kjeldahl-Stickstoff; $S_{NH4,ZB}$: Ammoniumstickstoff; $S_{NO3,ZB}$: Nitratstickstoff; $C_{P,ZB}$: Gesamt-Phosphor

Nach Abbildung 6.26 würde man für diese Anlage grundsätzlich bei den gleichen Optimierungsoptionen wie für die Kläranlage Obere Kyll landen. Zusätzlich zu den bereits gezeigten Optionen werden hier die alternativen Verfahren Vorklärung mit Vorfällung und Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung betrachtet für den Fall, dass keine ungenutzten Beckenvolumina zur Verfügung stehen.

Aus Abbildung 6.30 sind die resultierenden Berechnungsergebnisse für die verschiedenen Szenarien zu entnehmen. Für das Ausgangsszenario (t=0,75-1h) ergeben sich ein einwohnerspezifischer Primärschlammanfall von 35 $g_{TM}/(E \cdot d)$, eine einwohnerspezifische Überschlammproduktion von 39 $g_{TM}/(E \cdot d)$, ein Faulgasanfall von 24 L/(E·d) und ein täglicher Sauerstoffbedarf von 3.873 kg/d.

Wie zu erkennen ist, steigt die Primärschlammproduktion wie erwartet in Szenario 2 (t=1,5-2h) auf 42 $g_{TM}/(E \cdot d)$, in Szenario 3 (t>2,5h) auf 46 $g_{TM}/(E \cdot d)$, in Szenario 4 (Vorfällung) auf 56 $g_{TM}/(E \cdot d)$ und in Szenario 5 (Mikrosiebung) auf 67 $g_{TM}/(E \cdot d)$. Ebenfalls steigt der einwohnerspezifische Faulgasanfall auf 26 L/(E·d) in Szenario 2, auf 27 L/(E·d) in Szenario 3, auf 29 L/(E·d) in Szenario 4 und auf 32 L/(E·d) in Szenario 5.

Demgegenüber sinkt die Überschussschlammproduktion im Vergleich zum Ausgangspunkt (39 $g_{TM}/(E \cdot d)$) in Szenario 2 (34 $g_{TM}/(E \cdot d)$) über Szenario 3 (31 $g_{TM}/(E \cdot d)$) und Szenario 4 (22 $g_{TM}/(E \cdot d)$) bis Szenario 5 (16 $g_{TM}/(E \cdot d)$). Dementsprechend sinkt ebenfalls der Sauerstoffbedarf von 3.873 kg/d auf 3.860 kg/d in Szenario 2, auf 3.799 kg/d in Szenario 3, 2.664 kg/d in Szenario 4 steigt allerdings in Szenario 5 auf 3.066 kg/d an, da hier weniger Stickstoff in der Vorklärung abgeschieden wird als bei der Vorfällung.

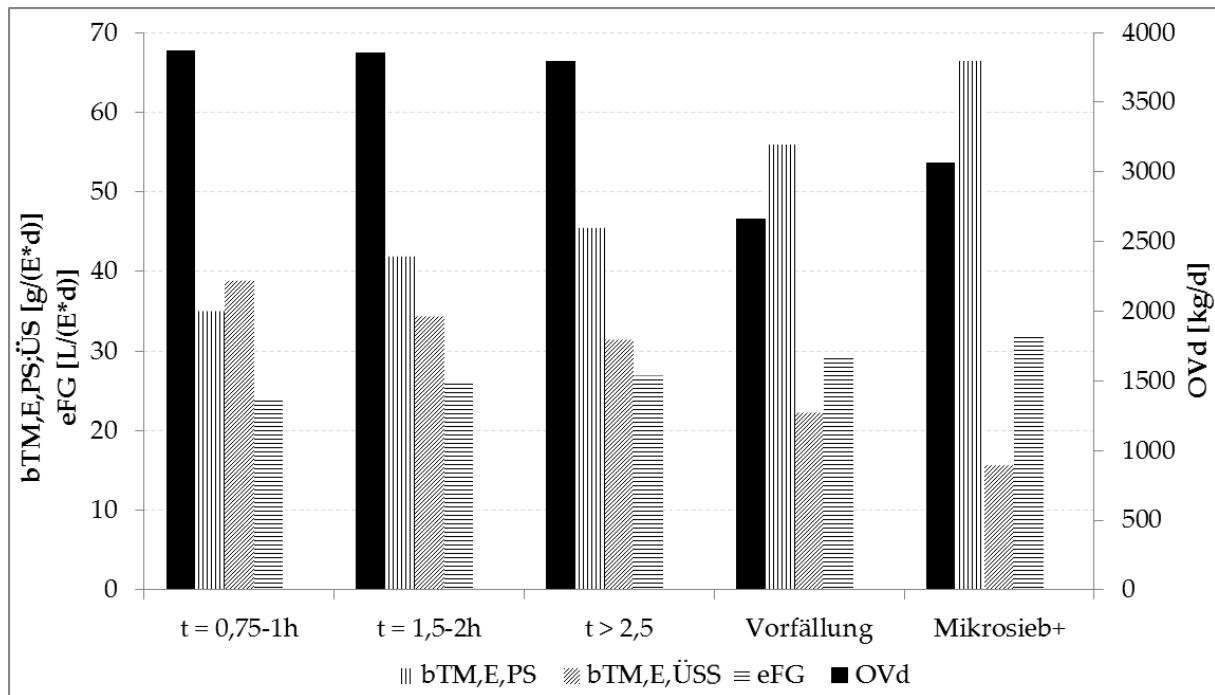


Abbildung 6.30: Ergebnisse der Anwendung des Flussdiagramms für eine 60 000 EW Abwasserreinigungsanlage nach DWA-A 131

Zu den im oberen Abschnitt erläuterten Werten stellt Tabelle 18 die prozentualen Abweichungen im Vergleich zum Ausgangsszenario dar.

Tabelle 18: Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlamm-, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zum Ausgangsszenario

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)		Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h		
b _{TM,E,PS,d}	+20,0 %	+30,0 %	+60,0 %	+90,0 %
b _{TM,E,ÜSS,d}	-11,6 %	-19,1 %	-42,6 %	-59,6 %
e _{FG}	+7,93 %	+11,2 %	+20,8 %	+32,9 %
OV _d	-0,34 %	-1,91 %	-31,2 %	-20,8 %

Im Gegensatz zu den Berechnungen der Beispielanlage wurden hier auch die alternativen Verfahren Vorfällung und Mikrosiebung (in Kombination mit Fällung und Flockung) betrachtet, da in den Szenarien mit erhöhter Aufenthaltszeit das Schlammalter nur bis auf 15 d ansteigt. Bezogen auf den Faulgasanfall sind hier parameterspezifische Zunahmen im Wertebereich von ca. 8 – 32 % möglich. Hierbei ist zu beachten, dass das Schlammalter für Szenario 4 mit 22 d bereits relativ hoch und bei Mikrosiebung auf 31 d ansteigt. Abgesehen davon, dass in diesem Fall die biologische Stufe optimiert

werden sollte, gewinnt der Betreiber in einem solchen Fall die Information, dass weiteres Optimierungspotenzial auf seiner Anlage – hier im Bereich der Schlammbehandlung - vorhanden ist, welches erschlossen werden kann.

6.4.1.2 Schlammweg

Im Folgenden soll der Fokus jedoch auf die Schlammstrecke gelegt werden. Das Fließschema fasst wesentliche Verfahrensstufen bzw. Elemente zusammen.

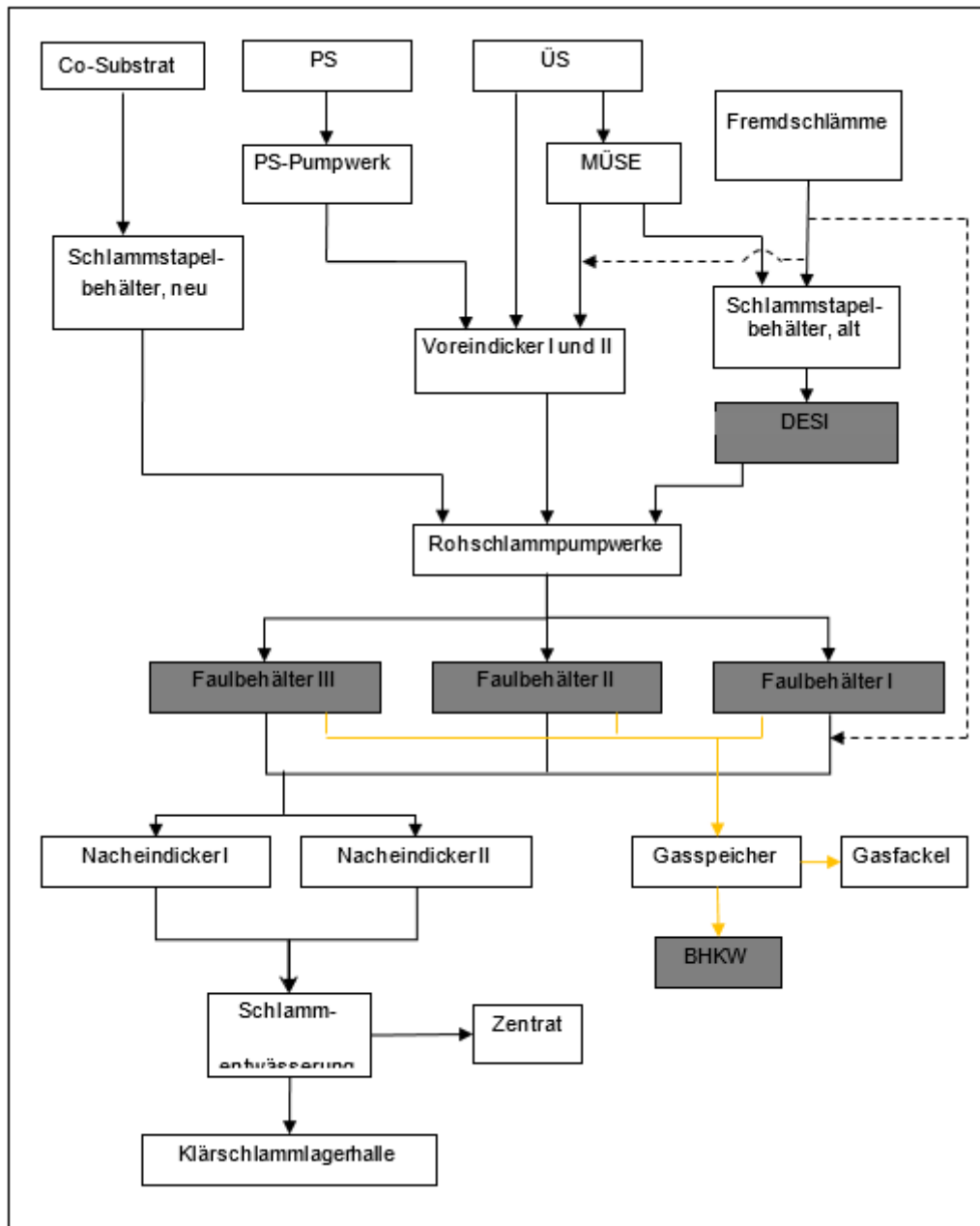


Abbildung 6.32: Fließschema und wesentliche Verfahrensstufen (Siekmann und Weisrock 2017)

Zur Abtrennung des belebten Schlammes vom gereinigten Abwasser sind 2 Nachklärbecken als horizontal durchflossene Rundbecken vorhanden. Der anfallende Überschussschlamm wird aus dem System entnommen, teilweise in die Vorklärung gefördert und teilweise maschinell eingedickt. Von hier aus wird der eingedickte Schlamm in den Schlammstapelbehälter (alt) gefördert. Über eine Ultraschalldesintegration wird der Schlamm in den Heizkreislauf der Faulbehälteranlage abgegeben.

Der aus den Vorklärbeckentrichtern abgezogene Primär- und Überschussschlamm wird zur weiteren statischen Eindickung in 2 Voreindicker gefördert, von wo aus er ebenfalls dem Heizkreislauf der Faulbehälter zugegeben wird.

Weiterhin wird Fremdschlamm eines nahegelegenen Industriebetriebes angenommen, der in die beiden Voreindicker oder in den Stapelbehälter (alt) gefördert wird. Ferner werden Co-Substrate angenommen, wobei es sich i. W. um Destillate aus Weinbaubetrieben und Fette handelt.

Zur Schlammentwässerung stehen 2 Zentrifugen zur Verfügung. Der entwässerte Schlamm wird anschließend zur Zwischenlagerung in eine Schlammhalle verbracht. Von hier aus wird der Schlamm zur weitergehenden thermischen Verwertung mittels LKW zu einer Verbrennungsanlage transportiert.

6.4.2 Checkliste A: Aufenthaltszeit in der Vorklärung

Hinsichtlich der Optimierung der Faulgasverwertung ist ein möglichst hoher Anfall an hoch kalorischem Primärschlamm wünschenswert. Dies hat wiederum – durch Beeinflussung des C:N-Verhältnisses – direkten Einfluss auf die biologische Behandlungsstufe.

Auf der KA Untere Selz existiert eine 2-straßige Vorklärung. Das Nutzvolumen der beiden Vorklärbecken beträgt jeweils 774 m³. Die resultierenden rechnerischen Aufenthaltszeiten bei Trocken- und Regenwetterzulauf sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Abwassermengen und Aufenthaltszeiten in der Vorklärung

2015	bei Regenwetterzulauf	bei Trockenwetterzulauf
Min	ca. 0,7 h	ca. 1,35
Mittel	ca. 1,75 h	ca. 2,0 h
85-Perzentil	ca. 2,2 h	ca. 2,35 h

In Kap. 7.1.3 ist am Beispiel der KA Mayen der Einsatz der entsprechenden Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ dargestellt. Im Folgenden sollen Grenzen hinsichtlich einer Erhöhung der Abscheideleistung in der Vorklärung aufgezeigt werden.

Im ATV-DVKW-A 198 werden Durchflusszeiten in der Vorklärung bei Trockenwetter ($Q_{T,2h,max}$) zwischen 0,5 und 1,0 h bzw. zwischen 1,5 und 2,0 h angegeben. Die Aufstellung zeigt, dass die Aufenthaltszeiten in der Vorklärung der Kläranlage Untere Selz mit ca. 1,35 h bis 2,35 h sehr hoch sind. Selbst bei max. Mischwasserzufluss liegt die Aufenthaltszeit immer noch bei 0,7 h.

Die vergleichsweise hohe Aufenthaltszeit wirkt sich entsprechend auf den Primärschlammfall (siehe Tabelle 20) aus.

Tabelle 20: Spezifischer Schlammanfall auf der KA Untere Selz und Referenz (DWA 2014)

	KA Untere Selz	DWA-M 368 (2014)
PS	40 g TM/(EW x d)	28 g TM/(EW x d)
ÜSS	20 g TM/(EW x d)	32 g TM/(EW x d)

Im Vergleich zu den Erwartungswerten des DWA-M 368 (DWA 2014) bestätigt sich der hohe spezifische Primärschlammanfall. Im Zulauf der biologischen Behandlungsstufe liegt demnach ein geringes C:N-Verhältnis vor, was ebenfalls durch die Filtratrückbelastung beeinflusst wird. Aus Gründen der Abwasserreinigung ist daher eine Stilllegung eines Vorklärbeckens angezeigt.

Bei der Prüfroutine „Abscheideleistung in der Vorklärung“ wird auf die Prüfung des C:N-Verhältnisses verwiesen. Dieser Fall dient als Beispiel dafür, dass trotz lobenswerter energetischer Sanierungsabsichten der Gewässerschutz als wesentliches Ziel der Abwasserreinigung stets an erster Stelle stehen muss.

6.4.3 Checkliste M: Durchmischung Faulbehälter

Die Schlammfäulung wird auf der KA Untere Selz durch 3 Faulbehälter (4.000 m³, 2.000 m³, 1.000 m³), die parallel beschickt werden, realisiert.

Die Durchmischung der Faulbehälter erfolgt jeweils durch Kombination von einer außenliegenden Umwälzung und Gaseinpressung. Gemäß Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“ werden im Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) Zielwerte einer Durchmischung von Faulräumen für verschiedene Aggregate genannt.

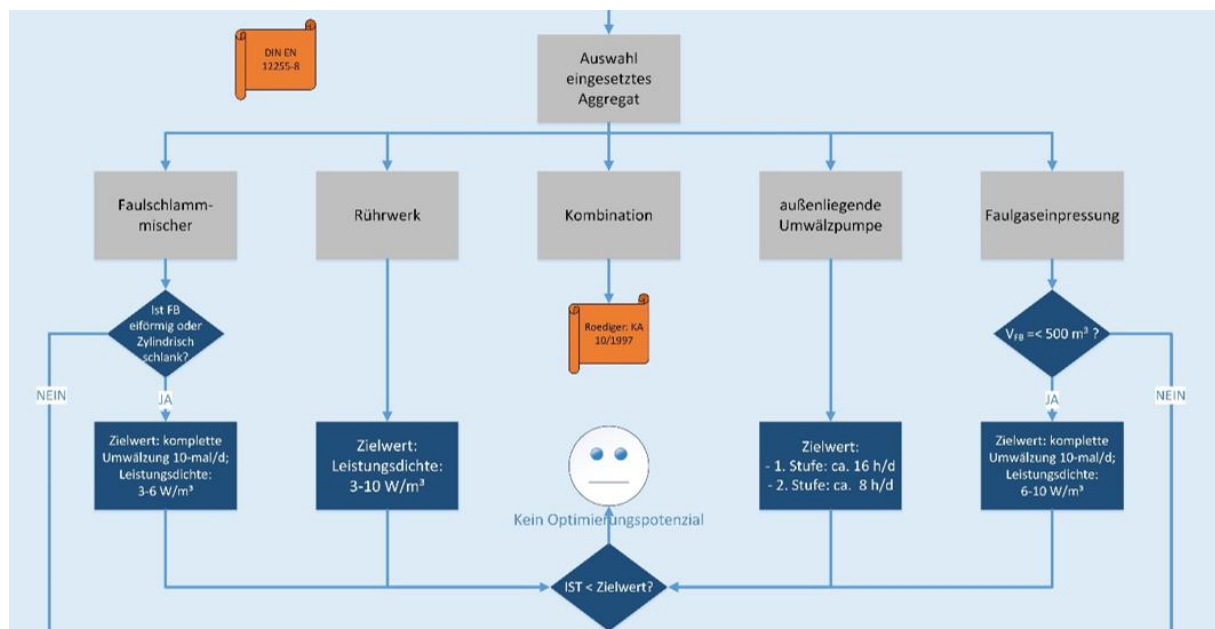


Abbildung 6.33: Auszug aus Checkliste M „Durchmischung Faulbehälter“

Hinsichtlich einer Kombination zweier Verfahren wird auf Literatur (Roediger 1997) verwiesen. Die Soll-Werte in Tabelle 21 beziehen sich auf diese Publikation. Auf der KA Untere Selz gestaltet sich die Situation wie in der folgenden Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Umwälzung und Gaseinpressung – IST- und Soll-Werte

	Umwälzung d ⁻¹		Gaseinpressung	
	IST	SOLL	IST	SOLL
Faulbehälter 1 (2.000 m ³)	ca. 1,5	4 bis 5	0,5-1 h/d	8 bis 12 h/d
Faulbehälter 2 (1.000 m ³)	ca. 3		0,5-1 h/d	
Faulbehälter 3 (4.000 m ³)	ca. 1		0,5-1 h/d	

Es zeigt sich, dass die Zielwerte vom Status Quo abweichen und hier folglich ein Optimierungspotential festgestellt werden kann.

Gemäß Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“ sollten geeignete Anpassungsmaßnahmen auf Umsetzung geprüft werden, da hierdurch

- ein erhöhter Abbaugrad der Organik
- ein höhere Faulgasanfall
- und eine geringere, zu entsorgende Klärschlammmenge (nach der Entwässerung)

zu erwarten sind.

Die folgende Abbildung verdeutlicht im Sinne einer kontinuierlichen Bereitstellung von Faulgas für nachgeschaltete Verbraucher weiteres Optimierungspotenzial.

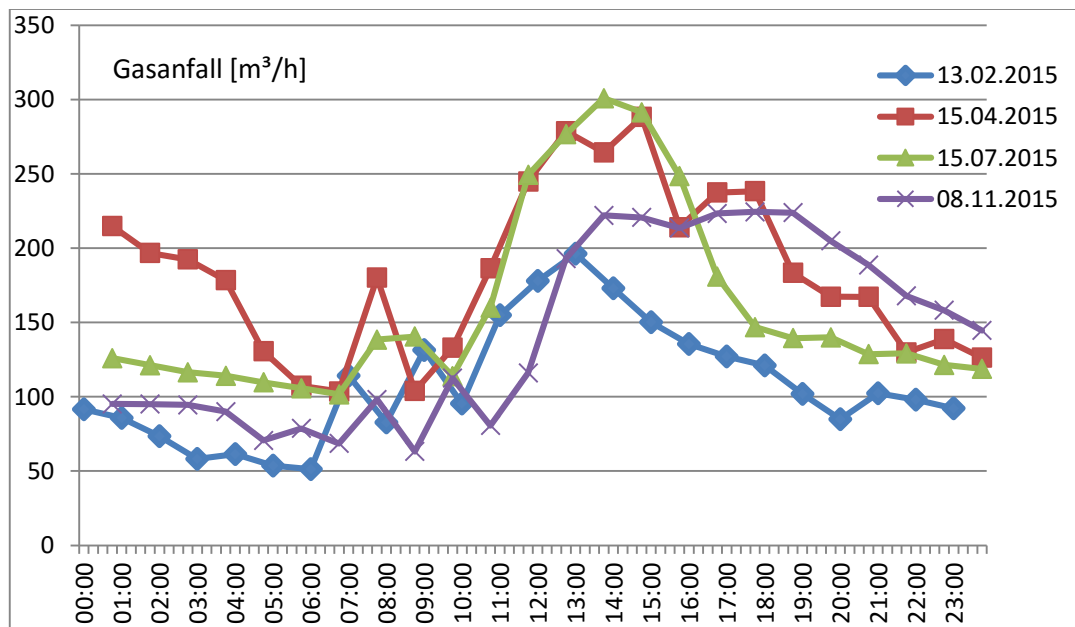


Abbildung 6.34: Tagesgang des Faulgasanfalls für ausgewählte Tage

Dargestellt ist der Tagesgang des Faulgasanfalls. Bei Spitzen zur Mittagszeit mit rd. 300 m³/h liegt der Faulgasanfall in den Abend- und Nachstunden nur in einer Größenordnung von rd. 50-150 m³/h. Der

Verlauf lässt darauf schließen, dass die Beschickung der Faulung nicht kontinuierlich, sondern stoßweise erfolgt.

6.4.4 Checkliste S: Gasspeicher

Für den reibungslosen Betrieb und die weitestgehend energetische Nutzung des Faulgases sollte ein ausreichendes Gasspeichervolumen vorhanden sein. Gute Ergebnisse lassen sich dabei gemäß Checkliste „Gasspeicher“ realisieren, wenn das Speichervolumen ca. 50 % des mittleren täglichen Gasanfalls beträgt. Im vorliegenden Fall wären das rd.

$$3.500 \text{ m}^3/\text{d} \times 0,5 = 1.700 \text{ m}^3$$

Auf der Kläranlage ist ein Niederdruckgasspeicher vom Fabrikat Eisenbau Heilbronn mit einem Volumen von 800 m³ vorhanden. Das entspricht demnach nur rd. 50% des empfohlenen Volumens. Demnach liegt hier ebenfalls ein Optimierungspotential vor.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Projekt ZEBRAS werden die Potenziale bestehender Faulungsanlagen bei der Optimierung von Verfahrensschritten der Abwasserreinigung, Schlammfäulung und Faulgasverwertung verdeutlicht.

Die Potenzialabschätzung zeigt, dass die Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen in RLP deutlich gesteigert werden kann. Das größte Potenzial liegt mit 8,6 GWh_{el}/a bei der Ausnutzung der freien Faulraumkapazitäten vor. Durch Repowering alter KWK-Anlagen könnte die Stromerzeugung um 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden und eine vollständige Verwertung des Klärgases zur Stromerzeugung würde theoretisch eine Steigerung der Stromerzeugung um 6,6 GWh_{el}/a ermöglichen. Für die Maßnahmen Anpassung des Schlammalters, Etablierung einer Mehrstufigen Fäulung, die Nachrüstung von KWK-Anlagen, die Reduzierung von Fackelverlusten und die Implementierung einer Klärschlamm-desintegration oder einer Vorfällung lassen sich Potenziale zwischen 0,5 und 4,4 GWh_{el}/a abschätzen.

Da sich die Maßnahme teilweise gegenseitig beeinflussen, ist die Addition aller Einzelmaßnahmen zur Ermittlung eines kumulativen Gesamtpotenzials nicht möglich. Die Eignung der Kombination von Einzelmaßnahmen ist daher im Einzelfall zu untersuchen. Bei einer Umsetzung mehrerer Maßnahmen, ist jedoch in der Regel mit einer weiteren Steigerung des Gesamtpotenzial zu rechnen.

Für die Entwicklung von Optimierungsstrategien werden die Prozessschritte der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -entsorgung zusammen betrachtet, die Abhängigkeiten zwischen den Verfahrensstufen aufgezeigt, Optimierungsansätze abgeleitet sowie Vor- und Nachteile von Maßnahmen beschrieben.

Projekterkenntnisse „Optimierung Schlammfäulung“

Bereits existierende Instrumente zur energetischen Optimierung von Abwasseranlagen, wie der Energiecheck und die Energieanalyse nach Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d), werden mit den hier entwickelten Checklisten um einen weiteren Schritt ergänzt. Mit deren Hilfe können umfangreiche Betrachtungen und Bewertungen von möglichen Optimierungspotenzialen für bestehende Faulungsanlagen durchgeführt werden. Im Rahmen der Energieanalyse wird ermöglicht, die Kläranlage im Vergleich zu anderen Anlagen einzuordnen, die Energiekenndaten mit anlagenspezifischen Idealwerten abzugleichen und ein generelles energetisches Optimierungspotenzial zu erkennen.

Die entwickelten Checklisten zeigen systematisch Ansatzpunkte zur energetischen und verfahrenstechnischen Optimierung der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung und Faulgasverwertung auf. Für Faulungsanlagen, die beim Energiecheck und der Energieanalyse bereits sehr gut abschneiden, bieten die entwickelten Checklisten die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen, da auch Umstellungen der Verfahrensführung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden.

Die erzielten Ergebnisse stellen eine gute Grundlage zur Umsetzung einer zukunftsfähigen Gestaltung der Schlammbehandlung und -entsorgung sowie Faulgasverwertung dar, womit eine konsequente Fortschreibung des in Rheinland-Pfalz eingeschlagenen Weges erfolgt, eine nachhaltige und energieeffiziente Abwasserbehandlung weiter voranzutreiben. Die rheinland-pfälzischen Projekte zur „Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen“, zu "Semizentralen Schlammbehandlungszentren - SBC" und zur "Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung und der abwassertechnischen Situation - NAWaS" werden durch die Projektergebnisse erweitert und ergänzt und die im Projekt entwickelten Ideen befördern eine nachhaltige

Entwicklung in der Wasserwirtschaft. Zudem ergeben sich durch die Analyse der Faulungsanlagen mit einem Schwerpunkt auf der Schlammbehandlung und -verwertung Synergieeffekte mit dem Kooperationsprojekt „Regionale Klärschlammstrategien für Rheinland-Pfalz.“

Die im Projekt erarbeiteten Checklisten und Ergebnisse werden den Kläranlagenbetreibern und Planungsbüros zur Anwendung zur Verfügung gestellt. Die Checklisten und der Datenkatalog stehen auf der Homepage Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten zum Download bereit (<https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1129/>). Fragen zur Anwendung der Checklisten können direkt an die Projektbeteiligten gestellt werden.

Ausblick „Digitalisierung der Checklisten“

Als Ansatz zur besseren Verbreitung der Projektergebnisse könnte eine Digitalisierung der Checklisten dienen. Anwender würden dabei automatisiert durch ein Optimierungstool geführt, um die Checklisten Schritt für Schritt abarbeiten zu können. Die Darstellung der teilweise sehr großen Checklisten wäre somit nutzerfreundlicher realisierbar, die logischen Verknüpfungen wären einfacher zu visualisieren und eine einheitliche Grundlagendatenermittlung wäre gewährleistet. Es ist absehbar, dass zukünftig Monitoring-Tools den Kläranlagenbetreiber auch bei der Planung von Anpassungen und Zieldefinierung bei der Implementierung neuer Anlagenkonzepte und -teile unterstützen. Die fortschreitende Digitalisierung ermöglicht zukünftig über eine Kenndatenermittlung ein direktes Benchmarking der Kläranlagen untereinander, was wiederum deutliche Vorteile für ein internes Controlling mit sich führen wird. Eine digitale Austauschplattform, die über die Informationen der Kläranlagennachbarschaften hinausgeht, erscheint daher sinnvoll.

Ausblick „Verfahrenstechnische Weiterentwicklung“

Obwohl die im Projekt entwickelten Checklisten die verfahrenstechnischen Auswirkungen durch die Implementierung innovativer Maßnahmen (z.B. Desintegration, Mikrosiebung, Vorfällung, etc.) bei bestehenden Anlagen berücksichtigen, muss festgestellt werden, dass die Anwendbarkeit der Checklisten begrenzt ist. Neue Verfahren, die eine komplette Umstellung der bestehenden Anlage erfordern würden, lassen sich mithilfe der Checklisten nicht in Gänze darstellen und bewerten. Vor allem die Ausschleusung von Kohlenstoff aus der mechanischen Reinigungsstufe hat sehr große Vorteile für die Faulgasproduktion, beeinflusst die nachfolgende biologische Abwasserreinigungsstufe jedoch so stark, sodass hier über alternative Verfahren der biologischen Abwasserreinigung und maßgeblich der Stickstoffelimination nachzudenken ist. So könnten Forschungen zur Deammonifikation im Hauptstrom in Kombination mit einer optimierten Primärschlammabtrennung oder zu Verfahren mit einer hochbelasteten ersten biologischen Stufe zukünftig zu einer weiteren Optimierung des Energiebedarfs und der Energieerzeugung beitragen. Daher wird auch ein deutlicher Forschungsbedarf bei der Ausschleusung von Kohlenstoff in der Vorklärung (z.B. durch eine Vorfällung) gesehen, da in der Praxis dieser Ansatz bisher kaum Anwendung gefunden hat und praxisrelevante Kenngrößen noch nicht vorliegen. Gleiches gilt für die Prozesswasserbehandlung. Durch eine gezielte Prozesswasserbehandlung bei Faulungsanlagen ist eine deutliche Entlastung der Hauptstrombiologie zu erwarten, womit eine Energieeinsparung einhergeht. Inwieweit dies zu einer Transformation des Abwasserreinigungsprozesses bei kleineren und mittleren Faulungsanlagen und bei Schlammbehandlungszentren führen kann, ist noch schwer abschätzbar. Zukünftige Forschungsprojekte sollten demnach sehr eng an konkrete Umsetzungsbeispiele angegliedert sein, um die Übertragbarkeit der Maßnahme im Detail auf andere Kläranlage gewährleisten zu können.

Ausblick „Wärmemanagement“

Abgesehen von elektrischer Energie wird bei Faulungsanlagen immer auch thermische Energie erzeugt. Die Checklisten „Wärmemanagement“ und „Faulbehälter als Wärmespeicher“ zeigen anschaulich, wie Wärmepotenziale auf Faulungsanlagen gezielt genutzt werden können. Vor allem wenn thermische Desintegrationsverfahren, thermische Klärschlammverwertungsverfahren oder externe Wärmeabnehmer zu berücksichtigen sind, ist die Erstellung eines detaillierten Wärmekonzeptes angebracht. Es ist festzustellen, dass die spezifischen thermischen Energieerzeugungen bei den Kläranlagen derzeit sehr stark streuen und vor allem in Wintermonaten der Wärmebedarf teilweise mit externen Energieträgern gedeckt wird. Fragestellungen zur besseren Dämmung der Faulbehälter und deren wärmegeführte Betriebsweise wurden in diesem Forschungsprojekt nicht abschließend geklärt. Im Detail ist auch eine Nutzung von ex- und interner Überschusswärme für eine intermittierende Aufheizung der Faulbehältertemperatur bzw. eine Wärmeabgabe an externe Abnehmer bei gleichzeitiger Abkühlung denkbar. Änderungen der Faulbehältertemperaturen haben jedoch immer einen direkten Einfluss auf den Faulprozess und die Faulgasproduktion, was es hinsichtlich der Betriebsführung zu berücksichtigen gilt. Mit Hilfe von Pilotversuchen könnten die Auswirkungen dieses Konzeptes näher untersucht werden.

Ausblick „Phosphorrecycling“

Im Projekt wurde die Fragestellung des Phosphorrecyclings weitestgehend ausgeklammert. Dabei hat die Wahl des Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung tiefgreifenden Einfluss auf die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung. Nachdem inzwischen durch die Novellierung der Klärschlammverordnung die Neuordnung der Klärschlammverwertung vorerst abgeschlossen ist, ist der politische Rahmen abgesteckt, in dem nachhaltige und wirtschaftliche Konzepte für die Phosphorrückgewinnung erarbeitet werden können. Die konkurrierenden Verfahren der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche wirken in unterschiedlicher Art und Weise auf die Verfahrenskette und der Einsatz von Hilfsstoffen und Energie wird steigen. Auch hier sind Pilotprojekte wichtig, um sinnvolle Lösungsstrategie entwickeln zu können. Vor allem im ländlich geprägten Rheinland-Pfalz mit vielen kleinen und mittelgroßen Kommunen bleibt die spannende Fragestellung, wie zentrale oder dezentrale Recycling- und Verwertungskonzepte (thermisch oder landwirtschaftlich) die bestehenden Klärschlammbehandlungskonzepte beeinflussen und ob in Zukunft mit Verbundkonzepten eine ökologische und ökonomische Lösung gewährleistet werden kann.

8 Anhang

8.1 Datenkatalog

8.1.1 EW_{120} : Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht (A.1)

Um die tatsächliche Anschlussbelastung zu ermitteln wird im Einklang mit dem Arbeitsblatt DWA-A 216 (DWA 2015d) der Einwohnerwert über die mittlere tägliche CSB-Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage und die einwohnerspezifische CSB-Fracht von 120 g/(E·d) bestimmt. Die maßgebende mittlere Fracht ist auf der Basis der erhobenen CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben zu ermitteln. Dafür liegen in der Regel bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 5.001 E bis 50.000 E mindestens 24 Messwerte und bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße größer 50.000 E mindestens 52 Messwerte für das Bezugsjahr vor.

(1.1)

$$\begin{aligned} \text{CSB-Fracht} &= (\text{CSB-Zulauf-Konzentration 1 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 1 [m}^3\text{/d]} + \\ &\quad \text{CSB-Zulauf-Konzentration 2 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 2 [m}^3\text{/d]} + \\ &\quad \text{CSB-Zulauf-Konzentration 3 [mg/l]} \cdot \text{Zulaufmenge 3 [m}^3\text{/d]} + \dots) / \text{Anzahl der Messwerte} \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [kg/d]} \end{aligned}$$

(1.2)

$$\begin{aligned} \underline{EW_{120}} : \text{ Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht} &= \text{CSB-Fracht [kg/d]} / 0,12 \text{ [kg/(E·d)]} \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [E]} \end{aligned}$$

Hinweis:

Es ist zu beachten, dass keine direkte Vergleichbarkeit mit Datenquellen des DWA-Leistungsvergleichs möglich ist, da die mittleren CSB-Belastungen bei den Leistungsvergleichen aus den Jahresmittelwerten der CSB-Konzentration und der Jahresabwassermenge berechnet werden. Dadurch ergeben sich in der Regel höhere Einwohnerwerte. Aus der Schlammindickung und Schlamm Trocknung kann über Prozesswasser eine erhebliche Menge an CSB in den Zulauf eintragen werden. Die Messstelle zur Bestimmung der CSB-Zulaufkonzentration sollte daher vor der Zugabe vom Prozesswasser liegen. Ist die CSB-Rückbelastung bei der CSB-Bestimmung im Zulauf enthalten, wird empfohlen diese vor der Bestimmung der Einwohnerwerte abzuziehen. Dabei kann die Rückbelastung mit ca. 10% der CSB-Zulauffracht abgeschätzt werden (Neis et al. 1994; Cornel 1997). Dies soll jedoch nur dann erfolgen, wenn das Prozesswasser bei den 24-h Mischproben der CSB-Zulaufkonzentration enthalten ist.

(1.3)

$$\begin{aligned} \text{Einwohnerwert (ohne Prozesswasser)} &= \text{Einwohnerwert bezogen auf die CSB-Fracht} / 1,1 \\ &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [E]} \end{aligned}$$

8.1.2 $b_{TM,PS,d}$: Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall (A.1)

Zur Berechnung der durchschnittlich täglichen Primärschlamm Trockenmasse soll der mittlere Trockenrückstand des Primärschlammes aus dem Bezugsjahr herangezogen werden. Es wird empfohlen die TR-Bestimmung im Primärschlamm regelmäßig durchzuführen und dabei auch unterschiedliche Wochentage abzudecken. Als Richtwert können die Mindesthäufigkeiten zur Durchführung der 24h-Mischproben bezogen Ausbaugröße entsprechend ATV-DVWK (2001) dienen. Demnach sollte zur Erstellung einer Massebilanz der Schlammbehandlung min. zweimal pro Monat die Trockenrückstand und der Glühverluste der Schlammströme ermittelt werden.

Die Dichte des Primärschlammes kann mit 1 kg/l angenommen werden. Die mittlere tägliche Primärschlammfracht ist daher über den Mittelwert des Trockrückstandes und der jährlichen Primärschlammmenge in m³ wie folgt zu ermitteln.

(2.1)

$$\begin{aligned}
 b_{TM,PS,d} : \\
 \text{Primärschlammfracht} &= (\text{Jährlicher Primärschlammabzug [m}^3/\text{a]} \cdot 1000 / 365) \\
 &\quad \cdot \text{Mittlerer Trockenrückstand des Primärschlammes [\%]} \\
 &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [kg/d]}
 \end{aligned}$$

(2.2)

$$\begin{aligned}
 b_{TM,E,PS,d} : \\
 \text{Einwohnerspezifischer} \\
 \text{Primärschlammfall} &= 1000 \cdot (\text{Primärschlammfracht [kg/d]} / \\
 &\quad \text{Einwohnerwert bezogen auf die CSB- Fracht [E]}) \\
 &= \underline{\hspace{10em}} \text{ [g/(E·d)]}
 \end{aligned}$$

8.1.4 C:N-Verhältnis im Zulauf zur Belebung (A.4)

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Anpassung der mechanischen Abwasserreinigung:

Tabelle A gibt in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren die zu erwarteten Abscheideleistungen bzw. den Reduktionsgrad an. Mithilfe der Tabelle können somit die zu erwarteten Konzentrationen im Zulauf des Belebungsbeckens unter Verwendung der Konzentrationen im Zulauf zur Kläranlage berechnet werden.

Die C:N-Verhältnisse können demnach sowohl über die ermittelte BSB₅-oder CSB-Konzentrationen bestimmt werden.

Tabelle A: Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in %

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	25 ¹	35 ¹	40 ²	70 ⁴	75 ⁸
CSB	30 ³	35 ³	40 ³	60 ⁵	70 ⁶
TS	50 ³	60 ³	65 ³	80 ⁴	95 ⁶
N _{ges}	10 ³	10 ³	10 ³	38 ⁴	20 ⁷
P _{ges}	10 ³	10 ³	10 ³	80 ⁴	80 ⁷

¹ (ATV-DVWK 2000)

² (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997)

³ (DWA 2016)

⁴ (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999) Mittelwerte

⁵ (Pinnekamp 2017b)

⁶ (Horn et al. 2009)

⁷ (Remy et al. 2014) Mittelwert

⁸ Annahme

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Klärschlammdeintegration:

Nach Cornel (1997) beträgt die Ammonium-Rückbelastung aus der Schlammbehandlung ca. 20% im Verhältnis zur Zulauffracht und von der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 wird die Stickstoffrückbelastung mit 15 % bis 25 % bezogen auf den Gesamtstickstoff angegeben (ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 2000). Grundlage dafür sind die Auswertung von Grömping et al. (1998) zur Stickstoffrückbelastung bei 192 kommunalen Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung. Demnach beträgt die prozentuale Größenordnung für die mittlere Rückbelastung etwa 1,4 bis 1,5 g/(E·d).

Tabelle B: Erhöhung der Rückbelastung durch die Einführung einer Desintegration

	... bezogen auf die bekannte Rückbelastung	... bezogen auf die Zulaufkonzentration bzw. Zulaufkonzentration	... bezogen auf den Einwohnerwert
Thermische Verfahren Thermisch-Chemische Verfahren	25 %	5%	ca. 0,4 g/(E·d)
Verfahren mit niedrigem Energieeintrag	10 %	1%	ca. 0,15 g/(E·d)

Änderung des C/N-Verhältnisses in Folge einer Fremdschlammzugabe:

Nach Grömping et al. (1998) beträgt die Stickstoffrückbelastung bei Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung etwa 1,5 g/(E·d).

Somit kann die zusätzliche Stickstofffracht über den Einwohnerwert der angeschlossenen Satellitenanlagen berechnet werden.

(4.1)

$$\text{Zusätzlich Stickstofffracht} = \text{Einwohnerwert der Satellitenanlagen} \cdot 1,5 \text{ g/(E·d)} =$$

$$= \underline{\hspace{10em}}$$

Wir der Schlamm einer Desintegration zugeführt, ist der Wert entsprechend Tabelle B Spalte 4 anzupassen.

8.1.5 $b_{TM,PS,NEU}$: Primärschlammanfall (A.4)

Bei der Abschätzung des zukünftigen Primärschlammanfalls sollte falls möglich die derzeitige Abscheideleistung berücksichtigt werden. Laut DWA (2014) ist bei in einer herkömmlichen Vorklärung folgender Schlammanfall zu erwarten:

	Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall			TR in %
	$b_{TM,E,PS,d}$ in g/(E·d)			
Vorklärung	85-Perzentile (DWA 2014)	50-Perzentile (DWA 2014)	ZEBRAS-Medi- ane (Knerr et al. 2016)	(DWA 2014)
$t_{VK} = 0,5$ h	30	24	-	2-6
$t_{VK} = 1,0$ h	35	28	-	2-6
$t_{VK} = 2$ h	40	32	(50,8)	2-6
$t_{VK} = 2-3$ h	-	-	43	2-6
$t_{VK} = >3$ h	-	-	46	2-6

Bezogen auf die Einwohnerwerte, die aus den mittleren CSB-Fracht ermittelt wurde, muss die 85-Perzentile herangezogen werden um den Schlammanfall zu berechnen, da es sich bei dem Bezugswert von 120 g CSB/(E·d) ebenfalls um den 85-Perzentil nach ATV-DVWK (2000)

Für die Berechnung des zu erwarteten Primärschlammanfalls sollte falls möglich als Bezugsgröße der TS-Fracht im Zulauf berücksichtigt werden. Sind keine Messergebnisse bezüglich der TS-Fracht bekannt wird empfohlen mit einem TS von 70 g/(E·d) zu rechnen.

(5.1)

$$b_{TM,PS,neu} = 70 \text{ g/(E·d)} \cdot EW_{120} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(5.2)

$$Q_{PS,neu} = b_{TM,PS,neu} / TR = \underline{\hspace{2cm}}$$

8.1.6 $t_{TS,vorh.}$: Vorhandenes Schlammalter in der Belebung (B.1)

Faulungsanlagen sind anhand ihrer Anschlussbelastung in der Regel den Größenklassen 3 bis 5 zuzuordnen. Somit müssen sie Mindestanforderung bezüglich Ammoniumstickstoff einhalten und eine weitgehende Stickstoffoxidation durchführen. Bei Anlagen ab 10.000 muss zudem eine gezielte Denitrifikation erfolgen um die Nges-Grenzwerte einzuhalten. Man unterscheidet dabei folgende Bau- und Betriebsweisen, die Nitrifikation und Denitrifikation entweder räumlich oder zeitlich voneinander trennen:

- Vorgeschaltete Denitrifikation (räumliche Trennung)
- Kaskadendenitrifikation (räumliche Trennung)
- Simultane Denitrifikation (räumliche & zeitliche Trennung)
- Alternierende Denitrifikation (zeitliche Trennung)
- Intermittierende Denitrifikation (zeitliche Trennung)
- Nachgeschaltete Denitrifikation (räumliche Trennung)

Das aerobe Schlammalter errechnet sich unter Vernachlässigung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf (Annahme: $AFS_{Ablauf,Nachklärung} = 0$) aus der Schlammmenge im Belüftungsbecken dividiert durch die tägliche Schlammmentnahme.

Die benötigten Formeln zur Berechnung des vorhanden aeroben Schlammalter in der Belebung in d lautet daher wie folgt:

Bei räumlicher Trennung: (6.1)

$$\underline{t_{TS,(aerob)vorh.}} = \frac{V_N \cdot TS_{BB}}{Q_{\text{ÜS},d} \cdot TR_{\text{ÜS}} \cdot Q_{AB} \cdot TS_{AB}}$$

$$= \dots\dots\dots$$

$$= \underline{\hspace{10em}} d$$

mit V_N = Volumen für die Nitrifikation
(Volumen des belüfteten Beckens)

Bei zeitlicher Trennung: (6.2)

$$\underline{t_{TS,(aerob)vorh.}} = \frac{f \cdot V_{BB} \cdot TS_{BB}}{Q_{\text{ÜS},d} \cdot TR_{\text{ÜS}} \cdot Q_{AB} \cdot TS_{AB}}$$

$$= \dots\dots\dots$$

$$= \underline{\hspace{10em}} d$$

mit f = Faktor für anteilige Belüftungszeit
(Summe der Belüftungszeit dividiert durch 24 h/d)

(6.3) $f = \frac{t_N}{24} = \underline{\hspace{10em}}$

Das gesamte Schlammalter ermittelt sich in beiden Fällen wie folgt:

(6.4)

$$\underline{t_{TS,(gesamt)vorh.}} = \frac{\text{Belebungsbeckenvolumen} \cdot \text{Trockensubstranzgehalt im Belebungsbecken}}{\text{Mittlerer täglicher Überschussschlammabzug} \cdot \text{Trockenrückstand des Überschussschlamm}} =$$

$$= \frac{V_{BB} \cdot TS_{BB}}{Q_{\text{ÜS},d} \cdot TR_{\text{ÜS}}} = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}} d$$

8.1.7 $t_{TS,erf.}$: Erforderliches Schlammalter (B.2)

Das **erforderliche aerobe Schlammalter** ist von der Temperatur und dem Prozessfaktor abhängig.

Jahresmitteltemperatur = _____ °C

Nach Arbeitsblatt DWA-A 131 (DWA 2016) berücksichtigt der Prozessfaktor:

- Schwankungen der maximalen Wachstumsrate durch bestimmte Abwasserinhaltsstoffe
- Höhe des Überwachungswerts für den Parameter Ammoniumstickstoff
- Auswirkungen von Schwankungen der Stickstofffrachten

Hilfsweise kann für eine überschlägige Berechnung ein Prozessfaktor kann zwischen 1,5 und 2,1 gewählt werden. Dabei gilt nach Arbeitsblatt DWA-A 131 (DWA 2016):

(7.1)

$$t_{d,CSB,Z} \leq 2.400 \frac{kg}{d} (\leq 20.000 \text{ EW}): PF = 2,1$$

$$t_{d,CSB,Z} \geq 12.000 \frac{kg}{d} (\geq 100.000 \text{ EW}): PF = 1,5$$

Die Höhe des Prozessfaktors ist Abhängig von den Schwankungen der Stickstofffracht im Zulauf und Überwachungswerten des Ammoniums im Ablauf (DWA 2016):

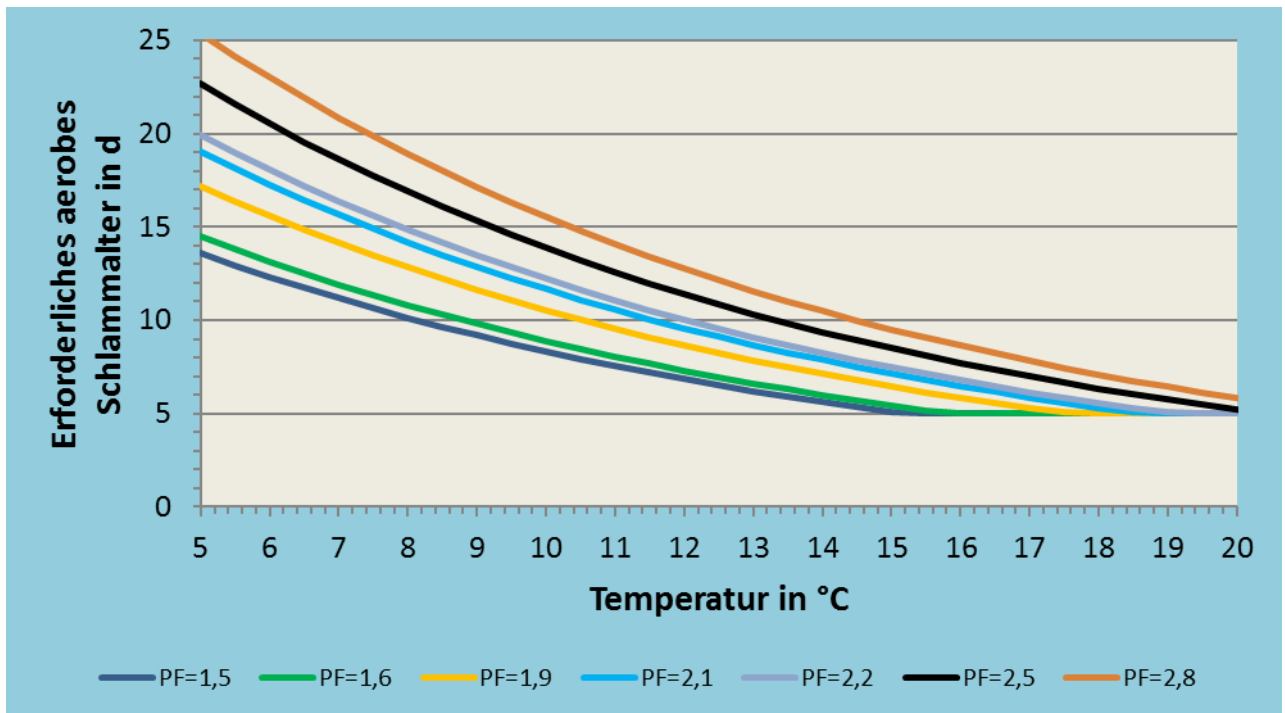
Tabelle C: Erforderlicher Prozessfaktor in Abhängigkeit des NH_4 -N-Überwachungswerts im Ablauf und der Schwankung der KN-Zulauf fracht (DWA 2016)

$S_{NH_4,üw}$	$f_N = 1,4$	$f_N = 1,6$	$f_N = 1,8$	$f_N = 2,0$	$f_N = 2,2$	$f_N = 2,4$
5 mg/l NH_4 -N	1,5	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
10 mg/l NH_4 -N	1,5	1,5	1,5	1,6	1,9	2,1

„Zwischenwerte können interpoliert werden. Die Schwankung der Stickstofffracht im Zulauf zur Belebung wird durch den Stoßfaktor f_N als die höchste täglich 2-h-KN-Fracht ($B_{2h,KN,ZB,max}$) bezogen auf die mittlere KN-Tagesfracht ($B_{2h,KN,ZB,dM}$) ausgedrückt. Der Stoßfaktor f_N ist bei bestehenden Anlagen immer messtechnisch zu ermitteln.“ (DWA 2016)

(7.2)

$$f_N = \frac{B_{2h,KN,ZB,max}}{B_{2h,KN,ZB,dM}} (-) = \underline{\hspace{2cm}}$$



Anhang Abbildung A: Erforderliches aerobes Schlammalter in d

Das **erforderliche Gesamtschlammalter** kann mithilfe des Verhältnisses von Nitrifikation und Denitrifikation ermittelt werden. Dabei gilt:

(7.3)

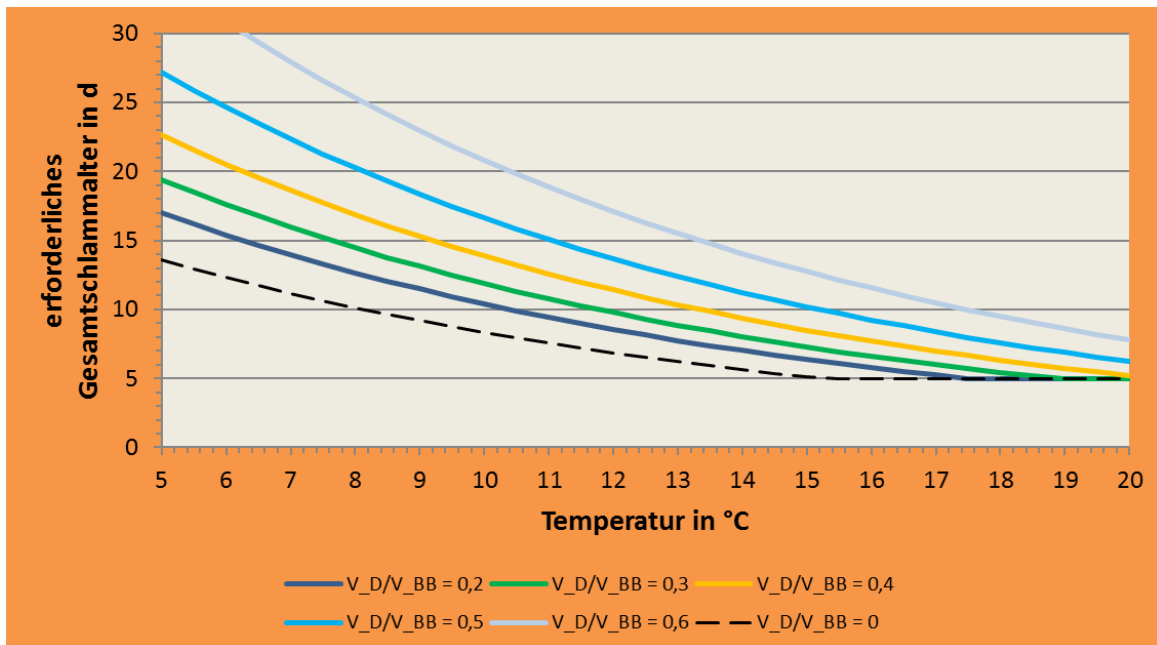
$$\frac{V_D}{V_{BB}} = t_D / (t_D + t_N) = \underline{\hspace{4cm}}$$

Das erforderliche Gesamtschlammalter kann im Jahresmittel dem Bemessungsschlammalter gleichgesetzt werden. Es berechnet sich wie folgt:

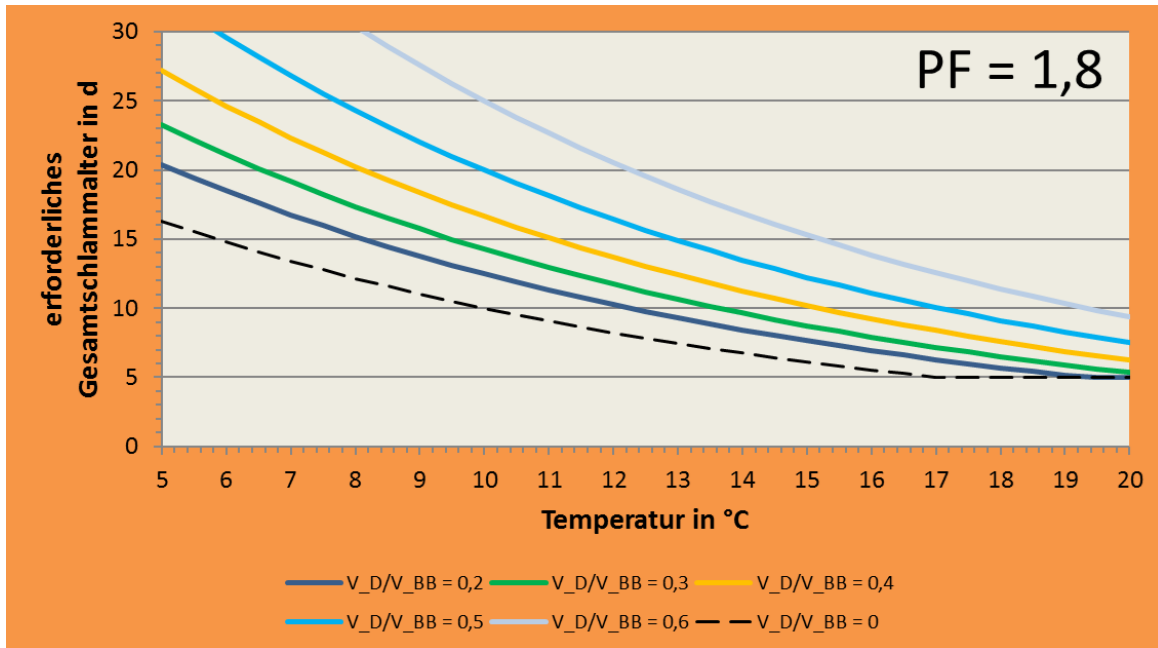
(7.4)

$$t_{TS,gesamt,erf.} = t_{aerob,erf.} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{V_D}{V_{BB}}\right)} = \underline{\hspace{4cm}} \text{ d}$$

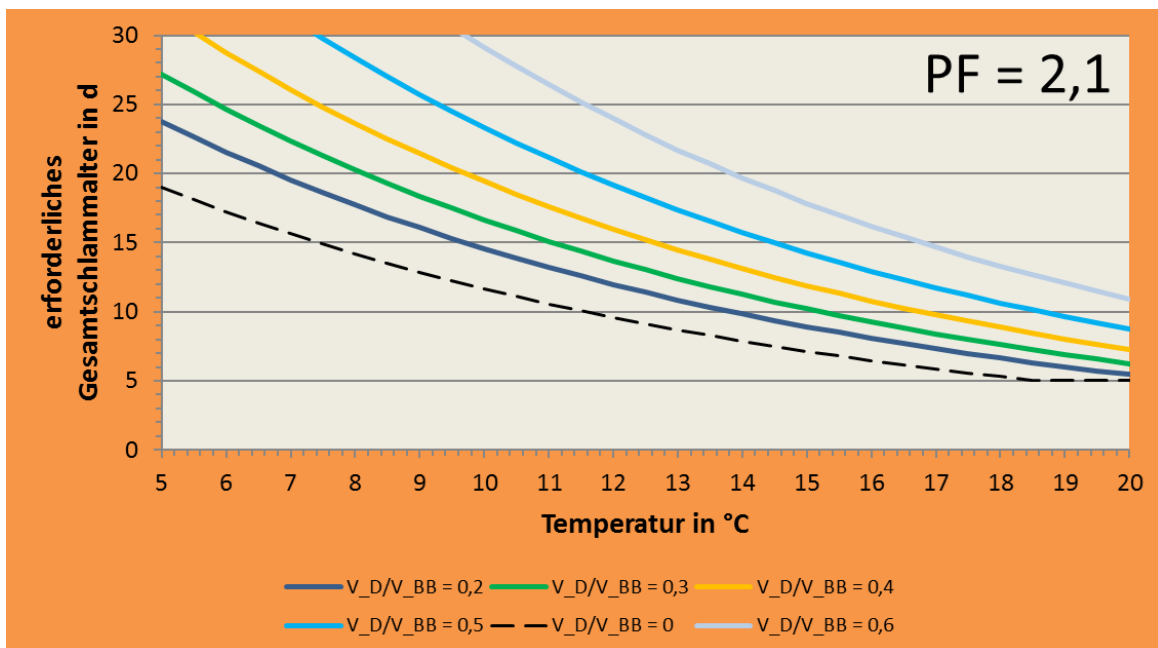
Alternativ können folgende Abbildungen verwendet werden:



Anhang Abbildung B: Erforderliches Gesamtschlammalter in d , PF = 1,5



Anhang Abbildung C: Erforderliches Gesamtschlammalter in d, PF = 1,8



Anhang Abbildung D: Erforderliches Gesamtschlammalter in d, PF = 2,1

8.1.8 Überschlägige Ermittlung des benötigten Feststoffgehalts in der Belebung (B.2)

Zur Ermittlung der BSB-Zulaufkraft können die Abscheideleistung (η_{VK}) aus Tabelle D herangezogen werden.

(8.1)

$$B_{d,BSB,ZB} = B_{d,BSB,ZU} \cdot (1 - \eta_{VK}) = \text{_____ kg/d}$$

Tabelle D: Abscheideleistungen (η_{VK}) in der Vorklärung für den BSB₅

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	0,25 ¹	0,35 ¹	0,40 ²	0,70 ⁴	0,75 ⁸

Die Schlammmasse kann unter Berücksichtigung eines spezifischen Überschussschlammanfalls infolge des Kohlenstoffabbaus berechnet werden. Dabei wird vereinfacht die Schlammproduktion aus der Phosphorelimination vernachlässigt.

(8.2)

$$\frac{B_{d,TS,ZB}}{B_{d,BSB,ZB}} = \text{_____}$$

Spezifische Schlammproduktion $\ddot{U}_{S,C,BSB}$
[kg TS/kg BSB₅] bei 10 bis 12 °C

$X_{TS,ZB} / C_{BSB}$	Schlammalter in Tagen					
	4	8	10	15	20	25
0,4	0,79	0,69	0,65	0,59	0,56	0,53
0,6	0,91	0,81	0,77	0,71	0,68	0,65
0,8	1,03	0,93	0,89	0,83	0,8	0,77
1	1,15	1,05	1,01	0,95	0,92	0,89
1,2	1,27	1,17	1,13	1,07	1,04	1,01

(8.3)

$$\ddot{U}_{d,c} = B_{d,BSB} \cdot (0,75 + 0,6 \cdot \frac{X_{TS,ZB}}{C_{BSB,ZB}} - \frac{(1 - 0,2) \cdot 0,17 \cdot 0,75 \cdot t_{TS} \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot t_{TS} \cdot F_T} \text{ [kg } \frac{TS}{d} \text{]})$$

Der Temperaturfaktor (F_T) für die endogene Veratmung lautet:

$$F_T = 1,072^{(T-15)}$$

Quelle: ATV-DWA Arbeitsblatt 131 (ATV-DVWK 2000)

Überschlägige Berechnung der erforderlichen Schlammmasse: (8.4)

$$M_{TS,BB,erf.} = B_{d,BSB,ZU} \cdot t_{TS,gesamt,erf.} \cdot \ddot{U}_{S,C,BSB} = \text{_____ kg TS}$$

Berechnung des erforderlichen TS-Gehalts im Belebungsbecken: (8.5)

$$TS_{BB} = \frac{M_{TS,BB,erf.}}{V_{BB}} = \text{_____} = \text{_____ g/l}$$

8.1.9 t_{FB} : Faulzeit (D.2/F.1)

Die Faulzeit ist definiert als Verweilzeit der Feststoffe (Schlammaufenthaltszeit) im Reaktor. In der Regel werden die kommunalen Faulbehälter bei Kläranlagen als durchflossene und vollständig durchmischte biologische Reaktoren geplant und betrieben. Daher ist die Faulzeit der hydraulischen Aufenthaltszeit gleichzusetzen. Somit lässt sich die Faulzeit als mittlere Verweilzeit, also aus der Differenz zwischen Faulbehältervolumen in m^3 und zugeführter Rohschlammmenge in m^3/d , berechnen. Diese setzt sich aus der Primär-, Überschuss- und Fremdschlammmenge zusammen:

Mittlere tägliche Rohschlammmenge =	Mittlere Primärschlammmenge + Mittlere Überschussschlammmenge (nach der Eindickung) + Mittlere Fremdschlammmenge
--	---

(9.1)

$$Q_{RoS,d,ges} = Q_{PS,d,ges} + Q_{ÜSS,d,ges} + Q_{FS,d,ges} = \underline{\hspace{10em}} m^3/d$$

Wird eine signifikante Menge Co-Substrate eingebracht, ist diese ebenfalls zu berücksichtigen.

Bei Faulbehältern, die in Reihe betrieben werden kann das Faulraumvolumen aufsummiert werden um die hydraulische Aufenthaltszeit zu berechnen (= Faulzeit).

(9.2)

$$V_{FB,ges} = V_1 + V_2 = \underline{\hspace{10em}} m^3$$

Bei parallel betriebenen Faulbehältern ist die Faulzeit für jeden Behälter einzeln zu berechnen.

(9.3)

$$Faulzeit = t_{FB} = \frac{V_{FB,ges}}{Q_{RoS,d,ges}} = \underline{\hspace{10em}} d$$

Anmerkung:

Bei Faulungen mit gezielter Biomasseanreicherung entspricht die Feststoffverweilzeit nicht der hydraulischen Aufenthaltszeit der Flüssigkeit. Die Reaktionszeit des Schlamm (=Faulzeit) berechnet sich in diesem Fall wie folgt:

(9.4)

$$t_{FB} = \frac{V_{FB} \cdot C_{TM,R}}{(Q_{ab} \cdot C_{TM,ab})} = \frac{\text{Faulbehältervolumen} \cdot \text{Trockenmasse im Faulbehälter}}{\text{Ausgetragener Faulschlamm} \cdot \text{Trockenmass des Faulschlamms}} =$$

$$= \text{-----} = \text{-----} \text{ d}$$

8.1.10 Y_{FG} : spezifische Faulgasproduktion (D.1)

Zur Berechnung der spezifischen Faulgasproduktion wird die jährlich erzeugte Faulgasmenge auf den jährlich der Faulung zugeführten Trockenmasse bezogen werden.

Jährlicher Faulgaserzeugung $Q_{FG,a} =$ _____

Jährlicher Rohschlammanfall $Q_{RoS,a} =$ _____

Trockenrückstand des Rohschlammes (Jahresmittelwert) $TR_{RoS} =$ _____ %

Glühverlust des Rohschlammes (Jahresmittelwert) $GV_{RoS} =$ _____ %

Jährliche organischer Trockenmasse im Rohschlamm:

(10.1)

$B_{oTM,RoS,a} = Q_{RoS,a} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS} =$ _____

Alternativ kann die Berechnung über die Summe von Primär- und Überschussschlamm erfolgen.

(10.2)

$B_{oTM,RoS,a} = B_{TM,PS,a} + B_{TM,ÜSS,a} =$ _____

Spezifische Faulgasproduktion:

(10.3)

$Y_{FG} = Q_{FG,a} / B_{oTM,RoS,a} =$ _____

8.1.11 η_{oTM} : Abbaugrad der organischen Feststoffe bei der Faulung (D.4)

Zur Berechnung des Abbaugrades der organischen Feststoffe ist das Verhältnis zwischen organischer Trockenmasse in Zulauf zum Faulbehälter (Rohschlamm) und der organischen Trockenmasse im Ablauf des Faulbehälters (Faulschlamm) zu bestimmen.

(11.1)

$$B_{oTM,FS,a} = Q_{FS,a} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(11.2)

$$B_{oTM,ROS,a} = Q_{ROS,a} \cdot TR_{ROS} \cdot GV_{ROS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(11.3)

$$\eta_{oTM} = 1 - \frac{B_{oTM,FS}}{B_{oTM,ROS}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

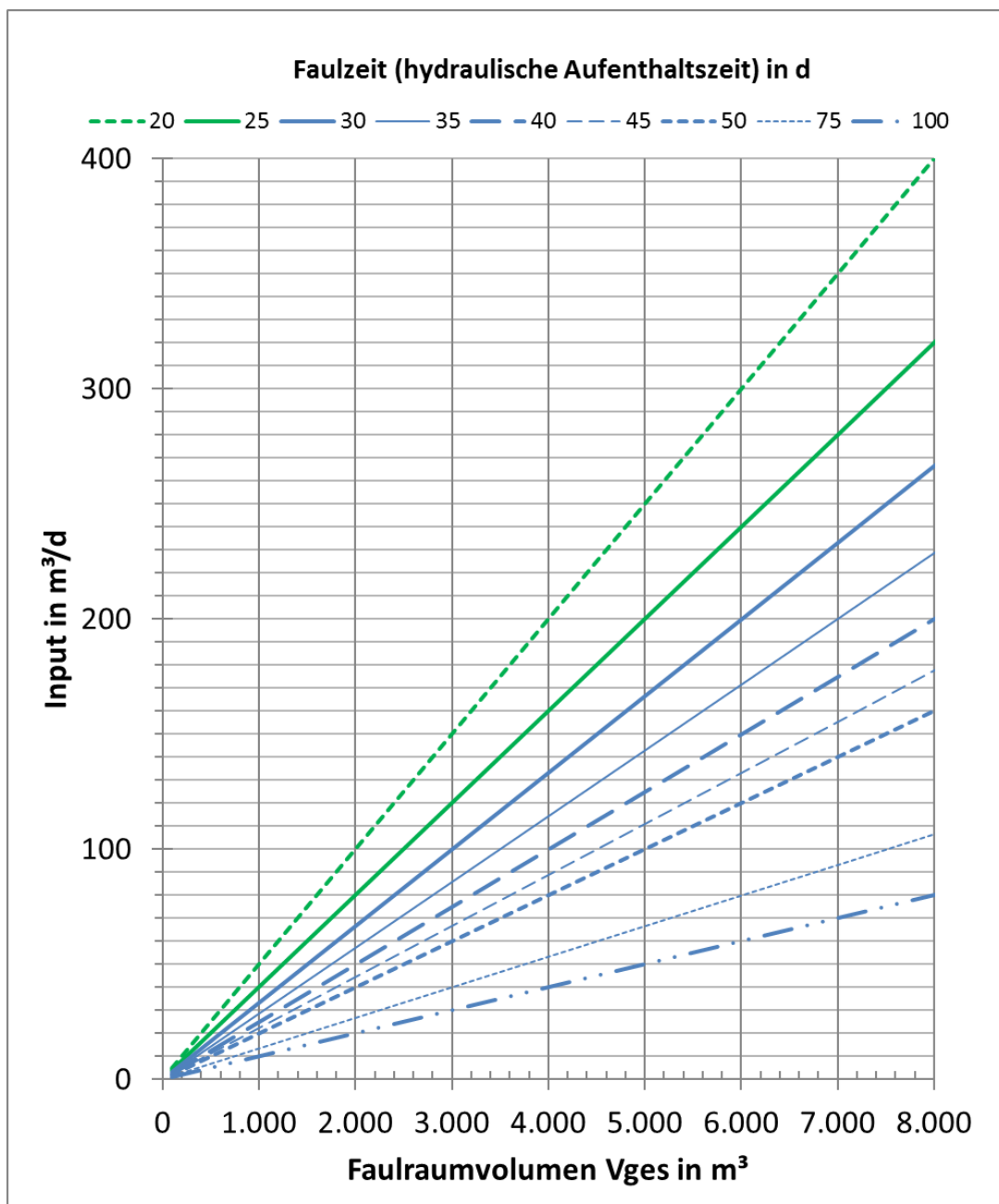
8.1.12 Bestimmung des max. Inputs zur Ausnutzung der freien Kapazitäten (F.2)

Der maximale Input zur Ausnutzung der freien Kapazitäten kann wie folgt bestimmt werden:

1. Eintragen des Faulbehältervolumens
2. Eintragen des derzeitigen Rohschlammmenge in m^3/d ($Q_{RoS,d,ges}$) als Input I ermöglicht das Ablesen der derzeitigen Faulzeit
3. Festlegung der gewünschten Faulzeit (minimale Faulzeiten beachten!)
4. Ablesen des Inputs II bei der festgelegten Faulzeit II
5. Täglich zuführbare Substratmenge in $\text{m}^3 = \text{Input II} - \text{Input I}$

(12.1)

$$\text{Input}_{\text{Substrat}} = \frac{V_{FB,ges}}{t_{gewählt}} - Q_{RoS,d,ges} = \underline{\hspace{10em}}$$



8.1.13 Bestimmung der organischen Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe (F.3)

Die organische Trockenmasse des Klärschlammes kann in leicht und schwer abbaubaren Stoffen unterteilt werden. Leicht abbaubare Stoffe werden bei kommunalen Faulungsanlagen weitgehend abgebaut. Der Abbau von schwer abbaubaren Stoffen erfolgt sehr langsam und erst bei langen Verweilzeiten im Reaktor (DWA 2014). Die Bestimmung der leicht abbaubaren organischen Stoffe erfolgt nach VID-Richtlinie 4630 durch Gärversuche. Überschlägig kann nach DWA-Merkblatt M 368 (DWA 2014) ihr Anteil bezogen auf die organische Trockenmasse wie folgt abgeschätzt werden (DWA 2014):

- Primärschlamm 70% der oTM
- Überschussschlamm 45% der oTM
- Rohschlamm 57 % der oTM

Zur Bestimmung der Schlammbelastung durch leicht abbaubare Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Primär- und Überschussschlammes mit der organischen Schlammmasse im Reaktor ins Verhältnis gesetzt. Bei zweistufigen Faulungen ist dabei lediglich das Volumen des ersten Faulbehälters heranzuziehen.

(13.1)

$$B_{L,oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Falls keine Informationen zum Primär- und Überschussschlamm vorliegen kann die Schlammbelastung alternativ über die organischen Trockenmassen des Rohschlammes berechnet werden.

(13.2)

$$B_{L,oTM,FB} = \frac{0,57 \cdot Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS}}{V_{FB} \cdot TR_{FS} \cdot GV_{FS}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Zur Bestimmung der Raumbelastung durch leicht abbaubare Stoffe wird die täglich der Faulung zugeführte organische Trockenmasse des Primär- und Überschussschlammes mit dem Reaktorvolumen ins Verhältnis gesetzt. Bei zweistufigen Faulungen ist dabei lediglich das Volumen des ersten Faulbehälters heranzuziehen.

(13.3)

$$B_{R,L,oTM,FB} = \frac{0,7 \cdot Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} + 0,45 \cdot Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS}}{V_{FB}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Falls keine Informationen zum Primär- und Überschussschlamm vorliegen kann die Raumbelastung alternativ über die organischen Trockenmassen des Rohschlammes berechnet werden.

(13.4)

$$B_{R,L,OTM,FB} = \frac{0,57 \cdot Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS}}{V_{FB}} = \underline{\hspace{10em}}$$

Tabelle E: Empfohlene Raum- und Schlammbelastung nach Merkblatt DWA-M 368 (DWA 2014) in Abhängigkeit von der Anlagengröße

Anlagengröße (EW in E)			<50.000	50.000-100.000	>100.000
organische Schlammbelastung	kg oTM_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,06	0,07	0,07
		zweistufig (erste Stufe)	0,14	0,15	0,16
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (kg oTM·d)	einstufig	0,10	0,11	0,13
		zweistufig (erste Stufe)	0,24	0,26	0,16
organische Raumbelastung	kg oTM_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	1,4	1,5	1,7
		zweistufig (erste Stufe)	3,9	4,2	4,5
durch leicht abbaubare Stoffe	kg CSB_abb/ (m ³ ·d)	einstufig	2,3	2,6	2,9
		zweistufig (erste Stufe)	6,6	7,1	7,7

8.1.14 Faulgasproduktion (G.1)**Berechnung über PS und ÜSS:****(14.1)**

$$B_{oTM,PS} =$$

$$Q_{PS,d} \cdot TR_{PS} \cdot GV_{PS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.2)

$$B_{oTM,ÜSS} =$$

$$Q_{ÜSS,d} \cdot TR_{ÜSS} \cdot GV_{ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.3)

$$B_{oTM,RoS} =$$

$$B_{oTM,PS} + B_{oTM,ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.4)

$$Q_{FG,d} =$$

$$0,57 \cdot B_{oTM,PS} + 0,33 \cdot B_{oTM,ÜSS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Berechnung über RoS:**(14.5)**

$$B_{oTM,RoS} =$$

$$Q_{RoS,d} \cdot TR_{RoS} \cdot GV_{RoS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(14.6)

$$Q_{FG,d} =$$

$$0,44 \cdot B_{oTM,RoS} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Werden Fremdschlämme angenommen, müssen diese bei der Berechnung des Faulgasanfalls mit dem jeweiligen Trockenrückstand und Glühverlust berücksichtigt werden. Ist auf der Satellitenanlage eine Vorklärung vorhanden wird ein Gemisch aus Primärschlamm und Überschussschlamm angeliefert und $x = 0,44$ einzusetzen. Wird lediglich Überschussschlamm angeliefert, ist $x = 0,33$ einzusetzen.

(14.7)

$$Q_{FG,Fremdschlamm,d} = x \cdot Q_{Fremdschlamm,d} \cdot TR_{Fremdschlamm} \cdot GV_{Fremdschlamm} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Eine zusätzlich Faulgasproduktion durch Co-Substrate ($Q_{FG,Co}$) ist ebenfalls zu berücksichtigen.

(14.8)

$$Q_{FG,d} = Q_{FG,RoS,d} + Q_{FG,Fremdschlamm,d} + Q_{FG,Co,d} = \underline{\hspace{2cm}}$$

8.1.15 Max. täglicher Gasverbrauch der KWK-Anlage (G.2)

Der maximale tägliche Gasverbrauch des BHKW ist i.d.R. bekannt. Er kann näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

(15.1)

$$Q_{V,KWK,max.} \approx \frac{\text{elektrische Nennleistung} + \text{thermische Nennleistung}}{\text{Gesamtwirkungsgrad}} \cdot \frac{1}{\text{Methangehalt} \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} \cdot 24 \text{ h/d} =$$

$$= \underline{\hspace{15em}} \text{m}^3$$

8.1.16 $\eta_{\text{KWK,el}}$, g_{CH_4} und E_{Bedarf} (G.3)

$\eta_{\text{KWK,el}}$ = elektrischer Wirkungsgrad der KWK-Anlage in % = _____%

g_{CH_4} = Methangehalt in % = _____%

Brutto-Strom-Erzeugung: (16.1)

$E_{\text{KWK,el}} = \eta_{\text{KWK,el}} \cdot 10 \text{ kWh} \cdot g_{\text{CH}_4} \cdot Q_{\text{FG,d}} = \text{_____ kWh}$

Zur Ermittlung des Energiebedarfs sind alle Verbraucher der KA zu berücksichtigen:

$E_{\text{Bedarf}} = \text{_____ kWh}$

8.1.17 Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrads:

Zur Berechnung des mittleren elektrischen Wirkungsgrades der jeweiligen Anlage wird eine Berechnung über die jährliche Stromerzeugung und den jährlichen Faulgasverbrauch der Anlage unter Verwendung des gemessenen Methangehalts vorgeschlagen.

$E_{KWK,el}$ = Jährliche Stromerzeugung der KWK-Anlage = _____ kWh

$Q_{FG,a}$ = Jährlicher Faulgasverbrauch (Messwert) = _____ m³

g_{CH_4} = Methangehalt = _____ %

(17.1)

$E_{Prim} = Q_{FG,a} \cdot g_{CH_4} \cdot 10 \text{ kWh/m}^3 = \text{_____ kWh}$

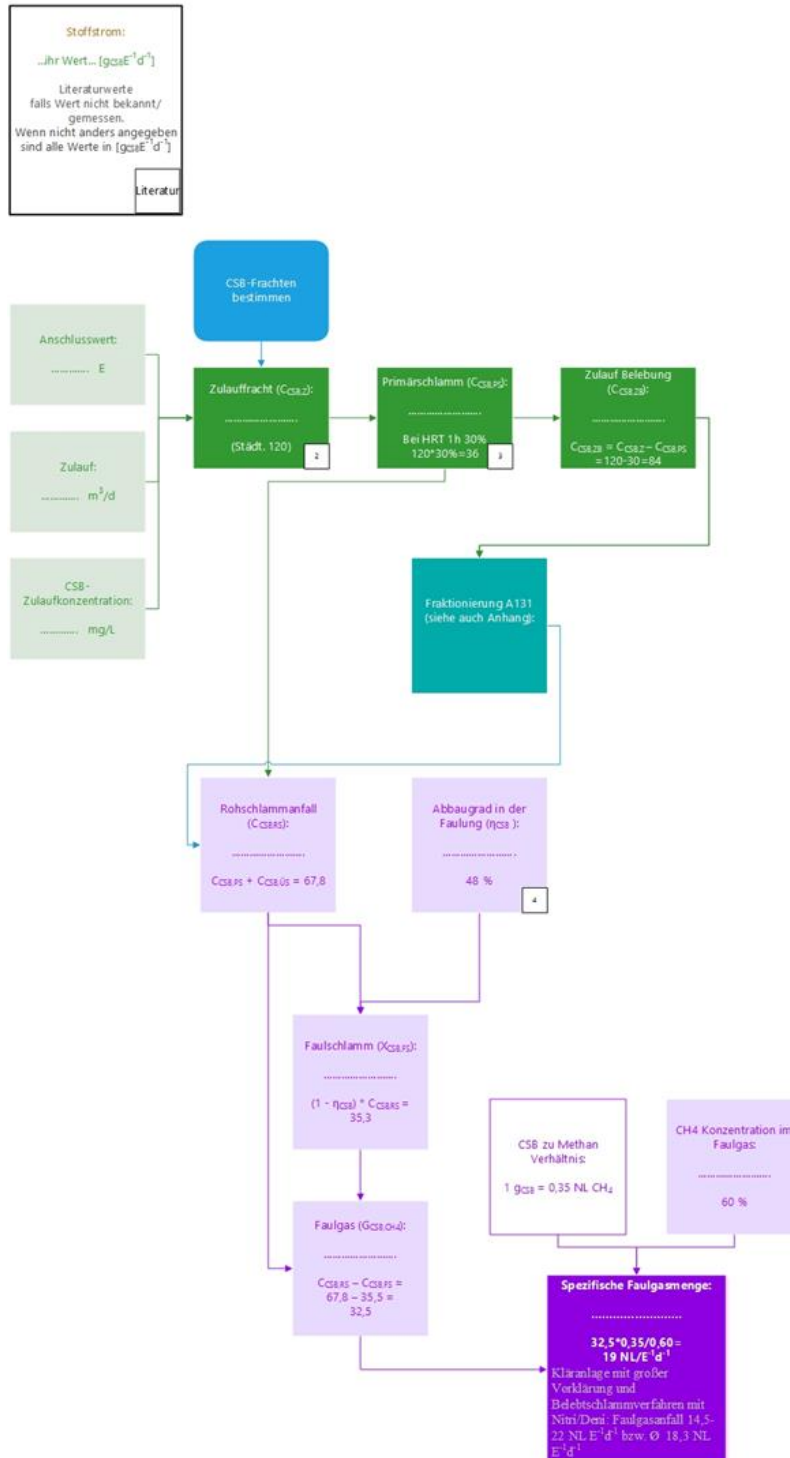
(17.2)

$\eta_{el,KWK} = \frac{E_{KWK,el}}{E_{Prim}} = \text{_____ \%}$

8.2 Faulgasanfall und CSB-Bilanz

LEGENDE:

Kurzzeichen: X = partikulär, S = gelöst, C = gesamt (partikulär + gelöst), G = Gas als CSB-Äquivalent
 Index: ZB = Zulauf Belebungsbecken, abb. = abbaubarer CSB, inert = inerter CSB,
 BM = in Biomasse eingebauter CSB, AN = Ablauf Nachklärung, CH4 = Methan



- 1: Schaum, C. (2016): Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz, Habilitation, Schriftenreihe IWAR 233, Darmstadt
- 2: ATV-DVWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DVWK A 131 – Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Hennef
- 3: Svardal, K. (2012): Die energieintensive Kläranlage, Wiener Mitteilungen, Band 226, Standortbestimmung in der Wassergütwirtschaft ÖWAV-Seminar Wien 2012, TU Wien, 28.-29. Februar 2012, Wien
- 4: Zeig, C. (2014): Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft, Dissertation, Schriftenreihe IWAR, 226
- 5: Schaum, C.; Lensch, D.; Cornel, P. (2013a): Energy Resource Sewage Sludge: The Relevance of the Heating Value and the Impact of Sludge Treatment Processes IWA Specialized Conference – Holistic Sludge Management, 06.-08. May 2013 Västerås, Schweden

8.3 Prozesswasserbehandlung: Deammonifikation

Bei Kläranlagen mit Faulung ist infolge des sehr weitgehenden Umsatzes der organischen Substanz die stoffliche Rückbelastung aus der Schlammbehandlung auf den Abwasserreinigungsprozess zum Teil erheblich. Die Abwasserreinigung erfährt generell eine Rückbelastung durch Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff. Hierbei werden vor allem aber die Prozesse der Stickstoffelimination beeinflusst. Die Stickstoffrückbelastung aus der Schlammbehandlung von kommunalen Kläranlagen wird mit ca. 1,5 g N/(E·d) bzw. 15 % bis 25 % bezogen auf den Gesamtstickstoff im Zulauf angegeben (ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 2000) und das Nährstoffverhältnis des Schlammwassers ist gekennzeichnet durch ein ungünstiges C/N-Verhältnis mit einer 10- bis 20-fach höheren Stickstoffkonzentration gegenüber dem kommunalen Abwasser (Grömping 2009). Wird im Zuge eines Klärschlammverwertungskonzeptes eine Trocknung des Schlammes auf der Kläranlage vorgesehen, wird auch der Volumenstrom der anfallenden Schlammwässer deutlich erhöht (hydraulische Rückbelastung). Generell gilt, dass durch eine weitergehende Eindickung der Schlämme und Erhöhung des Trockenrückstands die Ammoniumkonzentration im Schlammwasser erhöht wird (ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 2000). Ebenso ist bei einer Zugabe von Co-Substraten oder Fremdschlämmen mit einer deutlichen Erhöhung der stofflichen Rückbelastung zu rechnen. Durch entsprechende Verfahrensumstellungen kann daher bei einigen Kläranlagen zukünftig eine Prozesswasserbehandlung erforderlich werden, um die biologische Stufe zu entlasten. Durch den gezielten Stickstoffabbau in der Prozesswasserbehandlung und die dadurch resultierenden günstigeren C/N-Verhältnisse könnte in vielen Fällen der Primärschlammabzug erhöht, auf die Zugabe von Kohlenstoffquellen verzichtet und unter Umständen das Belebungsbeckenvolumen verkleinert werden.

In der kommunalen Abwasserbehandlung werden gelegentlich chemisch/physikalische Verfahren (z.B. Ammoniakstrippung, Struvitfällung) und bevorzugt biologische Verfahren zur Stickstoffelimination eingesetzt. Im Hauptstrom von kommunalen Kläranlagen ist in unterschiedlichen Kombinationen das bekannte Verfahren der Nitrifikation und Denitrifikation umgesetzt. Das weniger bekannte Verfahren der Nitritation und Denitritation zeichnet sich durch einen geringeren Sauerstoffbedarf und dadurch energetische Vorteile aus. Das Deammonifikationsverfahren verspricht einen noch deutlich geringeren Energie- und Kohlenstoffverbrauch, was eine technische Umsetzung dieses Verfahrens interessant macht. Die Deammonifikation besteht aus einer partiellen Nitritation und der *anaeroben Ammoniumoxidation*¹¹. Beides sind autotrophe Prozesse. In Tabelle F sind die unterschiedlichen Prozessschritte der biologischen Stickstoffelimination zusammenfassend dargestellt.

Tabelle F: Prozessschritte bei der biologischen Stickstoffelimination (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 2004)

Nitrifikation/Denitrifikation	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$	CSB/TKN: ~5,5 aerob/anoxisch
Nitritation/Denitritation	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$	CSB/TKN: ~3,6 aerob/anoxisch
Deammonifikation	$\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2$	CSB/TKN: ~0 aerob/anoxisch

¹¹ *Anaerobe Ammoniumoxidation (Anammox)* ist der feststehende Begriff für die Umsetzung von Ammonium und Nitrit zu molekularem Stickstoff unter Abwesenheit von gelösten Sauerstoff. Obwohl in der Biologie dafür der Begriff *anaerob* verwendet wird, spricht man in Siedlungswasserwirtschaft durch die Anwesenheit von Nitrit und dem dadurch vorhanden gebundenen Sauerstoff von anoxischen Milieu-Bedingungen.

Das Verfahren der Deammonifikation hat sich in der Vergangenheit bei der Prozess- bzw. Schlammwasserbehandlung etabliert (Wett et al. 2014). Die Schlammwasserbehandlung durch Deammonifikation wird meist getrennt vom Hauptstrom der Kläranlage durchgeführt, d.h. sie findet im Nebenstrom bzw. Teilstrom statt. Bei dieser Verfahrenswahl wird Belüftungsenergie eingespart und es kann auf die Zugabe externer C-Quellen in vielen Fällen verzichtet werden, was zu einer Einsparung von Betriebskosten führt (Weber und Oehlke 2009). Zur Prozesswasserbehandlung wird die Deammonifikation erfolgreich bei hohen Temperaturen um die 40°C eingesetzt. Hingegen wird die Deammonifikation im Hauptstrom bei geringeren Temperaturen derzeit hauptsächlich in Labor- und Pilotversuchen erprobt (Lackner et al. 2014). Es ist zu klären, bei welchen Abwassertemperaturen und Nährstoffverhältnissen der Prozess noch sicher beherrschbar ist, wie die Nitrifikation im Hauptstrom unterdrückt werden kann, wie hoch die Lachgasemissionen beim Verfahren sind und ob die gewünschten Ablaufkonzentrationen eingehalten werden können. Vor allem der Temperaturbereich für eine technische Nutzung im Hauptstrom ist noch nicht abschließend bestimmt (Schäpers et al. 2016).

Bei der Deammonifikation handelt es sich um ein Verfahren, welches zwei autotrophe Abbauprozesse kombiniert. Im ersten Prozessschritt wird etwa die Hälfte des Ammoniums zu Nitrit oxidiert. Dabei handelt es sich um eine partielle Nitrifikation von autotrophen, Ammonium oxidierenden Bakterien. Im zweiten Teilschritt wird das gebildete Nitrit zusammen mit dem verbliebenen Ammonium unter anoxischen Bedingungen durch Anammox-Bakterien direkt zu molekularem Stickstoff umgesetzt (Beier 2014). Diese chemolithotrophe Planctomyzeten sind ebenfalls autotroph. Bei der Deammonifikation kann fast 60% des Sauerstoffs im Vergleich zur Nitrifikation/Denitrifikation eingespart werden. Dies liegt daran, dass das benötigte Verhältnis der beiden Substrate von $\text{NO}_2\text{-N}$ zu $\text{NH}_4\text{-N}$ von 1,3 zu 1 dazu führt, dass nur 56,5% Ammonium zu Nitrit umgewandelt werden müssen und bei der Nitrifikation ohnehin lediglich 75% des Sauerstoffs, im Vergleich zur Nitrifikation benötigt wird. Dadurch ergibt sich ein theoretischer Energieverbrauch für die Elimination von Stickstoff in Höhe von etwa 0,8-1,3 kWh/kg N. Bei weniger günstigen Verhältnissen im großtechnischen Betrieb liegt der tatsächliche Energieverbrauch jedoch höher (Jardin 2012). Außerdem ist wesentlich, dass bei beiden autotrophen Reaktionsschritten der Deammonifikation der Bedarf an organischem Kohlenstoff gleich null ist. Eine vollständige Stickstoffentfernung mit Hilfe der Deammonifikation ist jedoch nicht möglich, da immer eine kleine Menge Nitrat mitproduziert wird (DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 2004).

In Rheinland-Pfalz wird dieses Konzept, eine Stickstoffelimination im Prozesswasser mithilfe der Deammonifikation durchzuführen, auf der Kläranlage Betzdorf in Wallmenroth/Muhlau umgesetzt.

9 Literaturverzeichnis

- Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hg.) (1997): ATV Handbuch: Mechanische Abwasserreinigung. Berlin: Ernst & Sohn.
- ASUE (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015.
- ATV-DVWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.
- ATV-DVWK (2001): ATV-DVWK-M 260. Erfassen, Darstellen, Auswerten und Dokumentieren der Betriebsdaten von Abwasserbehandlungsanlagen mit Hilfe der Prozessdatenverarbeitung.
- ATV-DVWK (2003): ATV-DVWK-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Ges. zur Förderung der Abwassertechnik e.V.
- ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2000): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung - Menge und Beschaffenheit der Rückläufe. In: *KA- Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 47 (8), S. 1181–1187.
- Bauerfeld, Katrin; Dockhorn, Thomas; Dichtl, Norbert (2009): Klärschlammbehandlung und -verwertung unter anderen klimatischen und sonstigen Randbedingungen. Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben. Institut für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig.
- Baumann, P.; Bosler, T.; Eschenhagen, M.; Locher, C.; Maurar, P.; Schneider, R. (2016): Grundlagen für den Betrieb von Belebungsanlagen mit gezielter Stickstoff- und Phosphorelimination. Hennef.
- Baumann, P.; Krauth; Maier, W.; Roth, M. (2008): Funktionsstörungen auf Kläranlagen. Handbuch für den Betrieb von Kläranlagen. Praxisleitfaden.
- Beier, Maike (2014): Verfahren zur Deammonifikation. In: Johannes Pinnekamp (Hg.): Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. Aachen ("Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig", 47), 24/1.
- Bischofsberger, W. (1978): Bemessung, Ausrüstung und Kosten für chemische Fällverfahren in Verbindung mit der biologischen Abwasserreinigung. In: Bayerischen Landesamt für Wasserforschung (Hg.): *Moderne Abwasserreinigungsverfahren*. München: R. Oldenbourg Verlage München Wien (Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie, 29).
- Bischofsberger, Wolfgang; Dichtl, Norbert; Rosenwinkel, Karl-Heinz; Seyfried, Carl Franz; Böhnke, Botho (2005): *Anaerobtechnik*. Berlin: Springer.
- BMU (2002): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. TA Luft.
- Bundesregierung (2004): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer. "Abwasserverordnung" in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist" (AbwV), vom 21.03.1997 (AbwV 2004).

- Bundesregierung (2012): Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305) geändert worden ist. DüMV.
- Bundesregierung (2017a): Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305). DüV.
- Bundesregierung (2017b): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge von 1974 (Bundes-Immissionsschutzgesetz). BImSchG, vom 18.07.2017 (BImSchG 2017).
- Bundesregierung (2017c): Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2018 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist. AbfKlärV.
- Cornel, P. (1997): Reduzierung der Stickstoffrückbelastung durch Schlammwasserbehandlung. In: Verein zur Förderung des Instituts WAR (Hg.): Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen. 52. Darmstädter Seminar. Bd. 102. Darmstadt, S. 149–174.
- Dilly, T. C. (2015): Entwicklung von Ansätzen zur Optimierung des Prozessschrittes der Faulung bei kommunalen Abwasserreinigungsanlagen mit getrennter anaerober Schlammbehandlung. Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft.
- DWA (2009): Merkblatt DWA-M 380. Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen.
- DWA (2010): Merkblatt DWA-M 363. Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (Hg.) (2015a): DWA-Themen T1/2015: Schlammfaulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef.
- DWA (2015b): Merkblatt DWA-M 302. Klärschlammdeintegration. Entwurf. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2015c): Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 „Statistik:“ Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen. Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 62 (1), S. 46–53.
- DWA (2015d): Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen.
- DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 (2004): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung -Verfahren zur Schlammwasserbehandlung. Unter Mitarbeit von Eva Arnold, Maike Beier, Markus Grömping, Norbert Jardin, Gerd Kolisch, Volker Kühn et al. Hg. v. DWA.

- Horn, H.; Rapp-Fiegle, S.; Günthert, W.; Holtorff, M. S.; Bischof, F.; Chwistek, M. (2009): Forschungsvorhaben "Kläranlage der Zukunft" - Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation. Schlussbericht. Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, TU München; Universität der Bundeswehr München; Fakultät Maschinenbau/ Umwelttechnik, Hochschule Amberg-Weiden.
- Hosang, Wilhelm; Bischof, W. (1998): Abwassertechnik. 11., neubearbeitete und erweiterte Auflage: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Imhoff, K.; Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung. 30. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Jakob, J.; Linder, A.; Siekmann, K. (2013): Zentralisierte Lösung mit zweistufiger Kompaktfaulung. In: *Umwelt Magazin Sonderdruck* (12).
- Jakob, J.; Siekmann, K. (2012): Energieoptimierte Klärschlammbehandlung durch Umstellung der Verfahrensführung auf der Kläranlage Linz-Unkel mittel 2-stufiger Kompaktfaulung. Thür. Online verfügbar unter <http://www.siekmann-ingenieure.de>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.
- Jardin, Norbert (2012): Energieautarkie durch die Deammonifikation von Schlammwasser aus der Entwässerung? In: Johannes Pinnekamp (Hg.): Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Bd. 45. 45. Aufl. Aachen ("Wasserwirtschaft und Energiewende"), 10/1-10-16.
- Kink, M. (2016): Feinstsiebung - die intelligentere Vorklärung. In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik Special Klärschlamm* (10), S. 13–19.
- DIN EN 12255-8:2001, 2001: Kläranlagen - Teil 8: Schlammbehandlung und -lagerung.
- Klute, R.; Mertsch, V.; Hahn, H. H. (1984): Studie zum Einsatz der weitergehenden Abwasserreinigung durch Fällung/Flockung in der Bundesrepublik Deutschland. Stand 31.12.1983. In: *KA-Korrespondenz Abwasser* 31 (808-815).
- Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Hien, S. (2016): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz. Sachstandsbericht Mai 2016. Zentrum für Innovative Abwassertechnologien; Université du Luxembourg.
- Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Schäfer, M.; Hansen, J.; Siekmann, T. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: *Wasser und Abfall* 19 (1-2), S. 40–46.
- Krieger, S.; Blank, A.; Sterr, Y. (2012): Energieautarke GKA Weilerbach. Umstellung einer aeroben Stabilisierungsanlage auf eine Hochlastfaulung. In: E. Hoffmann und J. Homa (Hg.): Zukunftsfähige Abwasser- und Schlammbehandlung. Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale. Tagungsband der 26. Karlsruher Flockungstage 2012. Karlsruhe (Bd. 143), S. 109–122.
- KTBL (2007): Faustzahlen Biogas. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

- Lackner, S.; Gilber, E. M.; Agrawal, S.; Horn, H. (2014): Einsatz der Deammonifikation im Hauptstrom als neue Möglichkeit zur Stickstoffelimination? In: H. Steinmetz und C. Meyer (Hg.): Energiepotenziale kommunaler Kläranlagen erkennen, nutzen und kritisch bewerten. 89. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium (Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 221), S. 65–77.
- Leschber, Reimar; Loll, Ulrich (1996): Klärschlamm. 4 Aufl. Berlin: Ernst & Sohn (ATV-Handbuch).
- LUBW (Hg.) (1997): Funktionsstörungen auf Kläranlagen. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- Lützner, Klaus; Huber, Anton (2004): Erneuerbare Energie und Minderung der Emission von Treibhausgasen durch moderne Verfahren der Abwasser- und Schlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen. Abschlussbericht. Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft. Online verfügbar unter <http://www.cleaner-production.de>, zuletzt aktualisiert am 12.02.2015.
- MKULNV NRW (2014): Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen. Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene Verbundstrategie. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von M. Mergelmeyer, G. Kolisch, U. Menninger, H. Steinmetz, C. Locher, J. Helmich und J. Brüggemann. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MLUV MP (2013): Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern. Unter Mitarbeit von M. Friedrich, G. Kolisch und T. Osthoff. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern. Ingenieurbüro Friedrich; Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH.
- Möller, U. (1994): Schlamm-Mengen und -Beschaffenheit. In: H. H. Hahn und R. Trauth (Hg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe (Schriftenreihe des ISWW, Bd. 71), S. 47–83.
- MUKW BW (2015): Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima, und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- MULEWF RLP (2012): Energiesituation der kommunalen Kläranlagen in Rheinland-Pfalz. Unter Mitarbeit von F. Angerbauer, R. Kunz und G. Kolisch. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz.
- Müller, E. A.; Kobel, B.; Schmid, F. et al. (2008): Handbuch Energie in ARA. Zürich.
- Neis, U.; Plaß, R.; Bode, I. (1994): Steuerung der Sekundärströme aus der Schlammbehandlung. In: H. H. Hahn und R. Trauth (Hg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe (Schriftenreihe des ISWW, Bd. 71), S. 91–102.
- Pinnekamp, J. (2017a): Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. 7. ERWAS-Lenkungskreissitzung, 07.02.2017.

- Pinnekamp, J. (2017b): E-Klär: Entwicklung und Integration innovativer Kläranalgentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. ERWAS-Abschlusskonferenz. Berlin, 16.05.2017.
- Poon, C. S.; Chu, C. W. (1999): The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process. In: *Chemosphere* 39 (10), S. 1573–1582.
- Remy, C.; Boulestreau, M.; Lesjean, B. (2014): Technischer Nachweis eines innovativen Konzepts für ein energie-positives Klärwerk. In: J. Pinnekamp (Hg.): 47. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. "Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig". Aachen (Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Bd. 234), S. 23.
- Roediger, Hanns; Roediger, Markus; Kapp, Helmut (1990): Anaerobe alkalische Schlammfaulung. 4. Aufl. München, Wien: Oldenbourg.
- Roediger, M. (1997): Bemessungsvorschlag für Schlammfaulungsanlagen. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* (10).
- Salomon, D.; Pyro, P. (2017): Flexibilität im Praxistest. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2015): Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in virtual power plants – a potential analysis Vol. 73, S. 87–93. Online verfügbar unter Elsevier-Verlag: DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hobus, I. (2017a): Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Taudien, Y. (2017b): Flexibilitätspotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt. Welchen Beitrag können Kläranlagen in Deutschland mit ihrer Stromproduktion leisten? Eine Bestandsaufnahme. In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik* (3), S. 8–12.
- Schäpers, D.; Grömping, M.; Montag, D.; Pinnekamp, J. (2016): Deammonifikation im Hauptstrom - Perspektiven und Ansätze. In: J. Pinnekamp (Hg.): 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft "Wasserwirtschaft 4.0". Aachen: Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V. (Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, 239), 30/1- 30/9.
- Schmitt, T. G.; Gretzschel, O.; Schäfer, M.; Hüesker, F.; Salomon, D.; Bildlingmaier, Arthur et al. (2017a): Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://erwas-arrivee.de/veroeffentlichungen/schlussbericht-arrivee/#c655176>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.

- Schmitt, T. G.; Valerius, B.; Knerr, H. (2017b): Wissenschaftliche Begleitung der Hochlastfaulung mit Nachvergärung der Kläranlage Weilerbach. Schlussbericht. im Auftrag der Verbandsgemeinde Weilerbach. tectraa- Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern. Online verfügbar unter https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/weilerbach_schlussber_2017_02_15_m.pdf.
- Siekmann, Klaus (1986): Leistungsfähigkeit des zweistufigen Schlammstabilisierungsverfahrens nach dem System Sauerstoffbegasung mit anschließender Faulung im Vergleich zur einstufigen Faulung. Dissertation. Aachen (Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, 89).
- Siekmann, T.; Miethig, S.; Schneider, J.; Jakob, J. (2016): Klärschlammverwertungskonzept für ländliche Regionen - am Beispiel des Rhein-Hunsrück-Kreises. In: *KA- Korrespondenz Abwasser* 63 (12), 1068 f.
- Siekmann, T.; Weisrock, C. (2017): Optimierung der Klärschlammbehandlung und Faulgasverwertung auf der Kläranlage "Untere Selz". In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Stadtwerke Bitburg (ohne Datum): Energieeinspar- und Optimierungsmaßnahmen Erhöhung Eigenstromerzeugung auf Faulungsanlagen. Goeblet, Bernd. Online verfügbar unter <http://www.geoportal-wasser.rlp.de/>, zuletzt geprüft am 19.03.2015.
- Stehle, R. (2016): Speicherung von Biogas. Vortrag. DWA Biogas- und Energietagen. Marburg, 2016.
- Sternad, W.; Waelkens, B.; Staudt, W.; Hanke, M. (Hg.) (2017): High Load Anaerobic Digestion On A WWTP With Seasonal Variation: First Year Of Successful Operation. SLUDGETECH, 09.-13.07.2017. Fraunhofer IGB; Verbandsgemeindewerke Edenkoben.
- Taudien, Y.; Kolisch, G. (2017): Perspektiven einer zukünftigen Klärschlamm Entsorgung aufgezeigt am Beispiel der Region Trier. Bauingenieur-Kolloquium der TU Kaiserslautern. Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH. TU Kaiserslautern alumni Bauingenieurwesen. Kaiserslautern, 18.05.2017.
- Teleman, D.; Wilderer, P. A.; Teodosiu, C.; Kötzle, T. (2004): Evaluation of physical-chemical treatment alternatives to increase removal efficiency of primary wastewater treatment. In: *Environmental Engineering and Management Journal* 3 (3), S. 265–274.
- Weber, J.; Oehlke, M. (2009): Bau einer Prozesswasserbehandlung auf der Kläranlage Heidelberg- Erste Betriebsergebnisse mit dem DEMON-Verfahren. In: Markus Grömping (Hg.): Stickstoffrückbelastung. Stand der Technik 2009. Separate Behandlung der Stickstoffrückbelastung aus der Schlammwässerung. 7. Aachener Tagung mit Informationsforum. Hannover, 07./08.05.2009 (7. Aachener Tagung mit Informationsforum), Nr.7.
- Wett, Bernhard; Hell, Martin; Podmirseg, S.M; Takás, I.; Nyhuis, G.; Bott, C.; Murthy, S. (2014): Hauptstrom-Deammonifikation für die Energiewende in der Abwasserreinigung. In: Johannes Pinnekamp (Hg.): Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. Aachen ("Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig", 47), 26/1.
- Winkler, M. (2012): Optimale Nährstoffverhältnisse für die Abwasserreinigung. Hach Lange.

Zerres, P. H. (1979): Beitrag zur Verfahrenstechnik der Phosphorelimination durch Vorfällung mit gesteuerter Fällmitteldosierung: R. Oldenbourg Verlage München.