

DWA-Regelwerk

Merkblatt DWA-M 386

Thermische Verwertung von Klärschlamm durch Verbrennung

November 2024

Entwurf

Frist zur Stellungnahme: 31. Januar 2025

Hinweis zur Abgabe von Stellungnahmen

Stellungnahmen im Rahmen des Beteiligungsverfahrens (Ergänzungen, Änderungen oder Einsprüche zum Entwurf einer Regelwerkspublikation, Gelbdruck) können von der DWA urheberrechtlich verwertet werden.

Mit der Abgabe einer Stellungnahme räumt die stellungnehmende Person der DWA die Nutzungsrechte an etwaigen schutzfähigen Inhalten ihrer Stellungnahme unentgeltlich zeitlich, räumlich sowie inhaltlich unbeschränkt ein. Die stellungnehmende Person wird in der Publikation nicht namentlich genannt.

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Regelsetzung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14 000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

Impressum

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft,
Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef, Deutschland
Tel.: +49 2242 872-333
Fax: +49 2242 872-100
E-Mail: info@dwa.de
Internet: www.dwa.de

© DWA, 1. Auflage, Hennef 2024

Satz:

Christiane Krieg, DWA

Druck:

druckhaus köthen GmbH & Co KG

ISBN:

978-3-96862-744-1 (Print)

978-3-96862-745-8 (E-Book)

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Merkblatts darf vorbehaltlich der gesetzlich erlaubten Nutzungen ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeberin in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden. Die DWA behält sich das Text- und Data-Mining nach § 44b UrhG vor, was hiermit Dritten ohne Zustimmung der DWA untersagt ist.

Bilder und Tabellen, die keine Quellenangaben aufweisen, sind im Rahmen der Merkblätterstellung als Gemeinschaftsergebnis des DWA-Fachgremiums zustande gekommen. Die Nutzungsrechte obliegen der DWA.

1 Vorwort

2 Im Jahr 2017 sind durch die grundlegende Änderung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und
3 nachfolgend durch die Novelle der Düngemittelverordnung (DüMV 2019) die Weichen für die zukünftige
4 Klärschlammentsorgung neu gestellt worden.

5 Neben den im Abwasser enthaltenen Wertstoffen werden auch Schadstoffe im Klärschlamm aufkonzentriert.
6 Die Klärschlammverordnung gibt daher für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von über
7 50.000 Einwohnerwerten zukünftig eine thermische Klärschlammverwertung vor. Dabei ist zu berücksichtigen,
8 dass eine Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken, Müllverbrennungsanlagen
9 oder die Behandlung in Klärschlammverbrennungsanlagen künftig nicht ohne vor- oder nachgeschaltete
10 Maßnahmen zum Phosphorrecycling möglich ist.

11 Aufgrund der Korrelation zwischen den Bereichen der Schlammbehandlung, der thermischen Verwertung
12 bis hin zum Phosphorrecycling, haben sich in den vergangenen Jahren verschiedene DWA-Fachausschüsse
13 mit dem Thema der Klärschlammbehandlung auseinandergesetzt. Neben Fragen zu Emissionen, rechtlichen
14 und wirtschaftlichen Aspekten und dem Phosphorrecycling rückten zudem Themen zur ganzheitlichen
15 und nachhaltigen Klärschlammverwertung, im Sinne der Schließung von Wertstoffkreisläufen und der
16 Energieerzeugung vermehrt in den Vordergrund.

17 Eine besondere Rolle bei der thermischen Verwertung wird den Klärschlammverbrennungsanlagen
18 beigemessen. Durch die thermische Behandlung von Klärschlamm in Verbrennungsanlagen können nicht
19 nur die meisten enthaltenen Schadstoffe gezielt und zuverlässig zerstört bzw. gebunden werden, auch
20 der im Klärschlamm chemisch gebundene Energiegehalt kann genutzt werden. Weil Phosphor nahezu
21 vollständig in die Asche übergeht und sich dort anreichert, wird für die weitaus überwiegende Menge
22 des anfallenden Klärschlammes künftig die thermische Vorbehandlung in Klärschlammverbrennungsanlagen
23 die Grundlage bilden, um anschließend Phosphor aus den Aschen zurückzugewinnen.

24 Die in verschiedenen DWA-Arbeitsberichten und Fachartikeln dargestellten Grundlagen wurden für
25 Klärschlammverbrennungsanlagen in Form des vorliegenden Merkblatts zusammengefasst, aktualisiert
26 und um wichtige Inhalte ergänzt. Zudem flossen Erfahrungen von Technologielieferanten, Verfahrensträgern
27 und Anlagenbetreibern aus aktuellen Projekten und dem Betrieb von Klärschlammverbrennungsanlagen
28 bei der Erarbeitung mit ein.

29 Aufgrund dieser umfangreichen Entwicklungen hat die DWA-Arbeitsgruppe KEK-3.2 „Klärschlammverbrennung“
30 das bisherige Merkblatt DWA-M 386 (Dezember 2011) grundlegend überarbeitet.

31 Die häufig vor der Verbrennung durchgeführte Klärschlamm-trocknung wird im Merkblatt DWA-M 379
32 „Klärschlamm-trocknung“ (Juni 2021) beschrieben. Die Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kraftwerken
33 wird im Merkblatt DWA-M 387 „Thermische Behandlung von Klärschlämmen – Mitverbrennung in Kraftwerken“
34 (Mai 2012) behandelt.

35 Änderungen

36 Gegenüber dem Merkblatt DWA-M 386 (12/2011) wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- 37 a) Änderung des Merkblatttitels: Der bisherige Titel *Thermische Behandlung von Klärschlämmen – Monoverbrennung*
38 wurde geändert in: *Thermische Verwertung von Klärschlamm durch Verbrennung*. Hiermit wird berücksichtigt,
39 dass der Begriff „Monoverbrennung“ in der AbfKlärV (2017) nicht definiert ist und stattdessen der Begriff
40 „Klärschlammverbrennungsanlage“ verwendet wird. Auch werden häufig andere geeignete Stoffe als Klärschlamm,
41 wie Schlämme aus der Lebensmittelverarbeitung oder Rechen- und Sandfanggut, in Klärschlammverbrennungsanlagen
42 mitbehandelt.
- 43 b) grundlegende Überarbeitung und Neustrukturierung: es erfolgte eine Fokussierung auf die Technik
44 der Wirbelschichtfeuerung. Ergänzt wurde ein Schwerpunkt auf betriebliche Aspekte.
- 45 c) Berücksichtigung des in 2019 veröffentlichten BVT-Merkblatts über Abfallverbrennungsanlagen bzw.
46 der BVT-Schlussfolgerungen sowie deren in 2024 erfolgte nationale Umsetzung in der 17. BImSchV.

- 1 d) Aufnahme von Hinweisen zur energetischen Bilanzierung der Klärschlammverbrennung mit dem
- 2 Ziel eines möglichst weitgehend energieautarken Betriebs.
- 3 e) Berücksichtigung der Verpflichtung zum Phosphorrecycling aus der phosphorhaltigen Asche.
- 4 f) Aufnahme von technischen Hinweisen zur Verringerung von Lachgas-Emissionen.
- 5 g) Neue Checkliste zum Betrieb einer Klärschlammverbrennungsanlage (Download).
- 6 h) Anpassung an die geltenden Gestaltungsregeln nach Arbeitsblatt DWA-A 400:2018.

7 In diesem Merkblatt werden, soweit wie möglich, geschlechtsneutrale Bezeichnungen für personen-
8 bezogene Berufs- und Funktionsbezeichnungen verwendet. Sofern dies nicht möglich ist, wird die
9 weibliche und die männliche Form verwendet. Ist dies aus Gründen der Verständlichkeit nicht möglich,
10 wird nur eine von beiden Formen verwendet. Alle Informationen beziehen sich aber in gleicher Weise
11 auf alle Geschlechter.

12 **Frühere Ausgaben**

13 Ersetzt bei Erscheinen des Weißdrucks das Merkblatt DWA-M 386 (12/2011).

14 **DWA-Klimakennung**

15 Im Rahmen der DWA-Klimastrategie werden Arbeits- und Merkblätter mit einer Klimakennung aus-
16 gezeichnet. Über diese Klimakennung können Anwendende des DWA-Regelwerks schnell und einfach
17 erkennen, in welcher Intensität sich eine technische Regel mit dem Thema Klimaanpassung und Kli-
18 maschutz auseinandersetzt. Das vorliegende Merkblatt wurde wie folgt eingestuft:

19 **KA0** = Das Merkblatt hat keinen Bezug zur Klimaanpassung

20 **KS2** = Das Merkblatt hat direkten Bezug zu Klimaschutzparametern

21 **BEGRÜNDUNG:** Das vorliegende Merkblatt hat direkten Bezug zum Klimaschutz: Die fachgerechte Aus-
22 legung und der Betrieb von Klärschlammverbrennungsanlagen sind Voraussetzungen für einen ener-
23 gieeffizienten und emissionsarmen Betrieb der Anlagen. Entsprechende Hinweise gibt das Merkblatt
24 unter anderem im Abschnitt 8 zur Abwärmenutzung, im Abschnitt 9 zu Energiebilanzen und Wirkungs-
25 graden und im Abschnitt 10 zu Emissionen und zur Abgasreinigung.

26 Einzelheiten zur Ableitung der Bewertungskriterien sind im „Leitfaden zur Einführung der Klimaken-
27 nung im DWA-Regelwerk“ erläutert, der online unter www.dwa.info/klimakennung verfügbar ist.

Frist zur Stellungnahme

Dieses Merkblatt wird bis zum

31. Januar 2025

zur Diskussion gestellt. Für den Zeitraum des öffentlichen Beteiligungsverfahrens kann der Entwurf kostenfrei im DWA-Entwurfsportal (DWAdirekt): www.dwa.info/entwurfsportal eingesehen werden.

Dort und unter www.dwa.info/Stellungnahmen-Entwurf finden Sie eine digitale Vorlage für Ihre Stellungnahme.

Hinweis zur Abgabe von Stellungnahmen

Stellungnahmen im Rahmen des Beteiligungsverfahrens (Ergänzungen, Änderungen oder Einsprüche zum Entwurf einer Regelwerkpublikation, Gelbdruck) können von der DWA urheberrechtlich verwertet werden. Mit der Abgabe einer Stellungnahme räumt die stellungnehmende Person der DWA die Nutzungsrechte an etwaigen schutzfähigen Inhalten ihrer Stellungnahme unentgeltlich zeitlich, räumlich sowie inhaltlich unbeschränkt ein. Die stellungnehmende Person wird in der Publikation nicht namentlich genannt.

Stellungnahmen sind zu richten – vorzugsweise per E-Mail – an:
Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17
53773 Hennef
dahmen@dwa.de

1 Verfasserinnen und Verfasser

2 Dieses Merkblatt wurde von der DWA-Arbeitsgruppe KEK-3.2 „Klärschlammverbrennung“ im Auftrag
3 des DWA-Hauptausschusses „Kreislaufwirtschaft, Energie und Klärschlamm“ (HA KEK) im DWA-
4 Fachausschuss KEK-3 „Thermische Klärschlammbehandlung“ erarbeitet.

5 Der DWA-Arbeitsgruppe KEK-3.2 „Klärschlammverbrennung“ gehören folgende Mitglieder an:

HASLWIMMER, Thomas	Dipl.-Ing., Böblingen (Sprecher)
DOUS, Andreas	Helmstedt (stellv. Sprecher)
FEHR, Günter	Dr.-Ing., Hannover
FRANCK, Jörn	Dipl.-Ing., Hamburg
GEYER, Jürgen	Dr.-Ing., Bad Waldsee
GODAWA, Yvonne	Dipl.-Ing., Frankfurt
HEIDECHE, Patric	M. Sc., Dessau-Roßlau
HÜNCHEN, Heike	Dipl.-Ing., Ratingen
KNAKE, Alexander	Dr.-Ing., Bottrop
KRISTKEITZ, Rainer	Dipl.-Ing., München
LEHRMANN, Falko	Dipl.-Ing., Lünen
LETZEL, Jürgen	Dipl.-Ing. Hamburg
MAURER, Martin	Dipl.-Ing., Karlsruhe
OTTE-WITTE, Rolf	Dr.-Ing., Elze
PROCHNOW, Tobias	M. Eng., Rostock
QUICKER, Peter	Prof. Dr.-Ing., Aachen
SALOMON, Dirk	Dipl.-Ing., Wuppertal
SCHMITTEL, Peter	Dr.-Ing., Frankenthal
SCHNELL, Matthias	M. Sc., Aachen
SCHUMACHER, Bert	Dipl.-Ing., Detmold
SCHWEBEL, Georg	Dr.-Ing., Niederfischbach
SIJSTERMANS, Luc	M. Sc., PM Moerdijk (Niederlande)
SIX, Jörg	Dr. rer. nat., Hagen
TOMALLA, Manfred	Dr.-Ing., Kreuztal
WECKER, Andreas	Dr.-Ing., Essen

- 1 Dem DWA-Fachausschuss KEK-3 „Thermische Klärschlammbehandlung“ gehören folgende Mitglieder an:
2

LEHRMANN, Falko	Dipl.-Ing., Lünen (Obmann)
SCHMITTEL, Peter	Dr.-Ing., Frankenthal (stellv. Obmann)
BEATT, Berend	Dipl.-Ing., Bremen
BUSCH, Rainer	Dipl.-Ing., Essen
GODAWA, Yvonne	Dipl.-Ing., Frankfurt
HANßEN, Harald	Dipl.-Ing., Hamburg
HASLWIMMER, Thomas	Dipl.-Ing., Böblingen
HOCHGÜRTEL, Herbert	Dipl.-Ing., Mainz
HOMANN, Leo	Dipl.-Ing., Karlsbad-Ittersbach
JACOBS, Ulrich	Dipl.-Ing., Grömitz
JASPER, Matthias	Dipl.-Ing., Lemgo
KAPPA, Sven	Dipl.-Ing., Cottbus
KNAKE, Alexander	Dr.-Ing., Bottrop
KRISTKEITZ, Rainer	Dipl.-Ing., München
MAURER, Martin	Dipl.-Ing., Karlsruhe
PIETSCH, Bernhard	Dipl.-Ing., Berlin
SALOMON, Dirk	Dipl.-Ing., Wuppertal
SCHÄFER, Erwin	Neu-Ulm
SIJSTERMANS, Luc	M. Sc., PM Moerdijk (Niederlande)
SIX, Jörg	Dr. rer. nat., Hagen

- 3 Projektbetreuer in der DWA-Bundesgeschäftsstelle:

REIFENSTUHL, Reinhard	Dipl.-Ing., Hennef Abteilung Wasser- und Abfallwirtschaft
-----------------------	--

1	Inhalt	
2	Vorwort	3
3	Verfasserinnen und Verfasser	6
4	Bilderverzeichnis	12
5	Tabellenverzeichnis	13
6	Hinweis für die Benutzung	14
7	Einleitung	14
8	1 Anwendungsbereich	15
9	2 Verweisungen	16
10	3 Begriffe	16
11	3.1 Definitionen	16
12	3.2 Abkürzungen und Formelzeichen	19
13	4 Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm	24
14	4.1 Allgemeines	24
15	4.2 Charakteristische Klärschlammeigenschaften in Bezug auf die thermische Verwertung	24
16	4.3 Trockenrückstand	25
17	4.4 Glühverlust	25
18	4.5 Bestimmung der Heizwerte	26
19	4.5.1 Vorbemerkungen	26
20	4.5.2 Analytisch	26
21	4.5.3 Überschlägige Berechnung des unteren Heizwerts von Klärschlamm	26
22	4.6 Konsistenz, Körnung, eventuell Störstoffe	26
23	4.7 Sonstige Stoffe	27
24	4.8 Aschegehalt	27
25		
26	5 Trocknung als Vorstufe zur Klärschlammverbrennung	28
27	5.1 Allgemeines	28
28	5.2 Teiltrocknung	28
29	5.3 Volltrocknung	29
30	5.4 Behandlung der Brüden bzw. Abluft aus der Trocknung	29
31	5.4.1 Vorbemerkungen	29
32	5.4.2 Behandlung der Brüden bzw. der Abluft ohne Kondensationsstufe am Trockner ...	30
33	5.4.2.1 Vorbemerkungen	30
34	5.4.2.2 Brüden bzw. Abluftbehandlung im Verbrennungsprozess	30
35	5.4.2.3 Brüden-/Abluftbehandlung außerhalb des Verbrennungsprozesses	30
36	5.4.3 Kondensation des verdampften Wassers nach der Klärschlamm-trocknung	31
37	5.4.3.1 Vorbemerkungen	31
38	5.4.3.2 Auskopplung der Kondensationswärme	31
39	5.4.3.3 Kondensatbehandlung	32
40	5.4.3.4 Einleitbedingungen	32

1	5.4.3.5	Eigenschaften des Brüdenkondensats	32
2	5.4.4	Verfahren zur Kondensatbehandlung.....	33
3	5.4.4.1	Vorbemerkungen	33
4	5.4.4.2	Fällung bzw. Flockung.....	34
5	5.4.4.3	Ammoniakstrippung	34
6	5.4.4.4	Biologische Behandlung.....	35
7	5.5	Abgasbehandlung (nicht kondensierbare Bestandteile)	36
8	6	Klärschlammannahme, -lagerung und -transport	37
9	6.1	Annahme- und Lagerkapazitäten	37
10	6.1.1	Allgemeines	37
11	6.1.2	Mechanisch entwässerter Klärschlamm	38
12	6.1.2.1	Vorbemerkungen	38
13	6.1.2.2	Annahmehunker	38
14	6.1.2.3	Abkipfstelle für Tiefbunker mit Greifersystem	39
15	6.1.2.4	Störstoffabscheider	39
16	6.1.3	Teilgetrockneter Klärschlamm.....	39
17	6.1.4	Vollgetrockneter Klärschlamm	40
18	6.1.5	Annahmekontrolle und Qualitätssicherung, Probenahme und Analysen (Programm).....	40
19			
20	6.2	Klärschlamm Lagerung	40
21	6.2.1	Mechanisch entwässerter Klärschlamm	40
22	6.2.2	Teilgetrockneter Klärschlamm.....	41
23	6.2.3	Vollgetrockneter Klärschlamm	41
24	6.3	Klärschlammtransport.....	42
25	6.3.1	Mechanisch entwässerter Klärschlamm	42
26	6.3.2	Teilgetrockneter Klärschlamm.....	42
27	6.3.3	Vollgetrockneter Klärschlamm	43
28	6.4	Dosiereinrichtung und Zuleitung zum Verbrennungsofen	43
29	6.4.1	Allgemeines	43
30	6.4.2	Klärschlammeintrag in separaten Teilströmen	43
31	6.4.2.1	Mechanisch entwässerter Klärschlamm	43
32	6.4.2.2	Angelieferter teilgetrockneter Klärschlamm	44
33	6.4.2.3	Vollgetrockneter Klärschlamm	44
34	6.4.3	Mischung von vollgetrocknetem mit entwässertem Klärschlamm.....	45
35	6.5	Nebenanlagen.....	45
36	6.5.1	Aspirationssystem	45
37	6.5.2	Aspirationsluftbehandlung.....	45
38	6.5.3	Abwasser- und Kondensatbehandlung	46
39	6.6	Sicherheitstechnische Aspekte.....	46
40	7	Thermische Klärschlammbehandlung	46
41	7.1	Allgemeines	46
42	7.2	Thermische Verfahren.....	47
43	7.2.1	Allgemeines	47
44	7.2.2	Wirbelschichtverfahren	47
45	7.2.2.1	Vorbemerkungen	47

1	7.2.2.2	Wesentliches Regelungskonzept	52
2	7.2.2.3	Sicherheitskonzept	52
3	7.2.2.4	An- und Abfahrkonzept	52
4	7.2.3	Drehrohrverfahren	52
5	7.2.3.1	Aufbau und Funktionsweise	52
6	7.2.3.2	Wesentliches Regelungskonzept	53
7	7.2.3.3	Sicherheitskonzept	54
8	7.2.3.4	An- und Abfahrkonzept	54
9	7.2.4	Sonstige Verfahren	54
10	7.2.4.1	Rostfeuerung	54
11	7.2.4.2	Etagenofen und Etagenwirbler	55
12	7.3	Feuerungsleistungsdiagramm	56
13	8	Systeme der Abwärmenutzung	57
14	8.1	Wasser-Dampf-Kreislauf	57
15	8.1.1	Dampferzeuger	57
16	8.1.1.1	Vorbemerkungen	57
17	8.1.1.2	Dampfturbinen-Prozess	58
18	8.1.1.3	Nebenanlagen	59
19	8.1.2	Sicherheitskonzept	59
20	8.1.3	Thermalölkreislauf	59
21	8.1.3.1	Abhitzeessel mit Thermoölkreislauf	59
22	8.1.3.2	Bauformen der Thermoölkessel	60
23	8.1.3.3	Sicherheitskonzept Thermoölsystem	61
24	9	Massen- und Energiebilanzen, Wirkungsgrade	62
25	9.1	Allgemeines	62
26	9.2	Bilanzierung der Klärschlammbehandlungsanlage	62
27	9.3	Kesselwirkungsgrad	64
28	10	Emissionen und Abgasreinigung	66
29	10.1	Grundlagen	66
30	10.2	Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO ₂)	69
31	10.3	Stickoxide, Ammoniak	69
32	10.4	Lachgas	71
33	10.5	Staubabscheidung	72
34	10.5.1	Vorbemerkungen	72
35	10.5.2	Elektrofilter	73
36	10.5.2.1	Vorbemerkungen	73
37	10.5.2.2	Trockenelektrofilter	73
38	10.5.2.3	Nasselektrofilter	75
39	10.5.3	Fliehkraftabscheider	75
40	10.5.4	Filternde Abscheider	76
41	10.5.4.1	Vorbemerkungen	76
42	10.5.4.2	Faserschichtfilter (Gewebefilter)	76

1	10.6	Saure Schadgase (Schwefeloxide, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Bromwasserstoff)	78
2			
3	10.6.1	Vorbemerkungen	78
4	10.6.2	Ca(OH) ₂ -Verfahren	79
5	10.6.3	NaHCO ₃ -Verfahren.....	79
6	10.6.4	Natronlauge-Verfahren	80
7	10.7	Trocken-Additiv-Verfahren (TAV).....	80
8	10.8	Verfahrenstechnik zur Abscheidung saurer Schadgase	81
9	10.8.1	Vorbemerkungen	81
10	10.8.2	Sorptionsmittel	82
11	10.8.3	Nassverfahren	82
12	10.8.3.1	Verfahrensprinzip	82
13	10.8.3.2	Wäscherbauarten	84
14	10.8.3.3	Notwendige Abgasvorbehandlung	84
15	10.8.3.4	Saure Wäsche	85
16	10.8.3.5	Neutrale Wäsche	86
17	10.9	Quecksilber	86
18	10.9.1	Vorbemerkungen	86
19	10.9.2	Quecksilberabscheidung	88
20	10.9.3	Abscheidung des Quecksilbers durch Oxidation und Absorption	88
21	10.9.3.1	Vorbemerkungen	88
22	10.9.3.2	Abscheidung des Quecksilbers durch Adsorption	89
23	10.9.3.3	Abscheidung des Quecksilbers mit anderen Verfahren	89
24	10.10	Organische Schadstoffe wie Dioxine, Furane, perfluorierte Sulfonsäuren (PFOS), Perfluorierte Carbonsäuren (PFOA), per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), perfluorierte Tenside (PFT)	89
25			
26			
27	10.11	Verfahrenstechnik zur Abscheidung von organischen Bestandteilen, Schwermetallen.....	92
28			
29	10.11.1	Organische Schadstoffe.....	92
30	10.11.2	Adsorptionsverfahren.....	92
31	10.11.3	Flugstrom- Filterschicht-Verfahren.....	92
32	10.12	Verfahrenstechnik zur Abscheidung von Ammoniak.....	93
33	10.13	Abwasser aus der Rauchgasreinigung.....	93
34	10.14	Wasserbilanz der Rauchgasreinigung.....	93
35	10.15	Regelungen und Steuerungen der Abgasreinigung.....	94
36	11	Rückstände aus der Abgasreinigung	96
37	11.1	Allgemeines	96
38	11.2	Rückstände aus der Verbrennung	96
39	11.3	Phosphorrecycling aus phosphorhaltigen Aschen	97
40	11.4	Rückstände aus der Abgasreinigung – Reststoffe.....	98
41	12	Betreiberverantwortung / Betreiberpflichten	100
42	13	Kosten der Klärschlammverbrennung	101
43	13.1	Allgemeines	101
44	13.2	Festlegung von Kostengruppen und Kostenkennzahlen.....	102
45	13.2.1	Vorbemerkungen	102

1	13.2.2	Kapitalkosten	102
2	13.2.3	Betriebskosten	104
3	13.2.3.1	Energiekosten	104
4	13.2.3.2	Kosten für Einsatzstoffe	104
5	13.2.3.3	Kosten für Wartung und Instandhaltung	106
6	13.2.3.4	Personalkosten	107
7	13.2.3.5	Entsorgungskosten	107
8	13.2.4	Wirtschaftlichkeit und Potenzial zur Kostenoptimierung	108
9	13.2.4.1	Wirtschaftlichkeit	108
10	13.2.4.2	Potenziale zur Kostenoptimierung	108
11	Anhang A Leitfaden zum Betrieb einer Klärschlammverwertungsanlage (KVA)		109
12	A.1	Themenblöcke	109
13	A.2	Dokumentationen	112
14	Quellen und Literaturhinweise		115

15 Bilderverzeichnis

16	Bild 1:	Verfahrenskombination zur Brüdenkondensatbehandlung	33
17	Bild 2:	Ammoniakstrippung	34
18	Bild 3:	Fluidisierungsdiagramm – Druckverlust in Abhängigkeit von	
19		der Fluidisierungsgeschwindigkeit	47
20	Bild 4:	Schematische Darstellung einer stationären Wirbelschicht	48
21	Bild 5:	Ausführungen des Düsenbodens	49
22	Bild 6:	Prozess-Schema Drehrohrföfen am Beispiel des EuPhoRe [®] -Verfahrens	53
23	Bild 7:	Feuerungsleistungsdiagramm einer Wirbelschichtanlage	56
24	Bild 8:	Naturumlaufkessel	57
25	Bild 9:	Dampfturbinenprozess	58
26	Bild 10:	Bilanzschema für die Bilanzierung einer Klärschlammverbrennungsanlage	63
27	Bild 11:	Bilanzraum Kessel	65
28	Bild 12:	Verfahrenstechnische Stufen der Klärschlammverbrennung/Abgasreinigung	68
29	Bild 13:	Bildungsmechanismen von Stickoxiden bei der Verbrennung	69
30	Bild 14:	Verfahrensprinzip der gestuften Verbrennung zur Verringerung	
31		der Stickoxidemissionen	70
32	Bild 15:	N ₂ O-Konzentration und Ofenkopftemperatur	71
33	Bild 16:	Prinzipieller Aufbau eines Trockenelektrofilters	73
34	Bild 17:	Prinzipieller Aufbau eines Gewebefilters mit mehreren Kammern	77
35	Bild 18:	Einteilung der Verfahren zur Minderung saurer Schadgase nach	
36		der thermischen Abfallbehandlung	82
37	Bild 19:	Beispiele für Sprühturmwäscher (Düsenwäscher) und Füllkörperwäscher	85
38	Bild 20:	Quecksilber im Rohgas in Abhängigkeit vom Chlorgehalt im Klärschlamm	87
39	Bild 21:	Dioxin- und Furanbildung in Abhängigkeit vom S/Cl-Verhältnis	90
40	Bild 22:	Prinzip des Flugstrom-Filterschichtverfahrens	93
41	Bild 23:	Verfahrenstechnische Stufen in Verbindung mit dem Wassereintrag	
42		und -austrag	94

1	Bild 24:	Optionen Phosphorrückgewinnung ab 2029.....	97
2	Bild 25:	Exemplarischer Ausschnitt – Checkliste für den Betrieb einer	
3		Klärschlammverwertungsanlage (KVA)	100
4	Bild 26:	Bilanzraum Kostenbetrachtung	101

5 Tabellenverzeichnis

6	Tabelle 1:	Abkürzungen	19
7	Tabelle 2:	Formelzeichen	22
8	Tabelle 3:	Indizes.....	23
9	Tabelle 4:	Typische Eigenschaften der Brüden	32
10	Tabelle 5:	Betriebsparameter für Dampf- und Luftstrippung	35
11	Tabelle 6:	Eignung verschiedener Verfahren	67
12	Tabelle 7:	Kenndaten von Trockenelektrofiltern.....	74
13	Tabelle 8:	Kenndaten von Fliehkraftabscheidern.....	76
14	Tabelle 9:	Kenndaten von Gewebefiltern	77
15	Tabelle 10:	Eingesetzte Sorptionsmittel und Chemikalien bei nassen	
16		Abgasreinigungsverfahren	83
17	Tabelle 11:	Zusammenfassung der Massenanteile der Hauptelemente aller	
18		Proben in Prozent (%).....	97
19	Tabelle 12:	Beispielhafte Betriebsmittelverbräuche	106

1

Hinweis für die Benutzung

Dieses Merkblatt ist das Ergebnis ehrenamtlicher, technisch-wissenschaftlicher/wirtschaftlicher Gemeinschaftsarbeit, das nach den hierfür geltenden Grundsätzen (Satzung, Geschäftsordnung der DWA und dem Arbeitsblatt DWA-A 400) zustande gekommen ist. Für ein Merkblatt besteht eine tatsächliche Vermutung, dass es inhaltlich und fachlich richtig ist.

Jeder Person steht die Anwendung des Merkblatts frei. Eine Pflicht zur Anwendung kann sich aber aus Rechts- oder Verwaltungsvorschriften, Vertrag oder sonstigem Rechtsgrund ergeben.

Dieses Merkblatt ist eine wichtige, jedoch nicht die einzige Erkenntnisquelle für fachgerechte Lösungen. Durch seine Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall; dies gilt insbesondere für den sachgerechten Umgang mit den im Merkblatt aufgezeigten Spielräumen.

Normen und sonstige Bestimmungen anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder anderer Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum stehen Regeln der DWA gleich, wenn mit ihnen dauerhaft das gleiche Schutzniveau erreicht wird.

2 Einleitung

3 Die Klärschlammverbrennung ist der wichtigste Entsorgungspfad für Klärschlamm in Deutschland.
4 Im Jahr 2022 wurden ca. 80 % des Aufkommens kommunaler Klärschlämme in Höhe von 1,67 Mio. Mg
5 TM einer thermischen Behandlung zugeführt (DESTATIS 2023). Die bodenbezogene Klärschlammver-
6 wertung in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau ist in den letzten Jahren gegenläufig zur ther-
7 mischen Behandlung deutlich zurückgegangen. Dies ist insbesondere auf die Umsetzung eines vor-
8 sorgenden Boden- und Gewässerschutzes im Rahmen der Gesetzgebung zurückzuführen, um
9 Umweltauswirkungen durch einen Eintrag im Klärschlamm enthaltener Schadstoffe vorzubeugen.

10 Die Ziele der Klärschlammverbrennung sind die thermische Zersetzung und vollständige Oxidation
11 organischer Substanzen und Schadstoffe bei hohen Temperaturen. Bei gleichzeitiger Einhaltung
12 emissionsrechtlicher Vorgaben wird somit eine umweltgerechte Klärschlamm Entsorgung ermöglicht.
13 Die anfallende Klärschlammverbrennungsrücklage bietet sich als Ausgangsstoff für die ab dem Jahr
14 2029 gesetzlich vorgeschriebene Phosphor-Rückgewinnung an, da der im Klärschlamm enthaltene
15 Phosphor bei der Verbrennung im Feststoff konzentriert wird. Bei der Verbrennung wird die chemisch
16 im Klärschlamm gespeicherte Energie in Wärme umgewandelt, um sie zum Beispiel durch Dampf-
17 oder Stromproduktion nutzbar zu machen.

18 Im Jahr 2023 befanden sich in Deutschland 31 Klärschlammverbrennungsanlagen in Betrieb, in denen
19 ca. 795.000 Mg TM behandelt werden können. Davon wurden drei Anlagen im Jahr 2023 in Betrieb
20 genommen. In sieben dieser Anlagen werden überwiegend industrielle Klärschlämme verbrannt. In
21 21 dieser Anlagen wurden im Jahr 2022 vorwiegend kommunale Klärschlämme mit einem Aufkom-
22 men von ca. 583.700 Mg TM verbrannt. Zusätzlich wurden im Jahr 2022 ca. 725.600 Mg TM Klär-
23 schlamm in Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken mitverbrannt.
24 (DESTATIS, 12. Dezember 2023).

25 Die Mitverbrennung von Klärschlamm wird aufgrund der ab dem Jahr 2029 geltenden Pflicht zur Phos-
26 phor-Rückgewinnung sowie dem Ausstieg Deutschlands aus der Kohleverstromung zukünftig jedoch
27 deutlich abnehmen. Das Thema Klärschlamm-Mitverbrennung ist nicht Bestandteil des vorliegenden
28 Merkblatts, sondern wird im Merkblatt DWA-M 387 separat behandelt.

Die thermische Behandlung von Klärschlämmen stellt in Deutschland den mengenmäßig wichtigsten Entsorgungsweg dar. Sie trägt damit wesentlich zu einer zukunftssicheren, wirtschaftlichen und umweltgerechten Entsorgung von Klärschlämmen bei. So ist seit Ende der 80er Jahre der Anteil der Schlämme, die einer thermischen Behandlung zugeführt werden, von ca. 12 % auf inzwischen ca. 80 % gestiegen. Derzeit wird noch ein wesentlicher Anteil der Klärschlämme einer Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken und Müllverbrennungsanlagen zugeführt. Im Jahr 2017 wurden durch die Fortschreibung maßgeblicher Regelungen zur Klärschlammbehandlung und -verwertung die Weichen für die zukünftige Klärschlamm Entsorgung neu gestellt. Aufgrund der in 2029 greifenden Pflicht der AbfKlärV zur Phosphorrückgewinnung sowie dem mit der Energiewende verbundenen Ausstieg aus der Kohleverstromung wird künftig der weitaus überwiegende Anteil des Klärschlammes in Klärschlammverbrennungsanlagen behandelt werden.

Ziel des vorliegenden Merkblatts DWA-M 386 ist es, grundlegende Hinweise zur technischen Ausführung und zum Betrieb von Anlagen zur Klärschlammverbrennung zu geben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Anlagen mit stationärer Wirbelschichtfeuerung. Es werden die Möglichkeiten zur Nutzung der Abwärme und Verfahren zur Emissionsminderung und Abgasreinigung betrachtet. Hinweise zu den rechtlichen Rahmenbedingungen, zur Betriebsorganisation und zu Wirtschaftlichkeitsaspekten runden das Merkblatt ab. Fachplanenden und Betreibern von Klärschlammverbrennungsanlagen wird somit eine Basis für die Konzeptfindung während der Planungsphase sowie für Entscheidungen über Investitionen beim Neubau an die Hand gegeben und wichtige Hinweise für den Betrieb von Klärschlammverbrennungsanlagen gegeben. Auch Maschinen- und Anlagenbauern gibt das Merkblatt wichtige Hinweise; es beinhaltet jedoch keine detaillierten Bemessungsregeln für verfahrenstechnische Anlagen oder Anlagenteile.

VORSCHAU

ISBN: 978-3-96862-744-1 (Print)
978-3-96862-745-8 (E-Book)

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Theodor-Heuss-Allee 17 · 53773 Hennef
Telefon: +49 2242 872-333 · info@dwa.de · www.dwa.de