

**Neue Entsorgungswege für
den bayerischen Klärschlamm
– Technische Möglichkeiten
und Erfahrungsberichte –**

Fachtagung am 11. Juli 2006



**Bayerisches Landesamt
für Umwelt**

Augsburg, 2006 – ISBN 3-936385-93-9

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt (Veranst.):
Neue Entsorgungswege für den bayerischen Klärschlamm – Technische Möglichkeiten und Erfahrungsberichte –
(Augsburg 11.07.2006), Augsburg, 2006

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des
Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2006

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

Begrüßung und Einführung	3
Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle, Präsident des LfU	
Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken	9
Dr.-Ing. Klaus Steier, E.ON Kraftwerke GmbH, München	
Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken	29
Dipl.-Ing. Werner Kröger, LfU	
Klärschlamm-trocknung – Baustein einer integrierten Abfallwirtschaft	35
Dipl.-Chem. Heinz-Uwe Riedel, LfU	
Solare Klärschlamm-trocknung am Beispiel AZV-Füssen	47
Franz Petz, Abwasserzweckverband Füssen	
Entsorgung dezentraler Kläranlagen: Das „Modell Straubing“	55
Johann Buchmeier, Stadt Straubing	
Klärschlamm-Mono-Verbrennung in der Wirbelschicht beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“, Neu-Ulm	65
Dipl. Ing. (FH) Georg Hiller, Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“, Neu-Ulm	
Klärschlamm-Vergasung – Kläranlage Balingen	81
Dipl.-Ing. Christian Burgbacher, Fa. Kopf AG Umwelt- und Energietechnik, Sulz-Bergfelden	
Kleinverbrennungsanlagen für Klärschlamm	91
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Dr.-Ing. Mario Mocker, Dr.-Ing. Peter Quicker, ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg	
Niedertemperaturkonvertierung (NTK): Verfahren und Ökoeffizienzanalyse	103
Prof. Dr. Ernst A. Stadlbauer, Fachhochschule Gießen-Friedberg	
Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm	133
Dipl.-Ing. Katrin Gethke Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen	
Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Technik der Zukunft?	147
Dr. Doris Schieder, Dr.-Ing. Wolfgang Mayer, Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe, TU München, Straubing	
Tagungsleitung / Referenten	157

Begrüßung und Einführung

Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle, Präsident des LfU

Sehr geehrten Damen und Herren,

am 22. März 2006, dem Weltwassertag, hieß es in einer Pressemitteilung von EUROSTAT, der Statistikbehörde der EU:

„90 % der Bevölkerung der EU25 an Kanalisation angeschlossen.

Der Anschluss an eine Kanalisation ist der erste Schritt zur Beseitigung von Schadstoffen aus dem Abwasser, bevor dieses wieder in die Umwelt eingeleitet wird. In der EU25 waren 2002 durchschnittlich 90 % der Bevölkerung an ein kommunales Kanalnetz angeschlossen.

In **Malta, Luxemburg** und **Spanien** hatten 100 % der Bevölkerung einen Kanalanschluss, dicht gefolgt von den **Niederlanden** (99 %), dem **Vereinigten Königreich** (98 %) und **Deutschland** (95 %). Die niedrigsten Anschlussquoten wurden in **Zypern** (35 %), der **Slowakei** (55 %), **Ungarn** (62 %) und **Slowenien** (63 %) ermittelt.

Mit einem **Kanalanschluss** ist noch **nicht sichergestellt**, dass das **Abwasser auch behandelt** wird. Schätzungen zufolge wurde in der **EU25** das Abwasser von etwa 14 % der Bevölkerung entweder **nicht gesammelt** (10 %) oder trotz Sammlung **nicht behandelt** (4 %).

In den **Niederlanden** (1 %), dem **Vereinigten Königreich** (2 %), **Luxemburg** (5 %) und **Deutschland** (7 %) wurde das Abwasser von weniger als 10 % der Bevölkerung nicht gesammelt oder trotz Sammlung nicht behandelt, in **Malta** (87 %), **Slowenien** (67 %) und **Zypern** (65 %) hingegen von mehr als der Hälfte.“

Klärschlammmengen

Zunehmende Anschlussgrade an Kläranlagen bedingen **größere Klärschlammmengen**, die zu entsorgen sind.

Die **BRD** weist unter den Mitgliedsstaaten der EU den **weitaus höchsten Klärschlammanfall** auf. Pro Jahr fallen derzeit in der **BRD ca. 2,4 Mio. t reine Klärschlamm-trockenmasse** an.

In der **EU** waren es **im Jahr 2000** insgesamt ca. **7,2 Mio. t**. Bei diesen Angaben ist aber zu berücksichtigen, dass der Klärschlamm auf den Kläranlagen - vor einer ggf. vorhandenen maschinellen Entwässerung - mit einem Anteil von ca. **95 % Wasser** und nur ca. **5 % Trockenmasseanteil** anfällt.

In der **BRD** ist daher von einer **anfallenden Nassschlammmenge** von ca. **48 Mio. t pro Jahr** bzw. ca. **500 – 600 kg pro Einwohner** und Jahr auszugehen (entspricht ca. 25 – 30 kg reiner Trockenmasse pro Einwohner und Jahr).

Kontroverse Diskussion

Über das Thema der Klärschlamm Entsorgung wird **seit vielen Jahren eine kontroverse Diskussion geführt**.

- Einerseits enthält der **Klärschlamm Düngestoffe**, vor allem **Phosphor und Stickstoff**, die eine **Verwertung** des Klärschlammes auf landwirtschaftlichen Flächen sinnvoll erscheinen lassen.
- Andererseits ist der Klärschlamm die „**Schadstoffsenke**“ bei der Abwasserreinigung und enthält eine **unüberschaubare Vielfalt an anorganischen und organischen Inhaltsstoffen**.

Ziele der zukünftigen Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Aus Gründen des **vorsorgenden Verbraucher-, Boden- und Gewässerschutzes** wurde in Bayern im **Jahr 2001** der Beschluss gefasst,

„die **landwirtschaftliche, gärtnerische und landschaftsbauliche Verwertung von Klärschlamm mittelfristig zu beenden**“.

Der bayerische Klärschlamm soll Entsorgungsverfahren zugeführt werden, die zu einer **weitgehenden Schadstoffentfrachtung und Schadstoffzerstörung** führen. Dies wird durch eine **thermische Behandlung** des Klärschlammes gewährleistet.

Um die **wertvollen Inhaltsstoffe des Klärschlammes**, das sind vor allem Verbindungen der endlichen Ressource Phosphor, auch bei einer **thermischen Klärschlammbehandlung nutzen** zu können, wird die Entwicklung von **Rückgewinnungsverfahren für Phosphat** aus dem **Abwasser** und dem **Klärschlamm** vom StMUGV unterstützt. Wir freuen uns heute Nachmittag auf einen Vortrag über neueste Ergebnisse aus dem Forschungs- und Entwicklungsbereich zu diesem Thema.

Wie steht es aktuell um die Umsetzung der bayerischen Ziele?

1. Die bayerischen **Ziele** zur künftigen Klärschlamm Entsorgung wurden in den **bayerischen Abfallwirtschaftsplan** und das **Landesentwicklungsprogramm** aufgenommen.
2. Zur detaillierten zeitlichen und inhaltlichen Umsetzung der neuen bayerischen Strategie werden **Gespräche** mit der **Wirtschaft**, den **Kommunen** und den betroffenen **Verbänden** geführt.
3. Eine **interministerielle Arbeitsgruppe** erörtert alle mit der Klärschlamm Entsorgung zusammenhängenden Fragen.
4. **Nahrungsmittelhersteller, Verbraucherverbände** und **Kirchen unterstützen** das bayerische Vorgehen. Sie sprechen sich generell für einen **Verzicht** auf die Klärschlamm Düngung aus.

Im Vergleich dazu die neuen Entsorgungsstrategien in anderen Ländern und Staaten:

1. Auch **Baden-Württemberg** und **Nordrhein-Westfalen** unterstützen die Strategie des Ausstiegs aus der landwirtschaftlichen Verwertung. Baden-Württemberg konnte den Anteil der Verbrennung innerhalb von zwei Jahren von 33 % auf 60 % steigern. (DWA hält an landwirtschaftlicher Verwertung fest!)
2. In der **Schweiz** beschloss der Bundesrat am 26. März 2003 aus Vorsorgegründen den **Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung**. Ab **1.10.2006** ist dort die Klärschlammausbringung vollständig verboten.
3. In **Tirol** darf aufgrund der Novellierung des Tiroler Feldschutzgesetzes vom 20. März 2002 **kein Klärschlamm mehr in der Landwirtschaft** ausgebracht werden.
4. In den **Niederlanden** und **Dänemark** ist durch die **Verschärfung der Grenzwerte** die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung weitgehend zum Erliegen gekommen.
5. Die EU plant bereits seit mehreren Jahren, die **Klärschlammrichtlinie** über die landwirtschaftliche Verwertung zu novellieren, wobei
 - **Grenzwertverschärfungen für die Schwermetalle** und
 - die Aufnahme **zusätzlicher organischer Schadstoffparameter** vorgesehen sind.

Momentan ist jedoch **nicht absehbar**, inwieweit hierdurch **Restriktionen für die Verwertung** der bayerischen Klärschlämme entstehen können.

Wie steht es um die derzeitige Entsorgung des bayerischen Klärschlammes?

1. In Bayern fallen derzeit pro Jahr ca. **6 Mio. t kommunaler Klärschlamm** mit ca. **5 % Trockenrückstand** entsprechend ca. **300.000 t Trockenmasse (100 % TR)** an.
2. Durch **Entwässerungsmaßnahmen** werden die 6 Mio. t Klärschlamm zwar stark reduziert, insgesamt ist jedoch trotzdem von einer **Entsorgungsmenge von ca. 1,5 bis 2 Mio. t** kommunalem Klärschlamm pro Jahr auszugehen. Zum Vergleich: Im Jahr 2004 fielen in Bayern ca. **2,3 Mio. t Restabfall zur Beseitigung** an.
3. Im Jahr 2004 wurden **25 %** des bayerischen Klärschlammes in der **Landwirtschaft** und **34 %** im **Landschaftsbau (Rekultivierung in den NBL)** verwertet, **39 % thermisch behandelt** und **2 % deponiert**.
4. In den letzten 10 Jahren hat die **landwirtschaftliche Verwertung erheblich abgenommen**. Im Jahr **1995** wurde noch **56 %** des Klärschlammes auf die Felder ausgebracht. **2004** waren es – wie gesagt – nur noch **25 %**.
5. Die **thermische Behandlung** ist in demselben Zeitraum **deutlich gestiegen**. 1995 waren es 14 % – jetzt sind es **39 %**.

6. Die **Deponierung** von Klärschlamm **spielt** in Bayern seit mehreren Jahren **nahezu keine Rolle mehr** – sie ist bereits vor zehn Jahren **erheblich zurückgegangen**.

Thermische Behandlung des bayerischen Klärschlammes ist auf gutem Weg!

1. Der Klärschlamm aus den **großen Kläranlagen** der bayerischen Ballungszentren wird i.d.R. bereits einer **thermischen Behandlung** zugeführt. Ich darf Sie hierzu insbesondere auf die Vorträge zur **Mitverbrennung in Kohlekraftwerken** und in **Müllheizkraftwerken**, den Vortrag zur **Monoverbrennung** auf der Kläranlage Neu-Ulm sowie die Vorträge zur Klärschlamm-trocknung hinweisen.
2. Neben diesen bewährten Verfahren der thermischen Klärschlammbehandlung wurden und werden **neue Verfahren entwickelt** bzw. **weiterentwickelt**. Hierzu erwarten wir weitere sehr interessante Vorträge
 - zur **Mitverbrennung in Zementwerken**
 - zur **dezentralen Klärschlammvergasung** und **Klärschlammkonvertierung** sowie
 - zu **Kleinverbrennungsanlagen** für Klärschlamm.

Vom Grundsatz her besticht natürlich die Vorstellung, den Klärschlamm direkt auf größeren Kläranlagen ohne weite Transportwege thermisch behandeln zu können.

Besondere Situation bei kleinen Kläranlagen

In den **ländlichen Regionen** Bayerns besitzt die **landwirtschaftliche Verwertung** naturgemäß größere Bedeutung als in den Ballungsregionen. Als Flächenstaat weist Bayern sehr **viele kleine gemeindliche Kläranlagen** auf.

In Bayern gibt es **knapp 2.900 kommunale Kläranlagen**. Zum Vergleich: bundesweit sind es ca. 10.000.

Nach dem „**Lagebericht 2004 Gewässerschutz in Bayern – Abwasseranlagen**“

- weisen ca. **50 %** der bayerischen kommunalen Kläranlagen eine **Ausbaugröße kleiner als 1.000 EW** auf (weniger als 2 % etwa 0,5 Mio. EW) der Gesamtausbaugröße),
- besitzen ca. **2.300 Kläranlagen (= 80 %)** eine **Ausbaugröße bis zu 5.000 Einwohnerwerten (10 % der Gesamtausbaugröße)** und
- **374 Kläranlagen** mit einer Ausbaugröße von **mehr als 10.000 Einwohnerwerten (knapp 84 % der Gesamtausbaugröße)**.

Die Herausforderungen liegen bei **kleinen Kläranlagen**. Die **Kosten** für die Klärschlammmentwässerung und -entsorgung sind hier **überproportional hoch**. Dies **erschwert den Ausstieg** aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung erheblich. Wir freuen uns daher besonders auf den **Vortrag zum „Straubinger Modell“**, das zu diesem Problem Lösungsansätze liefern kann.

Zukunft Brennstoffzellentechnik?

Wir wollen mit unserer Tagung auch einen **Blick in die Zukunft** wagen und eine **Technologie vorstellen**, die in den verschiedensten Bereichen in der Diskussion steht: die **Brennstoffzellentechnik**. Für uns stellt sich natürlich die Frage, ob diese Technik zukünftig eventuell auch **im Kläranlagenbereich nutzbringend** eingesetzt werden kann.

Zitat Goethe: „Wer vieles bringt, wird manchem etwas bringen.“

Ich begrüße Sie noch einmal ganz herzlich bei uns am LfU und wünsche Ihnen **interessante Vorträge**, eine **erfolgreiche Tagung** und einen **angenehmen Aufenthalt** in Augsburg.

Durch den Tag werden Sie Herr Christian Daehn und Herr Rudolf Müller führen.

Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken

Dr.-Ing. Klaus Steier, E.ON Kraftwerke GmbH, München

Kommunale Abwässer stammen aus Haushalten und aus Gewerbe- sowie Industriebetrieben. Liegt keine Trennkanalisation vor, so kommt das Regensammelwasser von Dächern und Verkehrsflächen noch hinzu. Ziel der Reinigung der kommunalen Abwässer in den Kläranlagen ist es, alle im Wasser enthaltenen Inhaltsstoffe, also nicht nur die Nährstoffe und mineralischen Anteile, sondern auch die anorganischen und organischen Schadstoffe soweit als möglich als sogenannten Klärschlamm abzutrennen.

Anorganische Schadstoffe sind die Schwermetalle, wie z. B. Kupfer, Blei, Quecksilber usw. und deren chemische Verbindungen [1], [2]. Bei den organischen Schadstoffen handelt es sich um Kohlenwasserstoffverbindungen unterschiedlichster Zusammensetzung, deren direkte oder indirekte – d. h. über die Nahrungsmittelkette wirkende – negative Einflüsse auf den Menschen nachgewiesen sind. Zu diesen Schadstoffen gehören u. a. polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) und -furane (PCDF), polychlorierte Biphenyle (PCB), Tenside, Pestizide, Organozinnverbindungen und auch Antibiotika sowie Östrogene [3]-[8].

Die einzelnen Industriezweige belasten das Abwasser mit branchentypischen Schadstoffen (Abb. 1, [9]), wobei die Lebensmittelindustrie einen unerwartet hohen Beitrag leistet (Abb. 2, [9]).

Die Belastung der Klärschlämme durch Schwermetalle hat sich in den letzten Jahren, in erster Linie aufgrund der Indirekteinleiterverordnung deutlich reduziert (Abb. 3, [10]). Hiervon ausgenommen sind jedoch die Werte für Kupfer und Zink, die ihren Ursprung in den Materialien der Wasserzu- und -ableitungen sowie den Lebensmitteln haben. Auch einige organische Schadstoffkonzentrationen, z. B. von Dioxinen und Furanen sowie von PCB konnten verringert werden. Die Herkunft der derzeit noch vorhandenen anorganischen und organischen Restbelastung ist meist so diffus, dass eine weitere Entfrachtung des Abwassers nur auf lange Sicht möglich erscheint.

Bei der Verwertung des Klärschlammes in der Landwirtschaft oder bei Rekultivierungsmaßnahmen werden nicht nur die im Klärschlamm enthaltenen Düngeanteile, sondern auch die anorganischen und organischen Schadstoffe vollständig, d. h. zu 100 %, wieder auf Bodenflächen ausgebracht. Die Schadstoffe gelangen einerseits ins Grundwasser und in die Atmosphäre, andererseits über den Pflanzenanbau zurück in den Nahrungsmittelkreislauf. Die mangelnde Akzeptanz der Klärschlammdüngung bei den Verbrauchern, damit letztendlich bei den Landwirten, und auch die Begrenzung der Stickstoff- und Phosphatausbringung aufgrund der Düngeverordnung haben die Verwertung des Klärschlammes als Dünger in der letzten Zeit stark eingeschränkt.

Die thermische Entsorgung, d. h. die Verbrennung von Klärschlamm stellt die Alternative zur stofflichen Verwertung in der Landwirtschaft dar. Bei den zur Verfügung stehenden Verfahren bestehen große Unterschiede bezüglich der Qualität der Abgasreinigung, der Ausnützung der thermischen Energie und der Entsorgung der Verbrennungsrückstände (Abb. 4) [11]-[13]. Reine Abfallverbrennungsanlagen müssen die hohen Anforderungen der 17. BImSchV einhalten, während bei der Mitverbrennung dies bis zu einem Feuerungswärmeanteil von 25 % nur für den vom Abfall verursachten Abgasteilstrom gilt [14]. Im Übrigen werden die sogenannte Mischungsregel und sowohl die für die verschiedenen Mitverbrennungsanlagen als auch für alle Brennstoffe festgelegten Emissionsgrenzwerte angewendet. Mit der Novellierung der 17. BImSchV vom 14. August 2003 wurde

die Verbrennungsrichtlinie des Europäischen Parlamentes [15] in deutsches Recht umgesetzt. Die wesentlichste Änderung für die Mitverbrennung von Abfallstoffen in Kohlekraftwerken stellt die Reduzierung des Gesamtstaubgehaltes (Tagesmittelwert) im Abgas auf 10 mg/m^3 dar, die von vielen bestehenden Kraftwerken nicht eingehalten werden kann. Lediglich für Altanlagen, die die Mitverbrennung bis Ende 2004 aufgenommen hatten, gilt ein Grenzwert von 20 mg/m^3 . Die niedrigsten Anforderungen werden auch in Zukunft beim Einsatz von Abfallstoffen in Zement- und Kalkbrennanlagen gestellt.

Die im Abfall enthaltene Energie wird am besten direkt, d. h. ohne Wärmeübergangsverlust bei der Mitverbrennung in Zementwerken genutzt. Der thermische Wirkungsgrad der Kohlekraftwerke liegt in der Regel mit über 90 % deutlich über dem von Müllverbrennungsanlagen.

Da der Klärschlamm einen nicht brennbaren, mineralischen Anteil von 40 bis 50 % besitzt, kommt dessen Entsorgung eine recht große Bedeutung zu. Die Zusammensetzung der Klärschlamm-Asche eignet sich als Rohmehlanteil für Zement. Der Klärschlamm kann direkt in den Drehrohrofen aufgegeben werden. Er muss zuvor jedoch auf ca. 90 % TR (Trockenrückstand) getrocknet werden, um die Wärmebilanz des Brennprozesses aufrecht erhalten zu können. In den Kohlekraftwerken wird die Klärschlamm-Asche zusammen mit den Rückständen der Kohle entsorgt. Die Asche bzw. Schlacke von Steinkohle wird in der Baustoffindustrie verwertet. Bei Braunkohle wird der Rückstand meist in das Abbaugelände zurückgebracht, der Grobanteil teilweise im Straßenbau verwertet.

In der Müllverbrennungsanlage kann der Klärschlamm grundsätzlich mechanisch entwässert, teilgetrocknet oder vollgetrocknet aufgegeben werden. Die Stückgröße des mechanisch entwässerten Klärschlammes darf jedoch auf dem Rost nicht zu groß sein, um vollkommen auszubrennen. Dies erreicht man am besten mit der von Reimann entwickelten Schleudereinrichtung [16], die den Klärschlamm im Müllbunker aufstretet. Teilweise wird der Klärschlamm lediglich mit dem Greifer dem Müll untergemischt, dessen Erfolg stark von der Konsistenz des Schlammes abhängt. Der Schlammanteil darf 10 bis max. 20 % nicht überschreiten, da er sich andernfalls beim Handling wieder zusammenklumpen kann. Beim getrockneten Klärschlamm besteht die Gefahr, dass er durch den Rost hindurchrieselt, bevor er ausgebrannt ist. Die Rauchgasreinigung muss auf alle Fälle für den erhöhten Staubanfall ausgelegt sein.

Die Monoverbrennung erfolgt heute überwiegend im stationären Wirbelschichtofen. Bei mechanisch entwässertem Klärschlamm reicht der Heizwert meist für eine selbstgängige Verbrennung nicht aus. Es muss entweder mit Primärenergie zugefeuert oder der Schlamm zuvor auf ca. 45 % TR teilgetrocknet werden, was mit hohen Kosten verbunden ist. Stattdessen kann auch ein heizwertreicher Stoff, z. B. Kohle zugemischt werden. Die kostengünstigste Lösung stellt die Zugabe eines heizwertreichen Abfallstoffes wie Tiermehl dar. Bei vollgetrocknetem Klärschlamm muss entweder die Wirbelschicht gekühlt oder eine zirkulierende Wirbelschicht eingesetzt werden, um ein Schmelzen der Asche zu verhindern. Zu den hohen Trocknungskosten kommt hier noch die recht aufwendige Verfahrenstechnik hinzu. Die bei der Monoverbrennung anfallende Asche ist sehr fein und wird meist unter Tage als Bergwerksversatz entsorgt. Ein Einschmelzen der Asche in einer Kupferhütte mit anschließender Verwertung als Wasserbaustein – wie in Hamburg praktiziert – ist verfahrenstechnisch optimal, jedoch sehr kostspielig.

Sowohl in Braun- als auch Steinkohlekraftwerken kann Klärschlamm in mechanisch entwässert, teilgetrocknet oder vollgetrockneter Form mitverbrannt werden. Die 25 %-Grenze für den Feuerungswärmeanteil aus der 17. BImSchV für die Mischungsregel kann bei weitem nicht ausgenutzt werden. Um den Kraftwerksbetrieb und vor allem die Rauchgaswerte sowie die Verwertung der

Kraftwerksrückstände (Schlacke, Asche, REA-Gips) nicht zu gefährden, bleibt man in der Praxis weit unter 25 %. Die eigenen Erfahrungen sowie die anderer Kraftwerke haben gezeigt, dass bis zu einem Feststoffanteil von 5 % keine bzw. beherrschbare Probleme auftreten, was einem Feuerungswärmeanteil von unter 2 % entspricht [17].

Voraussetzung für die Mitverbrennung von 5 % Klärschlamm zur Kohle ist in jedem Fall, dass die für die Kohle im Kraftwerk vorhandenen Mahltrocknungsanlagen genügend Trocknungsleistung aufweisen. Diese Trocknungsanlagen wurden meist mit Reservekapazität ausgelegt, die jetzt für den Klärschlamm genutzt werden kann. Da die Braunkohle mit wesentlich mehr Wasser, oft über 50 %, am Kraftwerk angeliefert wird als die Steinkohle (6 bis 8 %), steht in den Braunkohlekraftwerken in der Regel auch mehr Restwärme zur Verfügung.

Weitere Einschränkungen für den mitzuverbrennenden Klärschlammanteil ergeben sich für sogenannte Trockenfeuerungen, d.h. Feuerungen, deren Asche staubförmig und nicht als flüssige Schlacke abgezogen wird. Steinkohlefeuerungen können, abhängig von der Feuerraumtemperatur, sowohl „trocken“ als auch „nass“, d. h. mit Schlackenaustrag gefahren werden, Braunkohle aufgrund des geringeren Heizwertes nur trocken.

Bei Trockenfeuerungen sind zwei Punkte zu beachten. Zum einen betrifft dies die Erniedrigung des Schmelzpunktes der Asche, der durch den mineralischen Anteil des Klärschlammes, hauptsächlich den Kalk beeinflusst wird. Der Kalkanteil liegt, nur durch die Wasserhärte der entsorgten Region bedingt, teilweise über 10 %. Es muss bei unveränderten Temperaturverhältnissen sichergestellt sein, dass es nicht zu Anbackungen im Kessel kommt. Zum anderen soll die Asche trotz Klärschlammzugabe weiterhin verwertbar bleiben. DIN EN 450 [18] schreibt vor, dass bei Verwertung der Flugasche von Steinkohle (SK) als Zuschlagstoff für Beton der Klärschlammanteil nicht höher als 5 % TS liegen darf. Bei Braunkohle (BK) gilt diese Norm nicht, wird aber ebenfalls als Richtlinie angesehen.

Eine grobe Abschätzung der maximalen, theoretischen Mitverbrennungskapazität der in der BRD betriebenen Kohlekraftwerke kann man aufgrund der effektiven jährlichen Stromleistung vornehmen [19]. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade wurde über den im Jahr 1999/2000 abgegebenen elektrischen Strom die für die Erzeugung erforderliche Stein- bzw. Braunkohlemenge errechnet (Abb. 5).

Würden alle Kohlekraftwerke in der BRD die Mitverbrennung von Klärschlamm mit einem Trockensubstanzanteil von 5 % Klärschlamm zur Kohle aufnehmen, so ergäbe sich theoretisch für den Klärschlamm eine Entsorgungskapazität von ca. 5,2 Mio. t Trockensubstanz (TS) pro Jahr. Für die im Jahr 2003 um ca. 24 % erhöhte Stromerzeugung errechnet sich sogar eine theoretische Kapazität von 6,4 Mio t TS. Dieser Wert würde fast dreimal so hoch sein als der tatsächliche Klärschlammfall im Jahr 2004 (ca. 2,26 Mio t TS [20]), der für die nächsten Jahre gleichbleibend angenommen werden kann. Die effektiven Möglichkeiten der Kraftwerke sind in der Praxis jedoch wesentlich ungünstiger:

1. Vor allem bei Steinkohlekraftwerken reicht die zur Verfügung stehende Restwärme oft nur zur Trocknung eines Klärschlammanteils von 2 bis 3 % TS aus.
2. Bei den sogenannten Mittellastkraftwerken, wie die meisten Steinkohlekraftwerke eingesetzt werden, wird oft im Teillastbetrieb gefahren, bei dem ein deutlich niedriger Restwärmeanteil für die Klärschlamm-trocknung zur Verfügung steht als bei Volllast.
3. Nicht bei allen Kraftwerken sind die technischen und räumlichen Voraussetzungen für eine Klärschlammannahme und -mitverbrennung gegeben.

4. Die Verwertung von Asche bzw. Schlacke und REA-Gips darf nicht gefährdet werden.
5. Akzeptanz bei Kraftwerk und Bevölkerung sowie behördliche Genehmigung müssen vorliegen.
6. Die Restlaufzeit des Kraftwerkes muss die erforderliche Investition absichern.

Die Anfang 2003 ermittelten Daten der in der BRD vorhandenen thermischen Entsorgungskapazitäten für kommunalen Klärschlamm [21], [22] wurden im Frühjahr 2004 teils vom UBA (Umweltbundesamt, Berlin) [23], teils durch eigene Recherchen überprüft und ergänzt. Die Ergebnisse sind in Abbildungen 6, 7 und 8 zusammengefasst. Es wurden, soweit bekannt, alle Anlagen berücksichtigt, die bis Ende 2004 in Dauerbetrieb gegangen sind. Die Angaben für die Kohlekraftwerke entsprechen dem Stand vom 31.05.2006.

Durch die Mitverbrennung in den Kohlekraftwerken können jährlich ca. 669.000 t TS, über Monoverbrennungsanlagen ca. 617.000t TS und in Hausmüllöfen ca. 83.000t TS entsorgt werden. Insgesamt ist derzeit eine thermische Kapazität von ca. 1.370.000t TS pro Jahr, d.h. für mehr als 61 % des in der BRD anfallenden kommunalen Klärschlammes vorhanden.

Bei der obigen Auflistung ist die Verwertungskapazität der Zementindustrie noch nicht berücksichtigt, die im Wesentlichen für thermisch getrockneten Klärschlamm besteht. Da wie oben bereits erwähnt, das Trocknen von mechanisch entwässertem Klärschlamm sehr kostenintensiv ist, steht jedoch zur Zeit nur sehr wenig Trockengut zur Verfügung. In den Zementwerken fällt andererseits beim Kühlen des gebrannten Klinkers bisher meist ungenutzte Abwärme an, die für die Klärschlamm-trocknung geeignet ist. In Süddeutschland wurde bereits eine große Trocknungsanlage mit einer Wasserverdampfungsleistung von 8 t/h gebaut.

Die Großkraftwerkbetreiber ENBW, E.ON, RWE und Vattenfall haben schon am 01. März 2004 bei einem Gespräch mit BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) und UBA in Bonn dargelegt, dass allein in den von Ihnen betriebenen Kohlekraftwerken und sonstigen Verbrennungsanlagen im Bedarfsfall ca. 1,41 Mio. t TS/a Klärschlamm entsorgt werden könnten. Zusammen mit den bestehenden Monoverbrennungsanlagen, MVA's und weiteren Kraftwerken müssten lediglich noch zusätzlich Verbrennungskapazitäten von ca. 300.000 t TS/a in der Zementindustrie und/oder erforderlichenfalls in zusätzlichen Monoanlagen geschaffen werden, um den gesamten in der BRD anfallenden Klärschlamm von ca. 2,26 Mio. t TS/a zu entsorgen. Monoanlagen würden gleichzeitig die Möglichkeit bieten, den im Klärschlamm enthaltenen Phosphor aus der Asche zurück zu gewinnen, was allerdings derzeit noch sehr kostenintensiv ist.

Aufgrund der starken Zunahme der Windenergie in den letzten Monaten wird der Einsatz der Kohlekraftwerke immer unregelmäßiger. Allein bei E.ON beträgt deren elektrische Leistung unter günstigen Windbedingungen bereits 5.000 MW, wodurch bis zu 10 Kraftwerke abgeschaltet, bzw. auf minimale Leistung gedrosselt werden müssen und somit keinen Klärschlamm verbrennen können. Da die Wetter- und Windentwicklungen oft unvorhersehbar sind, darf zur Gewährleistung der Entsorgungssicherheit die theoretische Mitverbrennungskapazität der einzelnen Kraftwerke bei weitem nicht voll ausgeschöpft werden. Für die Zukunft wird bereits daran gedacht, ergänzend Monoverbrennungsanlagen zu errichten. Dies würde vorwiegend an Kraftwerksstandorten erfolgen, um Synergieeffekte nutzen und damit die Entsorgungskosten so niedrig als möglich halten zu können.

Der Ausbau der Monoverbrennungskapazitäten erfolgt jedoch nur, wenn durch gesetzliche Regelungen sichergestellt ist, dass der alternative stoffliche Verwertungsweg (Landwirtschaft, Landbau,

Rekultivierung) nur noch für die hochwertigen Klärschlammqualitäten zur Verfügung steht und damit alle anderen Mengen tatsächlich den thermischen Entsorgungsweg gehen.

Die von den Bundesministerien für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft sowie für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Mitte 2002 vorgeschlagenen Werte [24] würden eine landwirtschaftliche Ausbringung von kommunalem Klärschlamm unmöglich machen. Insbesondere stehen einem Wert für Kupfer in Höhe von max. 80 mg/kg TS aktuelle Analysenwerte von 300 bis 600 mg/kg TS und für Zink mit max. 450 mg/kg TS Werte von 1.000 bis 1.500 mg/kg TS gegenüber. In den Niederlanden ist bereits seit 1995 durch eine ähnliche Verordnung die landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes völlig zum Erliegen gekommen. Nachdem lange Zeit über eine Novellierung der AbfallKlärV nichts mehr zu hören war, wurde nun für den Herbst dieses Jahres ein neuer Entwurf mit entschärften Cu- und Zn-Werten, aber zusätzlichen organischen Parametern angekündigt.

Die Mitverbrennung von kommunalem Klärschlamm wird sowohl in Stein- als auch Braunkohlekraftwerken betrieben. Sie kann inzwischen als eine erprobte Technik bezeichnet werden. Der Klärschlamm muss zunächst in der Kläranlage mechanisch auf einen Feststoffanteil von ca. 25 bis 35 % TR mit Hilfe von Kammerfilterpressen, Bandfilterpressen oder Zentrifugen entwässert werden. Hierbei ist vor allem bei kleineren Kläranlagen die Rückbelastung durch das Ablaufwasser (Filtrat, Zentrat) zu beachten.

Der Transport des mechanisch entwässerten Klärschlammes zum Kraftwerk ist grundsätzlich über die Straße oder den Schienenweg möglich (Abb. 9). Die kostengünstigste Variante der einzelnen Verfahrensschritte ist jeweils durch Fettschrift hervorgehoben. Je größer die Transporteinheit auf der Straße ist, desto kostengünstiger ist sie. Dabei sind jedoch die räumlichen Verhältnisse und die Verlademöglichkeit auf der Kläranlage zu beachten. Sattelaufleger haben eine Ladehöhe von ca. 3,5 m bis 4,0 m, was nur mit speziellen Schaufelladern oder Verloaderampen zu bewerkstelligen ist.

Die Kosten des Bahntransportes liegen erfahrungsgemäß etwas über denen der Straße, was durch die eingeführte Autobahnmaut abgeschwächt wurde. Es ist stets ein Vor- und Nachlauf erforderlich, d. h. die Behälter müssen zum Be- und Entladen mit einem LKW vom Waggon geholt werden. Das sogenannte ACTS-System verwendet Abrollcontainer, weswegen die Verkehrsfläche Gleiseben sein muss. Die Absetzmulden des AWILOG-Systems sind kleiner, was die Anzahl der LKW-Bewegungen erhöht. Wegen des zeitaufwendigen LKW-Einsatzes beim Vor- und Nachlauf ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht ein Bahntransport nur bei größeren Entfernungen sinnvoll.

Die Annahme des Klärschlammes im Kraftwerk kann entweder über einen Bunker oder in einer Kipphalle erfolgen. Der Vorteil eines Annahmehubers liegt darin, dass eventuell im Klärschlamm enthaltene Fremdstoffe dem Anlieferer zugeordnet werden können, eine Situation, deren psychologischer Effekt sich bewährt hat. Die einzelnen Lieferungen werden erst entladen, wenn die vorhergehende Charge kontrolliert, d. h. ohne Betriebsstörung abgepumpt ist. Als Austrageeinrichtung für den Bunker hat sich der Schubrahmen mit nachgeschalteter Schnecke bewährt. Die Schnecke kann gleichzeitig als Vorpresseinrichtung für eine Kolbenpumpe verwendet werden, die mit Hilfe von Gleitmittelstationen auch bei Förderlängen über 200 m bis zu einem TR-Gehalt des Klärschlammes von ca. 35 % einsetzbar ist. Exzentrerschneckenpumpen zeigen bei höheren TR-Gehalten einen sehr starken Verschleiß. Förderschnecken bereiten bei wechselndem TR-Gehalt Probleme, während Kratzförderer einen sehr großen Platzbedarf haben.

Will man eine Kolbenpumpengröße mit einem günstigen Preis-Leistungsverhältnis einsetzen, so ergeben sich Abpumpzeiten pro Sattelaufleger von knapp einer Stunde. Vor allem bei größeren Transportentfernungen sind die Ankunftszeiten nicht genau bestimmbar. Um Wartezeiten zu vermeiden, hat sich der Einsatz von mindestens zwei Annahmehaltern bewährt. Um Störungen beim Austrag aus dem großen Silo vorzubeugen – diese Pumpen haben nur etwa die halbe Förderleistung wie die der Annahmehalter, sind wesentlich kleiner dimensioniert und deshalb störanfälliger – befindet sich in der Leitung zwischen Pumpe und Vorratssilos ein Siebkorb zur Abscheidung evtl. Fremdkörper größer ca. 30 mm. Trotzdem sollte der Schubrahmen dieses Silos zweigeteilt ausgeführt werden, um im Falle eines Verklemmens eine Entleerung über eine Rahmenhälfte sicherstellen zu können.

Verzichtet man auf die Möglichkeit, Störstoffe im Klärschlamm einem Anlieferer zuzuordnen, so kann die weniger aufwendige Lösung mit einer Abkipphalle gewählt werden. – Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist eine visuelle Kontrolle des Klärschlammes jedoch beim Abkippen nur sehr begrenzt möglich. – Diese Halle, je nach Genehmigung in geschlossener oder seitlich offener Ausführung, hat eine um ca. 1,5 m abgesenkte Lagerfläche, so dass die LKW's ohne Verschmutzung der Reifen zügig abkippen können. Mit Hilfe eines Schaufelladers mit klimatisierter Fahrerkabine kann die Annahmehalle gleichzeitig als Zwischenspeicher für den Klärschlamm verwendet werden.

Zum Ausgleich von Schwankungen der Verbrennungskapazität des Kraftwerks als auch des Schlammmanfalls in den Kläranlagen, sollte die Zwischenspeicherkapazität mindestens der Verbrennungsleistung von 2 Tagen entsprechen. Andernfalls muss für einen plötzlichen Ausfall des Kraftwerks eine Notannahmemöglichkeit für Fahrzeuge geschaffen werden, die bereits zum Kraftwerk unterwegs sind. Für Speicherkapazitäten von mehr als 1.000 t bieten sich Lagerhallen mit einem automatischen Kransystem an.

Bei der Mitverbrennung des Klärschlammes im Kraftwerk mit der heute üblichen Staubfeuerung hat sich verfahrenstechnisch die Zugabe in die Kohlemühlen bewährt, wie auch das Schema des Kraftwerks Franken II zeigt (Abb. 10). Der Klärschlamm wird zusammen mit der Kohle vermahlen, getrocknet und gleichzeitig mit der Kohle homogen vermischt.

Die Zugabe des Klärschlammes auf das vorhandene Kohleband zum sogenannten Tagesbunker ist die kostengünstigste Variante. Sie scheitert aber oft an genehmigungsrechtlichen Fragen (Geruchsbelästigung, Hygiene, Gefahr der Methanbildung). Von Nachteil ist außerdem, dass der Klärschlammanteil an der Kohle bei der im Tagesbunker enthaltenen Menge nicht mehr verändert werden kann. Fördert man den Klärschlamm separat bis zum Fallschacht der Mühlen, so kann dieses Verhältnis jederzeit z. B. dem Anfahr- oder Teillastbetrieb angepasst werden.

Die Dosierung des Klärschlammes im Verhältnis zur Kohle kann ausreichend genau mit Kolbenpumpen vorgenommen werden. Wird der Klärschlamm in einer Halle zwischengelagert, so muss ein Aufgabetrichter installiert werden. Die Kapazität sollte mindestens für eine Volllaststunde ausreichen, da die Beschickung zweckmäßigerweise mit demselben Schaufellader erfolgt, der den Klärschlamm von der Abkipfläche wegschafft.

Während bei der Schlamm dosierung auf das Kohleband nur eine Aufgabestelle zu versorgen ist, sind es beim Mühlenfallschacht mindestens vier je Kraftwerksblock. Eine vollkommene gleichmäßige Beschickung der Mühlen ist nur möglich, wenn jeder Mühle ein Vorlagesilo zugeordnet wird, das taktweise nachgefüllt wird (Abb. 11).

Anstatt Dosiersilos vor die einzelnen Mühlen zu schalten, kann der entwässerte Klärschlamm den Kohlemühlen auch direkt mit Hilfe von Taktventilen zugepumpt werden. Diese kostengünstige Verfahrensweise führt zu einer schubweisen Dosierung und wurde unter anderem in den Kraftwerken Boxberg (Abb. 12) und Zolling realisiert. Sie kann erfahrungsgemäß bei den relativ unempfindlichen Prallmühlen für Braunkohle, bzw. bei einer nicht zu großen Anzahl von Rollenmühlen für Steinkohle angewendet werden. Für Kugelmühlen ist das Taktsystem weniger geeignet.

Der mechanisch entwässerte Klärschlamm kann auch mit sogenannten Dampfzügen direkt dem Kessel zugeführt werden, wie auf dem Verfahrensschema ebenfalls dargestellt. Der Dampf hat dabei die Aufgabe, den Klärschlamm so fein zu „zerstäuben“, dass keine unverbrannten Anteile in die Asche gelangen. Um dies sicherzustellen, muss der Austrittsquerschnitt der Düsen klein gehalten werden, wodurch das System sehr empfindlich auf Fremdkörper reagiert.

Thermisch getrockneter Klärschlamm, dessen TR-Gehalt wegen der pneumatischen Förderung in der Regel über 90 % liegen muss, kann analog dem mechanisch entwässerten im Kraftwerk gehandhabt werden, wie auch auf Abbildung 11 beispielhaft dargestellt ist.

Teilgetrocknete Schlämme, wie sie z. B. in Solartrocknungsanlagen anfallen, können weder gepumpt, noch pneumatisch transportiert werden. Für sie müssen extra mechanische Fördereinrichtungen, Schnecken, Rohrketten- oder Kratzförderer eingesetzt werden.

Durch die Beimischung des Klärschlammes nimmt die Mahlbarkeit der Kohle ab. Die härtere Kohle wird in den weichen Klärschlamm „eingebettet“. Hierdurch steigt die Umlaufzahl der Mühle und damit deren Füllungsgrad. Bei einer Verringerung des Klärschlammanteils muss daher mit erhöhtem Mühlenaustrag und umgekehrt gerechnet werden.

Die für die Trocknung notwendige Energie wird dem Rauchgas durch zwei dem Dampferzeuger nachgeschalteten Rauchgas-Luftvorwärmern (RG-Luvo) entzogen (Abb. 10). Es wird also für die Trocknung – anders als bei separaten Trocknungsanlagen – keine Primärenergie, sondern Restwärme, Abfallwärme eingesetzt. Im Schmelzkammerkraftwerk Franken II wird die in den RG-Luvos vorgewärmte Heißluft mit ca. 310°C von unten in die Mühlen eingeblasen. Zusammen mit dem Kohlestaub wird der getrocknete Klärschlammstaub bei einer Temperatur von ca. 90°C durch die Heißluft aus den Mühlen ausgetragen. In den Brennern wird der Brennstoffstaub mit weiterer Heißluft, ebenfalls erwärmt durch die RG-Luvos, vermischt, in den Feuerraum des Dampferzeugers eingedüst und bei Temperaturen von über 1500°C verbrannt, wobei die organischen Schadstoffe, wie Dioxine und Furane mit Sicherheit vollständig zerstört werden. Mit der erforderlichen Temperatur von 330°C treten die Rauchgase nach dem Dampferzeuger zunächst in den DeNO_x-Katalysator und anschließend in die RG-Luvos ein und verlassen letzteren mit einer Temperatur von ca. 140°C. Im nächsten Schritt reinigt ein Elektrofilter das Rauchgas zu fast 100 % vom Staub, der anschließend wieder der Brennkammer zum Einschmelzen zugeführt wird. Vor Eintritt in den Rauchgaswäscher wird die Temperatur der Rauchgase mittels Regenerativem-Rauchgasvorwärmer (Regavo) auf 85°C reduziert und gleichzeitig die Rauchgastemperatur nach dem Wäscher von 45°C auf 85°C wieder aufgeheizt.

Auch die Mengenbilanz geht aus Abbildung 10 hervor. Durch die Zugabe von 6,5 t/h Klärschlamm-trockensubstanz erhöht sich praktisch nur die Granulatmenge durch den mineralischen Anteil des Klärschlammes, d.h. um ca. 3 t/h gegenüber reinem Kohlebetrieb.

Die Klärschlammspezifikation (Abb. 13) wird einerseits durch die Genehmigungsaufgaben, andererseits durch das Klärschlamm-Handling im Kraftwerk bestimmt. Die Genehmigung für das Kraftwerk Zolling erlaubt die Mitverbrennung von kommunalem und industriellem Klärschlamm, des-

sen Eigenschaft dem von kommunalem ähnlich ist. Die Schadstoffgehalte müssen, wie bei fast allen anderen Kraftwerken, die Grenzwerte der AbfKlärV einhalten. Zumindest bei den organischen Schadstoffen, wie Dioxinen und Furanen, ist diese Begrenzung nicht ganz verständlich, weil sie im Feuerraum vollständig zerstört werden. Da der mechanisch entwässerte Klärschlamm im Kraftwerk über größere Entfernungen gepumpt werden muss, sollte er keinen Kalkzuschlag enthalten und der TR-Gehalt nicht über 35 % liegen. Soll thermisch getrockneter Klärschlamm mitverbrannt werden, so muss der TR-Gehalt mindestens 90 % betragen, um einem Anbacken in den pneumatischen Förderleitungen und einem Klumpen auch bei hohen Auflasten im Zwischensilo vorzubeugen. Die maximale Korngröße sollte 15 mm nicht überschreiten. Fremdstoffe, wie Schrauben, Bolzen oder Steine können beim entwässerten als auch beim getrockneten Klärschlamm zu Förderproblemen führen und sind daher auf eine Kantenlänge von maximal 10 mm begrenzt.

Die mit den Kommunen oder Zweckverbänden abgeschlossenen Verwertungsverträge gehen entweder vom gesamten in der Kläranlage übers Jahr anfallenden Klärschlamm aus oder von einer fest vereinbarten Teilmenge. Die Teilmengen sind Mindestmengen, bei deren Unterschreitung ein Leistungsbereitstellungspreis für jede nicht gelieferte Tonne zu bezahlen ist. Die Abnahme von darüber hinausgehenden Mengen hängt von der jeweiligen Kapazität der Kraftwerke ab. Reservekapazitäten sind grundsätzlich erforderlich, um die Schwankungen des Klärschlammmanfalls der voll zu entsorgenden Kläranlagen aufzufangen. Auch bei Kläranlagen mit kontinuierlicher Entwässerung kann sich erfahrungsgemäß kurzfristig die täglich anfallende Menge verdoppeln oder halbieren. Die Ursachen sind vielfältig, z. B. Unterbrechung eines größeren Fertigungs- oder Verarbeitungsbetriebes mit hohen Abwasserfrachten, starker Regen nach einer längeren Trockenperiode oder starke Veränderung der Entwässerbarkeit des Schlammes. Viele Kläranlagen unter etwa 50.000 EW-Ausbau entwässern zudem mobil oder mit dem eigenen Aggregat periodisch.

Bis zur Stilllegung im April 2001 wurden im Kraftwerk Franken II bei Erlangen ca. 120.000 t Klärschlamm, davon ca. 25.000 t in thermisch getrocknetem Zustand, mitverbrannt; im Kraftwerk Zolling bei München waren es bis heute fast 220.000 t mechanisch entwässerter Schlamm. Allein im letzten Jahr wurden von E.ON insgesamt ca. 450.000 Tonnen Klärschlamm, bezogen auf den Anlieferungszustand, in Kohlekraftwerken verbrannt.

Welcher Entsorgungsweg für den Klärschlamm in Zukunft eingeschlagen wird, hängt nicht nur von den Kapazitäten ab, sondern auch ganz wesentlich von den Kosten. Regional bestehen große Unterschiede der Entsorgungskosten, die sich aus den Transport- und Annahmepreisen zusammensetzen. Abbildung 14 kann daher nur als grobe Richtwerttabelle angesehen werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Verbrennung in Kohlekraftwerken wesentlich kostengünstiger ist als in Müll- oder Monoverbrennungsanlagen. Alle Einrichtungen für die Verbrennung, einschließlich der Abgasreinigung sind im Kraftwerk vorhanden und durch die Stromerzeugung bereits finanziert. Lediglich die Klärschlammannahme, -Zwischenlagerung und -Dosierung müssen noch installiert werden. Die Kosten einer Müll- bzw. Monoverbrennung werden dagegen in erster Linie durch die Annahmehöhen gedeckt. Wegen fehlender Auslastung haben derzeit einige Monoverbrennungsanlagen den Preis für die Klärschlammannahme noch unter die Selbstkosten gesenkt.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken wird in den meisten Bundesländern als eine energetische Verwertung im Sinne des KrW-/AbfG anerkannt. Als Voraussetzung für eine energetische Verwertung schreibt § 6 KrW-/AbfG u. a. einen Mindestheizwert von 11.000 kJ/kg und einen Feuerungswirkungsgrad von mindestens 75 % vor. Letzterer ist im Kraftwerk mit über 90 % immer erfüllt. Der Heizwert des Klärschlammes hängt von seiner Zusammensetzung und damit auch vom Ausfäulungsgrad ab. Er unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen.

Für die Energiebilanz, d. h. Energieausbeute bei der Verbrennung ist der Zustand des Abfalls zu Beginn, d. h. kurz vor der Verbrennung entscheidend. Im speziellen Fall der Mitverbrennung im Kraftwerk wird der Klärschlamm unmittelbar vor dem Verbrennungsvorgang zusammen mit der Kohle getrocknet (Mahltrocknung) und zwar sowohl der mechanisch auf 20 – 35 % TR entwässerte als auch der thermisch auf > 90 % TR „vorgetrocknete“ Klärschlamm. In beiden Fällen hat der Klärschlamm nach der Mahltrocknung einen Wassergehalt von max. 1 %, wahrscheinlich sogar deutlich unter 1 %, wodurch der Mindestheizwert von 11.000 kJ/kg in der Regel überschritten wird.

Zusammenfassung

Die Verwertung des Klärschlammes in Kohlekraftwerken bietet folgende Vorteile:

- Aufgrund langjähriger Erfahrung mehrerer Kraftwerke kann die Mitverbrennung als ein technisch erprobter Verwertungsweg angesehen werden.
- Es kann auf eine jahrzehntelang bewährte Kraftwerkstechnik zurückgegriffen werden.
- Die Rauchgasreinigungsanlagen arbeiten zuverlässig und unterschreiten die geforderten Mischgrenzwerte bei der Mitverbrennung von Klärschlamm entsprechend der 13. BImSchV (Großfeuerungsanlagen) und der 17. BImSchV (Rauchgasanteil des Abfalls, d. h. des Klärschlammes) deutlich ohne Nachrüstung.
- Die im Klärschlamm enthaltenen organischen Schadstoffe, wie z. B. Dioxine und Furane werden bei den im Feuerraum herrschenden Temperaturen von über 1.000°C vollständig zerstört [25]. Eine De-novo-Synthese findet im Rauchgas praktisch nicht statt [26], da
 - alle zyklischen Kohlenwasserstoffe so weitgehend zerstört werden, dass keine Reste zur Neubildung zur Verfügung stehen
 - kein Kupfer als Katalysator in der kritischen Abkühlphase des Rauchgases vorhanden ist
 - Chlor- und Sauerstoffkonzentration gering sind
 - das Schwefel-Chlor-Verhältnis relativ hoch ist
 - die Verweilzeit des Rauchgases im Bereich der kritischen Temperaturen zwischen ca. 250°C und 350°C sehr kurz ist (kleiner 1 sec)
- Die als schwerflüchtige Schwermetalle im Klärschlamm enthaltenen anorganischen Schadstoffe werden in der Asche bzw. der Schlacke Eluat-sicher eingebunden. Die Zusammensetzung der Asche bzw. Schlacke ändert sich durch die Mitverbrennung von Klärschlamm nicht signifikant, so dass deren Verwertung in der Bauindustrie weiterhin gewährleistet ist. Das leichtflüchtige Schwermetall Quecksilber wird, vor allem beim Vorhandensein einer High-Dust-Denox-Anlage – d. h. dem Einsatz eines Katalysators für die Stickoxidreduktion noch vor dem Staubfilter – [27], bevorzugt im REA-Gips abgeschieden. Hierdurch wird die Qualität des REA-Gipses jedoch nicht beeinträchtigt, so dass auch er weiterhin in der Baustoffindustrie verwertet werden kann.
- Auch der mineralische Anteil des Klärschlammes (ca. 50 %) wird in Steinkohlekraftwerken zusammen mit der Kohleasche bzw. -schlacke in der Baustoffindustrie verwertet.
- Da der Klärschlamm aufgrund der Herkunft seiner Bestandteile aus kurzzeitigen Kreisläufen als weitgehend CO₂-neutral angesehen wird, erstreckt sich die Einsparung über das Finanzielle hinaus auch auf die Emissionen des Treibhausgases CO₂.
- Die Beifeuerung von Klärschlamm erfolgt in den Kraftwerksanlagen mit einer thermodynamisch hochwertigen Auslegung bei einem elektrischen Bruttowirkungsgrad von rund 42 %. Der Feuerungswirkungsgrad liegt bei 95 %.

- Im Gegensatz zur Ausbringung von Klärschlamm auf die Felder oder bei der Rekultivierung werden bis zu 99 % der Schwermetalle sicher der Umwelt entzogen.
- Die Mitverbrennung von Klärschlamm im Kraftwerk wird als energetische Verwertung im Sinne des KrW-/AbfG eingestuft. Der Klärschlamm besitzt nach dem Trocknen mit Abwärme in den Kohlemühlen, d. h. vor dem eigentlichen Verbrennungsvorgang, im Durchschnitt den geforderten Mindestheizwert von 11.000 kJ/kg [28].
- Die Mitverbrennung in Kraftwerken ist eine kostengünstige Variante im Vergleich zur Mitverbrennung in Müll- oder Monoverbrennungsanlagen und entlastet daher auch den Gebührenzahler.
- Im Bedarfsfall kann die thermische Entsorgungskapazität der BRD in einem Zeitraum von 2 bis 3 Jahren auf den gesamten Klärschlammanfall erweitert werden.

Literatur

- [1] ATV-Informationsschrift Schwermetalle im Abwasser der ATV-Arbeitsgruppe 0.01, 1983
- [2] J. Giglberger, H. Hruschka:
Bausteine für ein flexibles Konzept zur Klärschlamm Entsorgung aus bayerischer Sicht.
Abfallwirtschaft am Wendepunkt, TK Verlag Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 1997, S. 901 ff
- [3] U. Drescher-Kaden, R. Brüggemann, M. Matthies:
Organische Schadstoffe in Klärschlämmen. Literaturstudie im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz, Nov. 1988, S. 1 – 173
- [4] W. Liesegang, N. Zullei-Seibert:
Organische Spurenstoffe im Sicker- und Grundwasser bei landwirtschaftlicher Nutzung von Klärschlamm. Bericht im Auftrag des Umweltamtes, Institut für Wasserforschung GmbH, Dortmund, Mai 1996, S. 1 – 188
- [5] N.N.: Arzneimittelrückstände belasten die Gewässer.
Spiegel-Archiv 26/96, S. 154 – 155
- [6] M. Weil:
Arzneimittel – schädlich für die Umwelt? VDI-Nachrichten, 17. Dez. 99, S. 28
- [7] D. Weltin, M. Gehring, L. Tennhardt, D. Vogel, B. Bilitewski:
Abbau, Bildung und Transportwege endokrin wirksamer Substanzen bei der biologischen Abwasser- und Klärschlammbehandlung
Seminar VDI-Wissensforum GmbH; Klärschlamm, Tiermehl, Gülle, Biogene Abfälle; Bamberg 13.-14.02.2003
- [8] E. Hartmann, W.-A. Bischoff, M. Kaupenjohann:
Untersuchung von Klärschlamm auf ausgewählte Schadstoffe und ihr Verhalten bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung
Forschungsbericht 298 33 757 Umweltbundesamt Texte 20/04, Juni. 2004, S. 1 – 228

- [9] M. Ried:
Schwermetallelimination aus Klärschlamm – kritische Beurteilung der Möglichkeiten eines Säureverfahrens
Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen Technische Universität München Nr. 92, München, TU München, 1990
- [10] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)
Klärschlamm, Daten + Fakten + Ziele
Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 15. 01. 2003
- [11] H. Fehrenbach, A. Franke, B. Franke, A. Patyk, R. Six:
Vergleichende Untersuchung zu den Umweltauswirkungen unterschiedlicher Verfahren der Behandlung von Klärschlamm aus Bremen.
Endbericht der ifeu GmbH, Heidelberg, Dez. 1994
- [12] Th. Gerhardt, H. Spliethoff, K. Hein:
Bedarf von thermischen Behandlungsverfahren für kommunalen Klärschlamm
Entsorgungs-Praxis (1997) 3, S. 40 – 47
- [13] H. Gutberlet, A. Spiesberger, F. Kastner, J. Tembrink:
Zum Verhalten des Spurenelementes Quecksilber in Steinkohlefeuerungen mit Rauchgas- Reinigungsanlagen
VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992) 7, S. 636 – 641
- [14] N.N.: 17. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (17. BImSchV) vom 14.08.2003
- [15] N.N.: Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 332/91-L332/111
- [16] D. O. Reimann: Gemeinsame Verbrennung von Klärschlamm mit Hausmüll
Seminar VDI-Bildungswerk GmbH. Techniken der Klärschlamm-Entsorgung
Grenzwerte-Entwässerung-Trocknung-Verwertung-Verbrennung,
Bamberg, 25.-26.03.1999
- [17] K. Steier: Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk – Ein preiswertes Verwertungsverfahren. Erste Betriebserfahrungen
Seminar VDI-Bildungswerk GmbH. Kommunaler und industrieller Klärschlamm
Verwertung/Behandlung/Beseitigung, Bamberg, 25.-26.03.1999
- [18] N.N.: Zu DIN EN 450: 1995-01
Mitteilungen DIBt Sonderheft 18, S. 61-62
- [19] K. Steier: Voraussetzungen und Potentiale der Mitverbrennung von Klärschlamm im Kraftwerk
Euroforum Konferenz: Klärschlamm
Landwirtschaftliche Verwertung oder Verbrennung – was ist die Lösung?
München, 12. Nov. 2001
- [20] Statistisches Bundesamt, Gruppe VII B, Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2004, -Ausgewählte vorläufige Ergebnisse-, Teil II, S. 9
- [21] K. Steier: Ist die thermische Entsorgung aller Klärschlamm in der BRD kurzfristig gewährleistet?
36. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft
Aachen, 26.03-28.03.2003

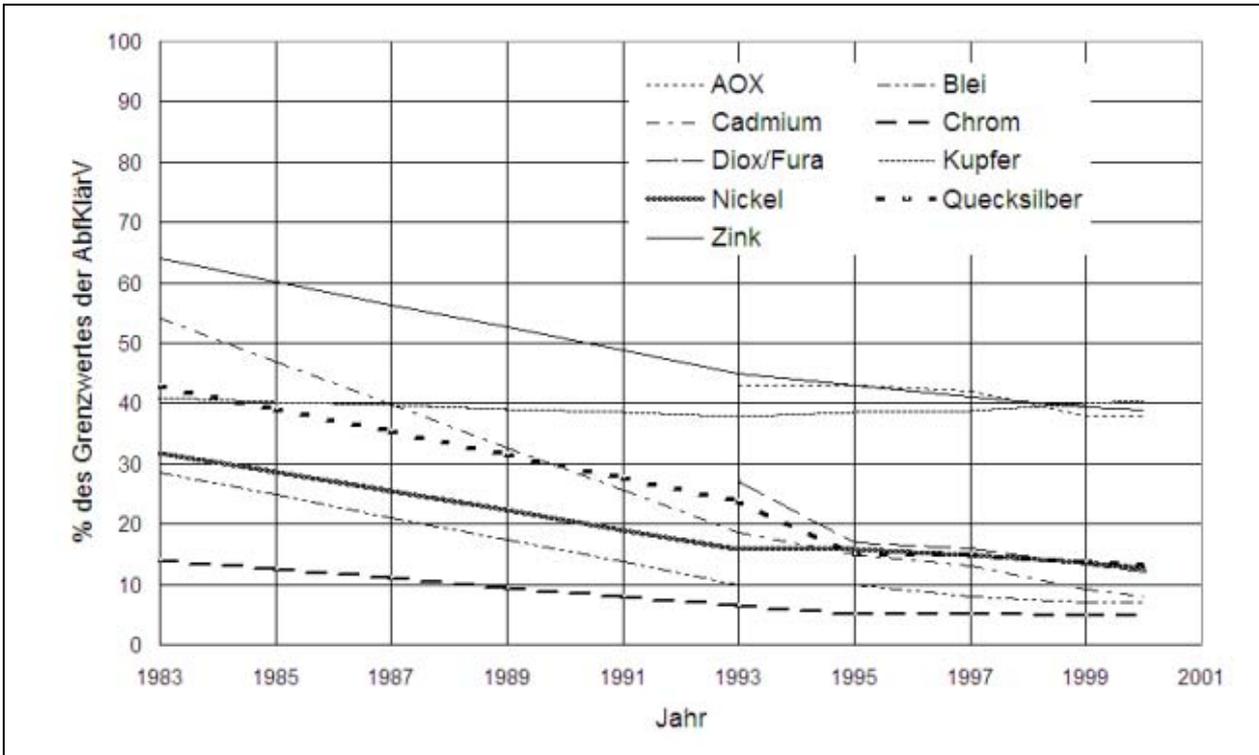
- [22] Harald Hanßen: Aktivitäten des Fachausschusses „Energetische Verwertung und thermische Behandlung“, ATV Fachausschuss AK 3, interne Mitteilung (2003)
- [23] Timm Hermann, Kerstin Goldau: Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland
Umweltbundesamt, Stand 08/2004 in Vorbereitung
- [24] N.N.: Gute Qualität und sichere Erträge. Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden? Vorschlag zur Begrenzung des Eintrags von Schadstoffen bei der Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen
Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Berlin Juni 2002
- [25] R. Kümmel, R. Beckmann, J. Neugebauer:
Stand der Technik, Konzepte und Trends der Klärschlamm Entsorgung
Seminar VDI-Bildungswerk GmbH, Klärschlamm Entsorgung –Verwertung/Behandlung/ Beseitigung-, Düsseldorf 16.-17.10.1997
- [26] C. Tauber, J. Klemm, M. Schönrok:
Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme in Steinkohlekraftwerken
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 45 (1995) 11, S. 725 – 733
- [27] H. Gutberlet, A. Spiesberger, F. Kastner, J. Tembrink:
Zum Verhalten des Spurenelementes Quecksilber in Steinkohlefeuerungen mit Rauchgas- Reinigungsanlagen
VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992) 7, S. 636 – 641
- [28] K. Steier: Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk, Verwertung oder Beseitigung?
Seminar VDI-Bildungswerk GmbH, Klärschlamm Entsorgung -Verwertung/Behandlung/ Beseitigung, Düsseldorf 16.-17. 10.1997

Industriezweige	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	Ag
Metallverarbeitende und -bearbeitende Industrie (Galvanik, Verzinkereien, Elektro, Fahrzeuge)	X	X	X	X	X	X		X
Chemie, Pharmazie	je nach Produkt							
Leder			X					
Textil	unterschiedlich							
Pigmenthersteller	unterschiedlich							
Batterien, Akkumulatoren	X	X			X		X	
Akku-Ladestationen	X							
Bleiglasätzereien	X							
Spiegelhersteller					X	X		X
Druckereien	X	X	X	X	X		X	
Foto		X	X	X				X
Keramik	X							

Abb. 1: Herkunft von Schwermetallverunreinigungen nach Industriezweigen
Quelle: M. Ried [9]

Industriezweige	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
Fleischverarbeitung	11	150	150	70	460
Fettaufbereitung	6	210	220	280	3.890
Fischverarbeitung	14	230	240	140	1.590
Brotfabriken	2	330	150	430	280
Brauereien	5	60	410	40	470
Getränkeindustrie	3	180	2.040	220	2.990
Speiseeisherstellung	31	50	2.700	110	780
Textilfärbereien	30	820	37	250	500
Pelzherstellung	115	20.140	7.040	740	1.730
Wäschereien	134	1.220	1.700	100	1.750
Autoreinigung	18	140	180	190	920

Abb. 2: Schwermetalle im Industrieabwasser (Angaben in µg/l)
Quelle: M. Ried [9]



E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 3: Entwicklung der Klärschlammbelastung in Bayern
Quelle: StMLU [10]

Verfahren	Energie-nutzung	Reststoff-verwertg	Abgas-reinigung	Kapazität	KS-Vorbehandlung			Problem-punkte
					entwäss.	teilgetr.	vollgetr.	
Müllverbrennung	X	---	XXX	ausgelastet	X	X	X	Dispergiert Ausbrand
Monoverbrennung (Wirbelschicht)	(X)	(X)	XXX	vorhanden	(X)	X	(X)	teure Teiltrockng
Steinkohle-kraftwerk	XXX	XXX	XX	ausgelastet	X	(X)	X	Trocknungs-begrenzung
Braunkohle-kraftwerk	XXX	X	XX	vorhanden	X	(X)	X	Trocknungs-begrenzung
Zementwerk	XXX	XXX	X	vorhanden	(X)	(X)	X	teure Volltr. CI-Kreislauf
Asphaltmisch-anlage	XXX	XXX	---	keine	X	X	X	saisonal Einsatz

E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 4: Thermische Klärschlamm-Entsorgungsverfahren

		Heizwerte	Steinkohle (SK)	29.500 kJ/kg	7 % H ₂ O			
			Braunkohle (BK)	9.500 kJ/kg	50 % H ₂ O			
			Klärschlamm (KS)	11.000 kJ/kg	0 % H ₂ O			
<i>Kraftwerksbetreiber</i>	Kohleart	Nennleistg. elektr. MW	Betriebsstunden h/a	Stromerzeugung GWh/a	Wirkungsgrad	thermische Energie GWh/a	Kohleverbr. t/a*10 ³	5% Masseanteil KS tTS/a*10 ³
<i>Energiekonzerne (Jahr 2000)</i>	SK	16.400	5.100	83.640	0,40	211.625	25.825	1.201
	BK	17.900	7.300	130.670	0,35	372.602	141.195	3.530
<i>Industrie (Stand 01.01.99)</i>	SK	3.000	(6000)	18.000	(0,37)	48.649	5.937	276
<i>Stadtwerke (Stand 01.01.99)</i>	SK	2.300	(6000)	13.800	(0,37)	37.297	4.551	212
Summe	SK	21.700	5.300	115.010	0,39	297.504	36.314	1.689
	BK	17.900	7.300	130.670	0,35	374.267	141.195	3.530
	SK+BK	39.600		245.680		671.771	ca.	5.220
KS-Anfall BRD 2004 (Statistisches Bundesamt [20])							ca.	2.260

E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 5: Klärschlamm-Mitverbrennungskapazität der Kohlekraftwerke (BRD)

								Stand 31.05.06
Name/ Standort bei	Betreiber	Mitverbr. bei	Feue- rungsart	Linien	Kapazität KS t TR/a (Anlieferzust.)	% TR	Kapazität KS t TS/a	Dauerbetrieb ab
Berrenrath/ Köln	RWE Power	Braunkohle	Zirkulier. WS	1 (2)	215.000	22 - 33	59.100	Apr. 00
Ensdorf/ Saarbrücken	RWE Power Saarenergie VKN	Ballastkohle	Staub	2	81.000	20 - 37	23.100	Jan. 03
Hamm/Westfalen	RWE Power	Steinkohle	Staub	1	10.000	(25) - 95	9.000	2002
Wachtberg/ Köln	RWE Power	Braunkohle	Zirkulier. WS	2	280.000	22 - 33	84.000	Mai. 03
Weisweiler/Aachen	RWE Power	Braunkohle	Staub	2	115.000	22 - 33	31.600	Mrz. 99
Weiher/ Saarbrücken	Saarberg	Steinkohle	Staub	1	10.000	90 - 95	9.300	1996
Völklingen/Fenne	SaarEnergie	Braunkohle	Staub	1	14.000	25 - 35	4.200	Mrz. 01
Herne	Steag	Ballastkohle	Staub	1	30.000	>69	25.000	Ende 04
Lünen	Steag	Ballastkohle	Staub	1	30.000	>69	25.000	Ende 04
Boxberg	Vattenfall	Braunkohle	Staub	2	140.000	25 - 35	42.000	Apr. 99
Lippendorf	EnBW / EON / Vattenfall	Braunkohle	Staub	2	310.000	25 - 35	93.000	Jun. 06
Ibbenbüren	RWE Power	Steinkohle Antrazit	Staub Schmelz- kammer	1	40.000	25 - 35	12.000	Jan. 06
Porta Westfalica	GK Veltheim GmbH	Steinkohle	Staub	1	40.000	20 - 35	12.000	Sep. 03
Summe ca.					1.880.000		669.000	

E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 6: Mitverbrennungskapazitäten für Klärschlamm in Kohlekraftwerken der BRD [2]

*Vergasung			Stand 31.07.04	
Standort	Kapazität t TR/a (Anlieferzust.)	% TR	Kapazität t TS/a	Inbetrieb- nahme
Balingen ¹⁾	1.500	75 - 80	1.200	2002
Berlin-Ruhleben	138.500	26	36.000	1986
Bitterfeld-Wolfen	50.700	30	15.200	1997
Bonn	29.100	27,5	8.000	1981
Bottrop	88.900	45	40.000	1991
Düren	37.000	26 - 28	10.000	1975
Eilverlingsen-Werdohl	187.000	28 - 32	56.000	2002
Frankfurt am Main	130.000	30	39.000	1981
Frankfurt-Höchst		25 - 95	80.000	2001
Hamburg	190.900	22	42.000	1997
Herne		25 - 90	22.200	1990
Karlsruhe	80.000	25	20.000	1982
Lünen		25 - 95	110.000	1997
München	88.000	25	22.000	1997
Stuttgart	200.000	20	40.000	1981
Neu-Ulm	44.400	22,5	10.000	1979
Sande-Wilhelmsh.	9.000	25	2.250	1997
Schwarze Pumpe ¹⁾	35.000	88	30.800	1992
Wuppertal	128.000	25	32.000	1977
Summe		ca.	617.000	

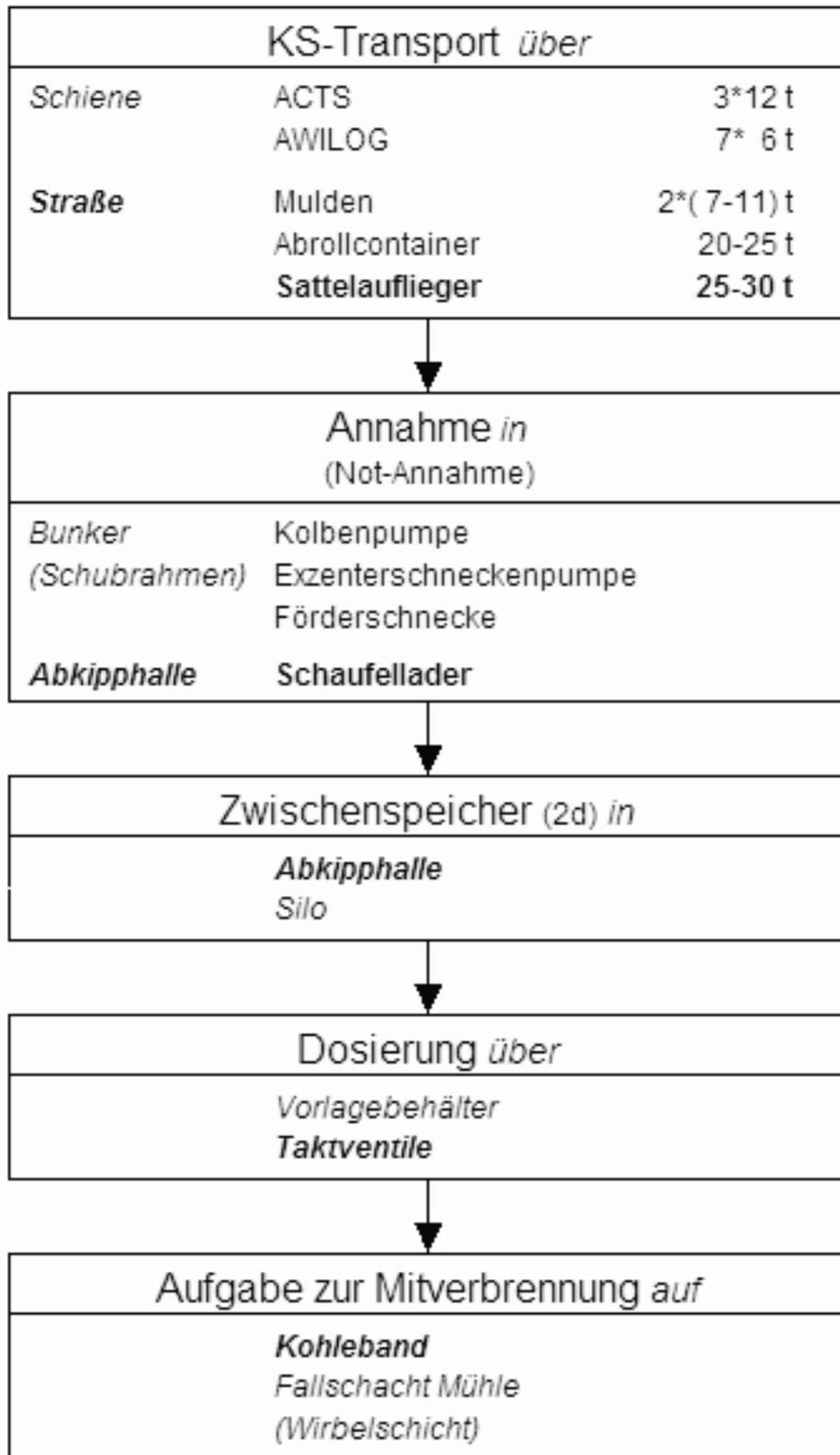
E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 7: Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm in der BRD

Stand 31.07.04					
Standort	Kapazität KS t TR/a (Anlieferzust.)	% TR	Trocknung auf % TR	Kapazität KS t TS/a	Dauer- betrieb ab
Bamberg	12.000	30	-	3.600	1996
Bielefeld	12.000	25	60	3.000	1996
Burgau (Pyrolyse)	2.300	40	-	920	1983
Coburg	3.500	22	-	770	1989
Kamp-Lintfort	48.000	25	95	12.000	1997
Krefeld	40.000	30	95	12.000	1995
München-Nord	50.000	22	(45)	11.000	1997
Rosenheim	5.000	30	-	1.500	-
Schweinfurt	25.500	30	85	7.650	1994
Würzburg	13.750	40	95	5.500	1995
Geplante Erweiterungen (6 Anlagen)				ca.	25.000
Summe			ca.	83.000	

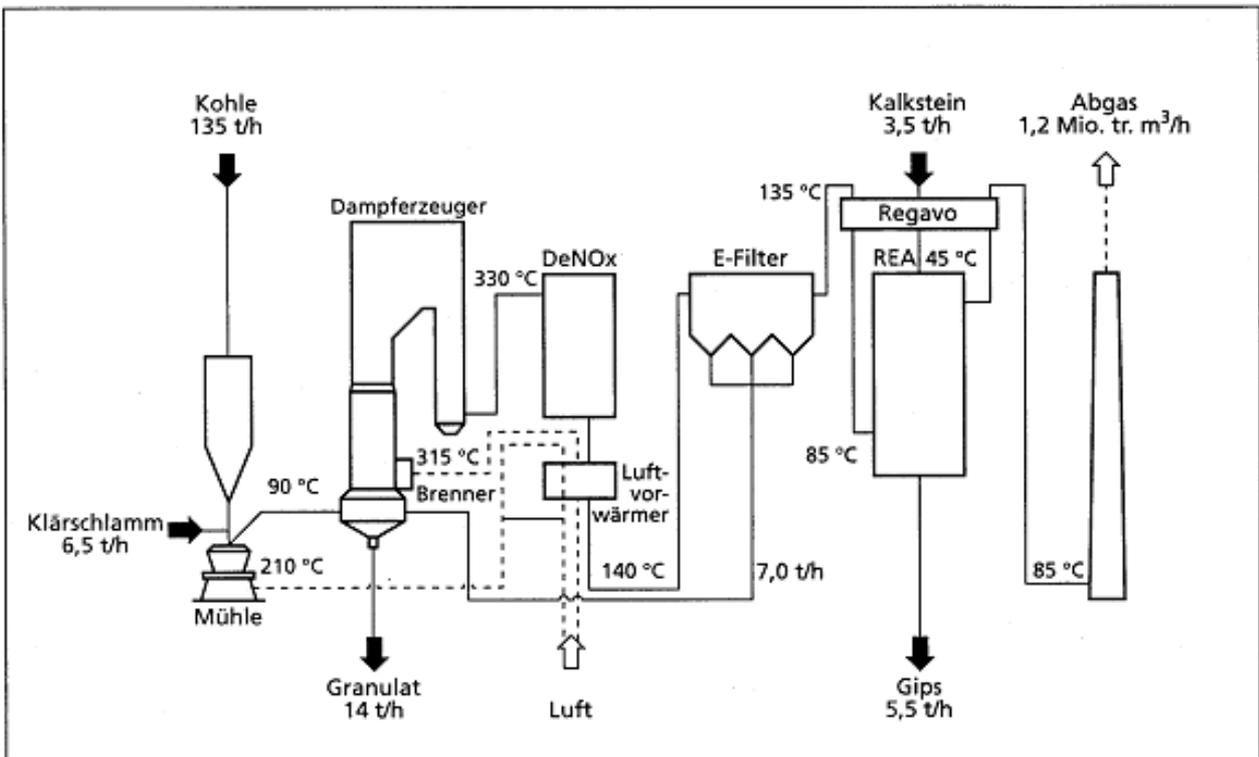
E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 8: Bestehende und geplante Mitverbrennungskapazitäten für Klärschlamm in Hausmüllverbrennungsanlagen der BRD



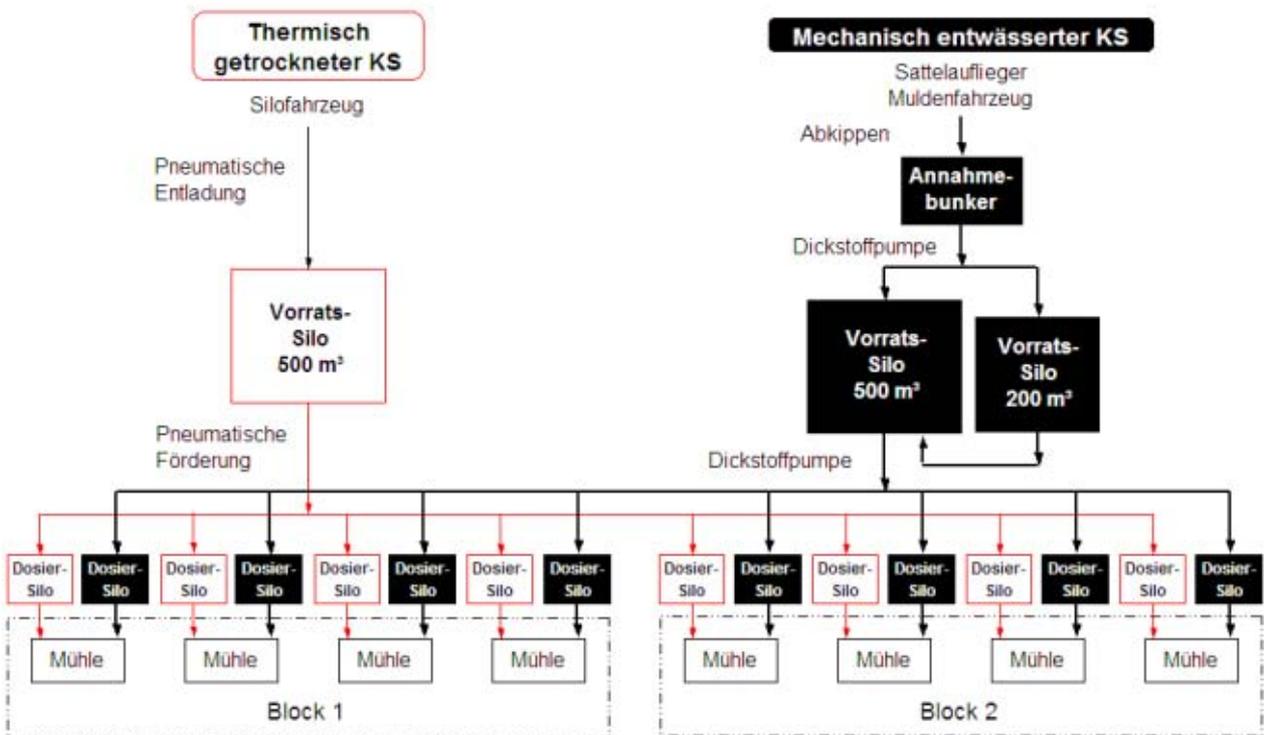
E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 9: KS-Handling zur Mitverbrennung



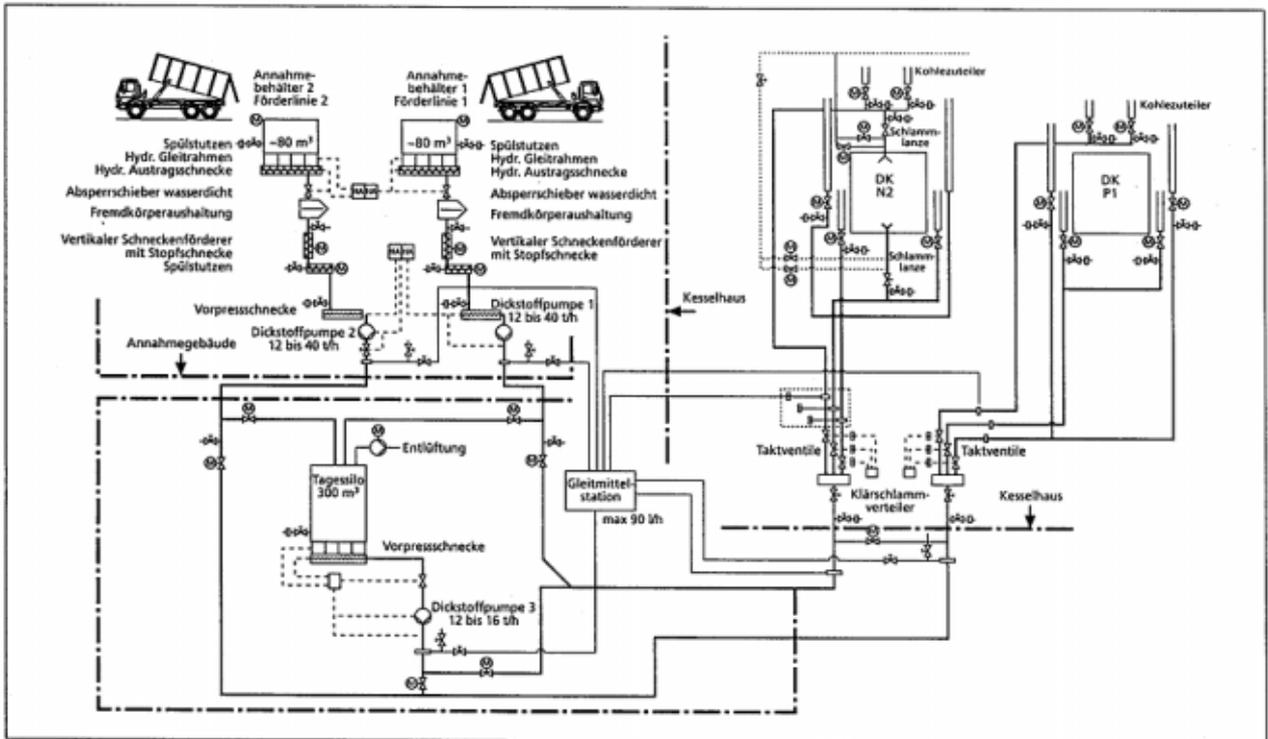
E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 10: Klärschlamm-Mitverbrennung KW Franken II
Verfahrensschema / Mengenzbilanz



E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 11: Klärschlamm-Mitverbrennung im Kraftwerk Franken II
Verfahrensschema KS



E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 12: Klärschlamm-Mitverbrennung KW Boxberg (Vattenfall) Verfahrensschema

	mechanisch entwässert	teiltrocknet	thermisch getrocknet
Trockenrückstand	20 - 35 %	35 - 90 %	> 90 %
Eigenschaften	stichfest, pumpfähig	mechanisch förderbar	pneumatisch förderbar
	ausreichend ausgefault oder stabilisiert		
Mech. Entwässerg.	Konditionierung mit Polymeren ohne mineralische Zuschlagstoffe		
Fremdkorngröße	max. 10 mm		
Art / Herkunft*	kommunal oder kommunalähnlich # industriell		
Zusammensetzung*	Grenzwerte der AbfKlärV §4 Abs.10, 11, 12 # 17.BlmschV		
Analysen*	Entsprechend AbfKlärV §3 Abs.5, 6, 7 durch KA Stichproben und Probenrückstellung durch KW # Genehmigungsauflagen		

* abhängig von der Genehmigung des Kraftwerkes

E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 13: Klärschlammspezifikation

Entsorgungsweg	TR [%]	Mech. Entwässerung		Therm. Trocknung		Entsorgung				Gesamtkosten	
		EUR / t TR 4,5	EUR / t TS	EUR / t TR 30	EUR / t TS	EUR / t TR		EUR / t TS		EUR / t TS	
		min - max.	min - max.	min - max.	min - max.	min - max.	aktuell	min - max.	min - max.	min - max.	aktuell
Stoffl. Verwertung											
Landwirtschaft	ca. 4,5	0 - 0	0 - 0	0 - 0	0 - 0	10 - 20	15	220 - 440	200 - 400	330	
	ca. 30	5 - 10	110 - 230	0 - 0	0 - 0	20 - 50	45	70 - 170	200 - 400	320	
Rekultivierung	ca. 30	5 - 10	110 - 230	0 - 0	0 - 0	35 - 60	45	120 - 200	200 - 400	320	
	> 90	5 - 10	110 - 230	50 - 130	170 - 430	35 - 60	45	40 - 70	300 - 700	480	
Therm. Behandlung											
Mitverbrennung Müll	ca. 30	5 - 10	110 - 230	0 - 0	0 - 0	60 - 260	120	200 - 870	300 - 1.100	570	
	> 90	5 - 10	110 - 230	50 - 130	170 - 430	60 - 260	120	70 - 290	400 - 1.000	560	
Mitverbrennung Kohle	ca. 30	5 - 10	110 - 230	0 - 0	0 - 0	60 - 90	70	200 - 300	300 - 500	400	
	> 90	5 - 10	110 - 230	50 - 130	170 - 430	50 - 80	60	60 - 90	300 - 800	500	
Monoverbrennung	ca. 30	5 - 10	110 - 230	10 - 50	30 - 170	50 - 200	80	170 - 670	300 - 1.100	510	

E.ON Kraftwerke GmbH, München

Abb. 14: KS-Entsorgungskosten (einschließlich Transport, zuzüglich MWSt)

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

Dipl.-Ing. Werner Kröger, LfU

Inhaltsübersicht

1. Situation in Bayern
2. Standorte der MHKW
3. Mitverbrannte Mengen
4. Technische Umsetzung
5. Zusammenfassung

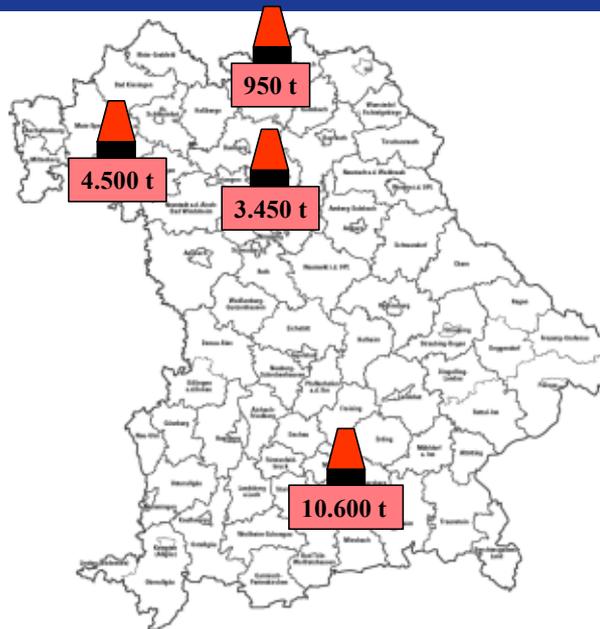
Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

■ Situation in Bayern (2004)

Die folgenden Mengen-Angaben für Klärschlamm (KS) sind auf 100 %
Trockensubstanz (Trockenmasse TM) normiert und gerundet:

- jährliche Klärschlamm-Menge in Bayern (BY): 300.000 t (100 %)
- davon thermisch behandelt/energetisch verwertet: 115.000 t (39 %)
- davon in BY thermisch beh./energetisch verw.: 58.500 t (20 %)
- davon in (vier) bayerischen MVA entsorgt: 19.500 t (7 %)

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken



© LfU / Abt. 3 / Werner Kröger / 2006

- 3 -

 Bayerisches Landesamt für Umwelt

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

■ Mengen (2004)

MHKW	KS [t]	Abfälle [t]	Anteil KS [%]
A	950	117.900	0,8
B	3.450	124.000	2,8
C	4.500	155.082	2,9
D	10.600	633.565	1,7

© LfU / Abt. 3 / Werner Kröger / 2006

- 4 -

 Bayerisches Landesamt für Umwelt

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

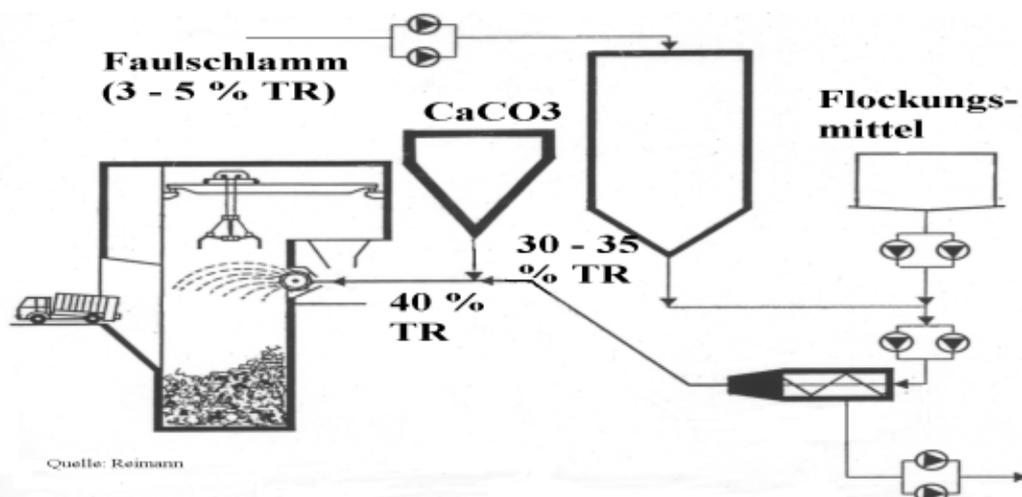
■ Technische Umsetzung im MHKW A

nur bei relativ geringem KS-Anteil (hier 0,8 % TM) möglich:

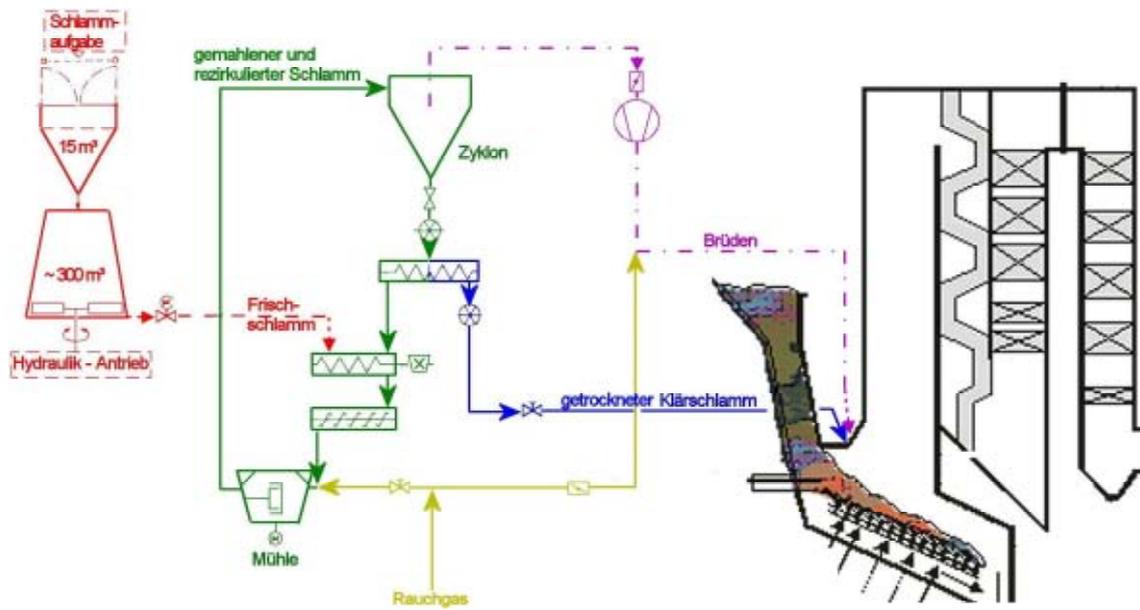
- Anlieferung von entwässertem Klärschlamm
- Aufgabe in den Bunker
- möglichst gute Durchmischung des KS mit den Abfällen im Bunker (Greifer)
- Verbrennung

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

MHKW B: Entwässerung und Aufstreumaschine



Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken



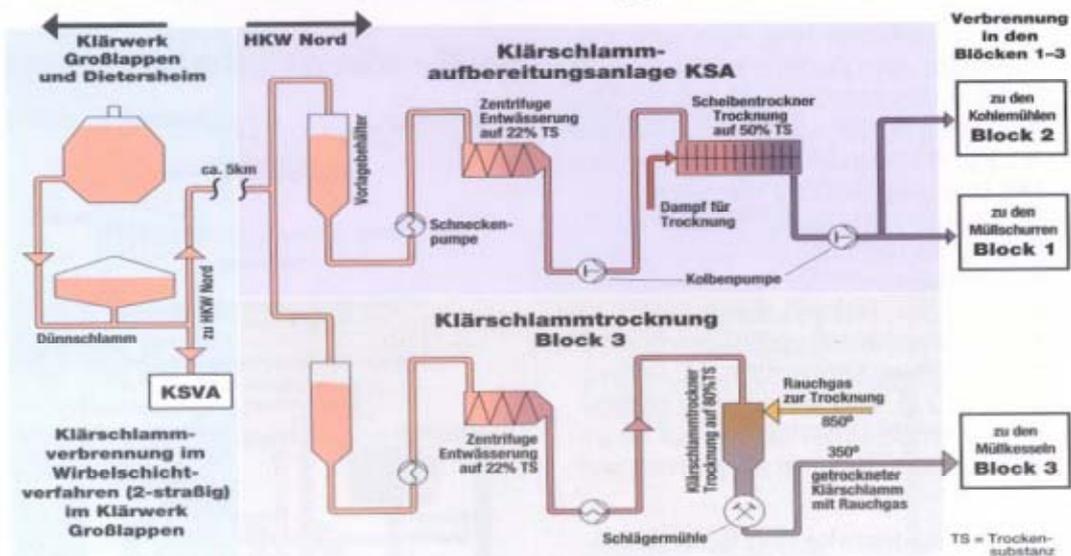
© LfU / Abt. 3 / Werner Kröger / 2006

- 7 -

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

Klärschlammbehandlung zur Verbrennung im HKW Nord



© LfU / Abt. 3 / Werner Kröger / 2006

- 8 -

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

■ Zusammenfassung

- Klärschlamm wird in vier von 16 bayerischen MHKW mitverbrannt. Der Beitrag der MHKW zur thermischen Behandlung bzw. energetischen Verwertung bayerischer Klärschlämme liegt bei etwa 17 %.
- Möglichkeiten und Grenzen zur Mitverbrennung von KS sind von Anlage zu Anlage verschieden
 - > unterschiedliche technische Lösungen.
- Einschätzungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm:
 - Klärschlamm verdrängt andere Abfälle
 - Mitverbrennung von KS ist nicht wirtschaftlich
 - Durch Klärschlamm kann der Heizwert gesenkt werden
 - Klärschlamm wirkt sich günstig auf die Kessel-Korrosion aus



Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllheizkraftwerken

■ Ausblick

- Kurzfristig sind keine signifikanten Änderungen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen in bayerischen MHKW zu erwarten.
- Die bayerischen MHKW sind seit über einem Jahr und auf absehbare Zeit vollständig mit Restmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen ausgelastet.
- Getrockneter Klärschlamm kann auch in Kohlekraftwerken und Zementwerken eingesetzt werden. Dr. Radde, BMU: „Inwieweit die Mitverbrennung von heizwertreichen Abfällen – insbesondere in Braunkohlekraftwerken – ausbaufähig ist, ist derzeit offen. Experten sehen die zukünftige Rolle der Kraftwerke allerdings eher in der vollständigen Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme.“



Klärschlamm-trocknung – Baustein einer integrierten Abfallwirtschaft

Heinz Riedel, LfU – Josef-Vogl-Technikum

Einleitung

Die Trocknung wird zunehmend zu einem unverzichtbaren Verfahrensschritt in der Klärschlamm-entsorgungskette, wenn Klärschlämme nicht deponiert oder landwirtschaftlich verwertet werden. Gegenüber Anfang der 90er Jahre hat sich die energetische Klärschlammverwertung deutlich erhöht – vgl. Abbildung 1. Knapp 115.000 Mg Trockenmasse, entsprechend 38,8 Mass.-% des in Bayern angefallenen Klärschlammes [1] wurden im Jahr 2004 v. a. in Mono-, Müllverbrennungsanlagen, Kohlekraft- und Zementwerken thermisch behandelt.

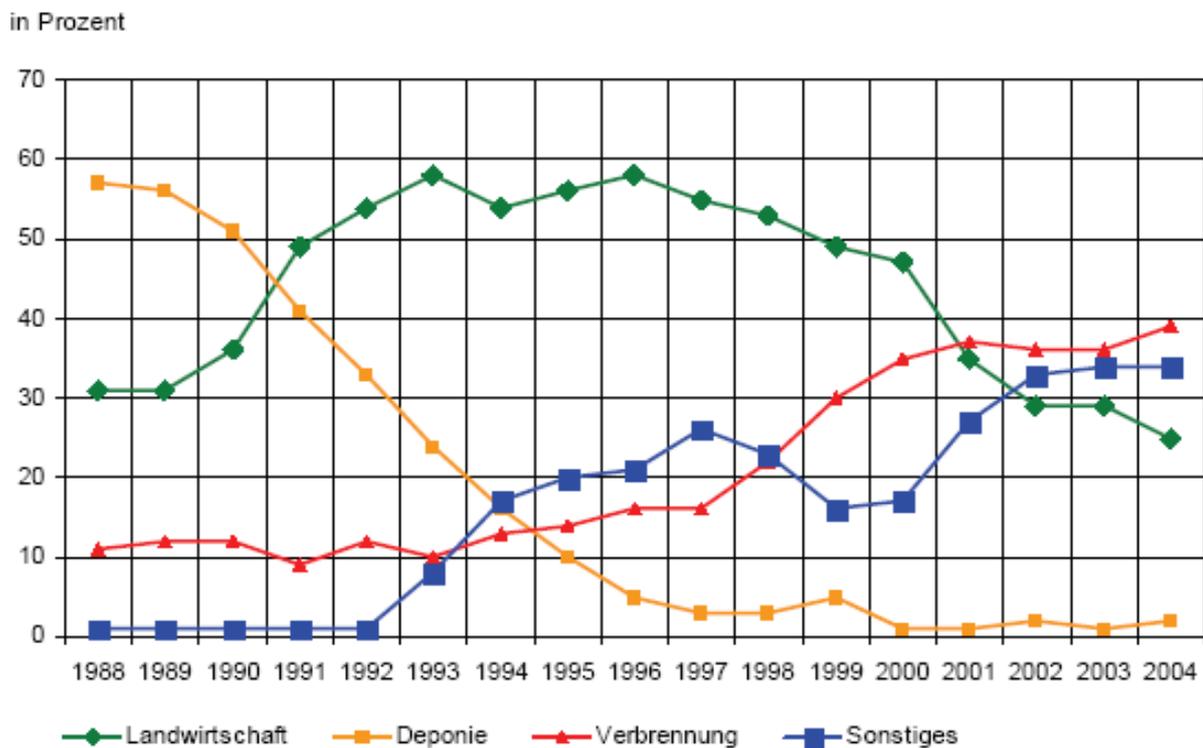


Abb. 1: Entwicklung der Klärschlamm-entsorgung und -verwertung in Bayern nach [2]

Im Sinne einer integrierten Abfallwirtschaft muss die Trocknung sowohl in die örtlichen Gegebenheiten des Standorts als auch – als Baustein der Verfahrenskette – in die gesamte Klärschlammbehandlung/-entsorgung eingebunden werden. Als Vorstufe für eine weitergehende Behandlung sollte die Klärschlamm-trocknung insbesondere deren Anforderungen an die Inputqualität berücksichtigen.

Einen differenzierten Überblick über die Klärschlamm-trocknung gibt das Merkblatt M 379 [3] der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (ATV-DVWK), Hennef.

1 Grundlagen der (thermischen) Klärschlamm-trocknung

1.1 Trocknungsverfahren

Verfahrenstechnisch lassen sich Trocknungsverfahren nach unterschiedlichen Gesichtspunkten einteilen:

- nach der Art der Wärmeübertragung: *Konvektionstrocknung, Kontakt-trocknung, Strahlungstrocknung*

Bei der *Konvektionstrocknung* kommt der zu trocknende Klärschlamm unmittelbar mit dem Wärmeträger in Berührung; das Trocknungsgas (z. B. Verbrennungsabgas, Luft, Brüden; mit Temperaturen bis zu 850 °C) um- bzw. überströmt den Klärschlamm.

Bei der *Kontakt-trocknung* erfolgt die Wärmeübertragung über eine Kontaktfläche. Der mit einer beheizten Fläche (Wärmetauscherfläche) in Kontakt kommende Klärschlamm wird erwärmt, ohne in direkten Kontakt mit dem Wärmeträger (z. B. Verbrennungsabgas, Luft, Dampf, Druckwasser, Thermoöl; mit Temperaturen bis zu 250 °C) zu treten. Für einen guten Wärmeübergang ist es notwendig, den Klärschlamm bei intensiver Durchmischung und Umwälzung zu trocknen. Dadurch kommen fortlaufend „neue“ Oberflächen mit den Wärmetauscherflächen in Berührung, an denen das Wasser desorbieren kann. Dadurch werden ähnliche Verdampfungsraten wie bei der Konvektionstrocknung erreicht.

Bei der *Strahlungstrocknung* wird die Wärme ohne Wärmeträger mittels elektromagnetischer Wellen im Klärschlamm erzeugt.

- nach der Art der Brüdenführung: *Direkttrocknung, Indirekttrocknung*

Bei der *Direkttrocknung* vermischen sich Brüden und Wärmeträger im Trocknungsaggregat. Die wasserdampfhaltige Abluft ist überhitzt und besteht zu etwa zwei Dritteln aus Luft, der Wassergehalt ist deutlich niedriger als bei der Indirekttrocknung. Der prozessbedingte Nachteil der großen Abgasmenge, die einer Kondensation bzw. weiteren Abgasbehandlung zuzuführen ist, kann dadurch kompensiert werden, dass das Trocknungsgas im Kreislauf gefahren wird (Brüdenrezirkulation) und nur ein Teilstrom, der etwa der Brüdenmenge bei der Indirekttrocknung entspricht, abgezogen wird.

Bei der *Indirekttrocknung* wird der Brüdenstrom ohne Kontakt mit dem Wärmeträger aus dem Trockner abgeleitet. Das verdampfte Wasser wird gemeinsam mit durch Undichtigkeiten in das System eintretender Leckluft bzw. durch eine gezielt zugeführte kleine Trägerluftmenge ausgeschleust. Die anfallenden Brüden enthalten etwa 5 - 10 Vol.-% Leckluft; bei einem geringen Leckluftanteil sind die Brüden annähernd wasserdampfgesättigt und 100 °C heiß.

- nach den eingesetzten Trocknungsaggregaten:

Konvektionstrocknung: *Bandtrockner, Centridry-Trockner, Kaltlufttrockner, Trommel-trockner*

Beim *Bandtrockner* wird der zuvor pelletierte Klärschlamm auf einem gelochten Förderband durch die Trocknerkammern transportiert und dabei mit Heißgas beaufschlagt.

Beim *Centridry-Trockner* wird der Dünnschlamm von einer in das Trocknungsaggregat integrierten Zentrifuge zunächst entwässert und danach dem Heißgasstrom ausgesetzt.

Der *Kaltlufttrockner* ist ein Bandtrockner, der ausschließlich auf dem natürlichen Trocknungspotenzial der Umgebungsluft basiert (große Luftmengen notwendig).

Beim *Trommeltrockner* wandert der Klärschlamm durch die ständig rotierende Trocknungstrommel und wird dabei mit Heißgas beaufschlagt {Klärschlammtransport mit dem Heißgasstrom, durch Leitbleche oder Schwerkraft (Trommelneigung)}.

Konvektions-/Kontaktrocknung: *Wirbelschichttrockner*

Beim *Wirbelschichttrockner* wird der entwässerte Schlamm fluidisiert; der Wärmeeintrag in den Trockner erfolgt über beheizte Rohrschlangen im Fließbett, das sehr gute Wärmeübergangseigenschaften aufweist.

Kontaktrocknung: *Dünnschichttrockner, Dünnschicht-/Scheibentrockner, Rohrbündel-Drehrohtrockner, Scheibentrockner*

Beim *Dünnschichttrockner* besteht das Trocknungsaggregat aus einem doppelwandigen, vom Heizmedium durchströmten Zylinder und einem innenliegenden Rotor, der den Klärschlamm auf der Innenwand des Zylinders in einer 5 - 15 mm dicken Schicht aufträgt und wieder abstreift.

Der *Dünnschicht-/Scheibentrockner* ist eine Kombination aus Dünnschicht- (problemloses Durchfahren der Leimphase) und Scheibentrockner (arbeitet bei Trockenrückständen über 55 - 60 % wirtschaftlicher).

Beim *Rohrbündel-Drehrohtrockner* fällt der Klärschlamm auf die im Innern des Drehrohrs befindlichen, beheizten Rohrbündel.

Beim *Scheibentrockner* wird der im Trocknungsaggregat rotierende Rotor (Hohlwelle mit aufgesetzten, hohlen Scheiben) vom Heizmedium durchströmt und gibt die Wärme an den entwässerten Klärschlamm ab.

Strahlungs-/Konvektionstrocknung: *Solar-/Ventilationstrockner*

Beim *Solar-/Ventilationstrockner* wird der Klärschlamm in einem „Gewächshaus“ getrocknet, das sich durch die Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit der Witterung aufheizt. Hierbei wird die Wasseraufnahmekapazität der Umgebungsluft genutzt. Das verdunstete Wasser wird aus dem offenen System mittels Ventilatoren ausgetragen.

1.2 Trocknungsverlauf

Während des Trocknungsprozesses ändert sich die Trocknungsgeschwindigkeit. Bei noch hohen Wassergehalten bleibt sie zunächst annähernd konstant; mit sinkenden Wassergehalten geht die Trocknungsgeschwindigkeit aufgrund physikalischer Vorgänge (z. B. Dampfdiffusion und Wärmeleitung durch bereits trockenes Material) zurück und liegt bei hochgetrocknetem Klärschlamm aufgrund dessen hygroskopischer Eigenschaften nahe Null. Dementsprechend sinkt mit steigendem Produkttrockenrückstand die Wasserverdampfungsleistung deutlich, was bei der Auslegung von Trocknern zu berücksichtigen ist. Längere Verweilzeiten des Klärschlammes und damit größere Trocknungsaggregate sind die Folge.

Während der Trocknung durchläuft der Klärschlamm die Leimphase (Bereich von ca. 40 - 50 % Trockenrückstand): die rheologischen Eigenschaften des Klärschlammes verändern sich, aus einem pumpfähigen Nassschlamm wird ein zähpastöser, klebriger Schlamm mit kritischen Fördereigenschaften. Nach Überschreiten der Leimphase liegt häufig eine krümelige/klumpige Struktur vor; Trockenschlamm ist rieselfähig bis staubförmig.

Um die mechanisch kritische Leimphase zu umgehen, wird insbesondere bei Scheiben- und Trommeltrocknern vor Eintritt in das Trocknungsaggregat ein Feststoffgehalt oberhalb der Leim-

phase (ca. 60 % Trockenrückstand) durch Rückmischung von Trockengut zum entwässerten Schlamm in speziellen Mischeinrichtungen eingestellt. Die Klärschlammrückführung bietet neben den Nachteilen eines geringeren (Netto-)Durchsatzes und erhöhter Investitions-/Betriebskosten auch Vorteile:

- durch Rückmischung unterschiedlicher Trockengutmengen können Schwankungen des Entwässerungsgrads des zu trocknenden Klärschlammes ausgeglichen werden;
- mit auf den Schlamm angepassten Mischaggregaten lässt sich im Idealfall ein Granulat mit hoher Abriebfestigkeit, großer äußerer Oberfläche und engem Kornspektrum erzeugen, um somit gute Voraussetzungen auf der Gutseite für die Trocknungsvorgänge selbst als auch für die Qualität des Trockenguts zu schaffen;
- der bei der Trocknung unvermeidbar entstehende, sicherheitstechnisch bedenkliche Staub kann durch Rückmischung wieder in das zu trocknende Gut eingebunden werden.

Das Rücklaufverhältnis und somit der eingestellte Trockenrückstand sollten allerdings regelmäßig überwacht werden.

Bei der Klärschlamm-trocknung auf geringe Restfeuchten (ca. 90 - 95 % Trockenrückstand) muss neben der Verdampfungsenthalpie des Wassers zusätzlich die Sorptionsenergie des Schlammwassers aufgebracht werden. Dieser erhöhte Energiebedarf ist bei der Energiebilanz des Trocknungsprozesses bzw. der Dimensionierung des Trockners zu berücksichtigen.

Aufgrund der physikalischen Vorgänge ist speziell bei der Trocknung auf geringe Restfeuchten darauf zu achten, dass für einen guten Wärme- und Stoffaustausch der Klärschlamm ein lockeres Gefüge mit großer Oberfläche aufweist, d. h. Granulatstruktur besitzt. Unter dem Aspekt eines einheitlichen Trocknungsergebnisses sollten die einzelnen Partikel näherungsweise gleiche Größe besitzen.

Zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen werden Klärschlamm-trockner i. d. R. im Unterdruck betrieben.

Einen Vergleich der gängigsten Trocknungsverfahren gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der einzelnen Trocknungsverfahren nach [3]

Trocknertyp	Vorteile	Nachteile
Band-trockner	<ul style="list-style-type: none"> • problemloses Durchfahren der Leimphase • gut einstellbare Produktqualität • geringer Verschleiß im Trockner 	<ul style="list-style-type: none"> • Klärschlamm-entwässerung auf Pelletierung anpassen • Gefahr lokaler Überhitzung → hohe Brandgefahr
Centridry-Trockner	<ul style="list-style-type: none"> • schnelles An-/Abfahren möglich • problemloses Durchfahren der Leimphase • gut geeignet für mittelgroße Kläranlagen mit ausreichend Schlammanfall 	<ul style="list-style-type: none"> • empfindlich auf schwankende TR-Gehalte im Eintrag • relativ hoher Staubanteil im Produkt
Trommel-trockner	<ul style="list-style-type: none"> • robustes Verfahren • gut geeignet für große Durchsatzmengen • gut einstellbare Produktqualität 	<ul style="list-style-type: none"> • diskontinuierlicher Betrieb ungünstig • niedriger Wärmeübergangskoeffizient • Rückmischung erforderlich
Wirbelschicht-trockner	<ul style="list-style-type: none"> • problemloses Durchfahren der Leimphase • gleichmäßige Produktqualität 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Druckverlust • bisher ausgeführt für kleinere Durchsätze

Trocknertyp	Vorteile	Nachteile
Dünnschichttrockner	<ul style="list-style-type: none"> keine bewegten Teile im Trockner → kaum Verschleiß unempfindlich auf schwankende TR-Gehalte im Eintrag problemloses Durchfahren der Leimphase robustes Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Volltrocknung energetisch ungünstig → große Baueinheit
Dünnschicht-/Scheibentrockner	<ul style="list-style-type: none"> keine Rückmischung erforderlich → erhöhter Durchsatz Nutzung der trockenerspezifischen Vorteile in den einzelnen Trocknungsphasen 	<ul style="list-style-type: none"> zwei eigenständige Trocknungsaggregate erforderlich u. U. hoher Staub- und Faseranteil im Produkt
Scheibentrockner	<ul style="list-style-type: none"> guter Wärmeübergang kompakte Bauweise gut geeignet für hohen Durchsatz 	<ul style="list-style-type: none"> diskontinuierlicher Betrieb ungünstig Rückmischung erforderlich u. U. hoher Staub- und Faseranteil im Produkt
Solar-/Ventilationstrockner	<ul style="list-style-type: none"> einfache Technik geringe spezifische Energiekosten 	<ul style="list-style-type: none"> großer Flächenbedarf witterungsabhängige Leistung lange Trocknungszeiten

Hochgetrockneter Klärschlamm ist aufgrund des hygroskopischen Verhaltens möglichst unter geringen relativen Luftfeuchten bzw. unter reduziertem Luftaustausch/-zutritt zu lagern, damit nicht durch Adsorption von Wasser aus der Umgebungsluft der bei der Trocknung erzielte geringe Wassergehalt wieder ansteigt.

1.3 Sicherheitstechnische Aspekte

Hochgetrockneter Klärschlamm stellt aufgrund seines relativ hohen Gehalts an organischen Bestandteilen einen näherungsweise mit Braun- bzw. Steinkohle vergleichbaren Brennstoff mit ähnlichem Gefahrenpotenzial dar. Die sichere Handhabung dieses Brennstoffs – v. a. der bei der Klärschlamm-trocknung je nach Verfahren in mehr oder weniger großem Umfang entstehenden Stäube – erfordert eine umfassende Kenntnis der sicherheitsrelevanten Eigenschaften.

Sicherheitstechnische Kenngrößen, die diese Eigenschaften beschreiben, sind u. a. das Brennverhalten (Brennbarkeit), die Deflagration (fortschreitende exotherme Zersetzung nach Fremdzündung auch unter Luftausschluss), die Glimmtemperatur, die Selbstentzündungstemperatur, die Staubexplosionsfähigkeit, der maximale Explosionsdruck, der maximale zeitliche Druckanstieg (Druckanstiegsgeschwindigkeit), die untere Explosionsgrenze, die Mindestzündenergie und die Zündtemperatur. Einige dieser Kennzahlen hängen u. a. von der Kornverteilung und der mittleren Korngröße des Trockenguts ab. Bei jeder Planung einer thermischen Volltrocknungsanlage sind die spezifischen sicherheitstechnischen Kennzahlen soweit als möglich zu ermitteln/abzuschätzen.

Zur Gewährleistung eines störungsfreien Trocknerbetriebs sind in Abhängigkeit vom entsprechenden Gefahrenpotenzial Schutzmaßnahmen gegen das Entstehen bzw. die Auswirkungen von Bränden und Staubexplosionen vorzusehen. Neben den üblichen konstruktiven Maßnahmen zur Schadensbegrenzung (Löscheinrichtungen, explosionsfeste Bauweise) sollten als vorbeugender Brand- und Explosionsschutz hohe Guttemperaturen, die Entstehung von Glutnestern, Staub sowie explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen (z. B. durch Inertisierung), Zündquellen, lange Lagerzeiten und große Lagervolumina vermieden werden. Gleichzeitig sind je nach Trocknungssystem

Maßnahmen zur frühzeitigen Erkennung von Glutnestern bzw. Bränden notwendig (z. B. Temperatur-, Kohlenstoffmonoxid- und Staubkonzentrationsmessungen).

Sicherheitstechnische Aspekte sind nicht nur innerhalb des Trocknungsverfahrens, sondern auch bei den anschließenden Schritten des Transports, der Lagerung und der Verwertung zu sehen. Die o. g. Sicherheitsaspekte sind also sinngemäß bis zum letzten Entsorgungsschritt anzuwenden.

Auch die Zwischenlagerung von Nass- bzw. entwässertem und teilgetrocknetem Klärschlamm in Stapelbehältern bzw. Silos ist unter dem Aspekt einer möglichen Methanausgasung sicherheitsrelevant. Aufgrund der Restgasentwicklung ist aus sicherheitstechnischen Gründen in jedem Fall auf einen ausreichenden Luftaustausch und eine Methanüberwachung zu achten. U. U. kann auch eine Inertisierung, insbesondere bei der Zwischenlagerung von teilgetrocknetem Klärschlamm, erforderlich sein.

1.4 Energieaufwand

Der größte Teil der eingesetzten Primärenergie (Faul-, Erdgas, Heizöl) wird bei der thermischen Klärschlamm-trocknung zur Wasserverdampfung verwendet. Diese Energie wird in die Brüden überführt und kann als Kondensationswärme zurückgewonnen werden. Der theoretische Energiebedarf für die Verdampfung von 1 Mg Wasser beträgt 627 kWh (Sättigung, 100 °C). Hinzu kommt für die Erwärmung des Wassers von 20 °C auf 100 °C eine Wärmemenge von 93 kWh und für die Feststofferwärmung ein Betrag von 14 kWh. Der physikalisch notwendige Bedarf an thermischer Energie für die Wasserverdampfung liegt somit bei insgesamt 734 kWh/(Mg H₂O).

Direkte Energieverluste infolge des Wärmeerzeugerwirkungsgrads und durch Wärmeabstrahlung betragen etwas mehr als 100 kWh, wovon die Energieumwandlung etwa 80 % ausmacht. Diese Energieumwandlungs- und -abstrahlungsverluste können durch optimierte Planungen und Ausführungen minimiert werden. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität und Verdampfungsenthalpie von Wasser sind Energieeinsparmöglichkeiten bei der thermischen Klärschlamm-trocknung verfahrenstechnisch begrenzt und liegen im einstelligen Prozentbereich.

Daher bleibt als Haupteinsparpotenzial für thermische Energie, die Menge an zu verdampfendem Wasser, d. h. die in den Prozess eingetragene Wassermasse zu minimieren. Grundsätzlich sollte zur Optimierung des Gesamtprozesses die der Klärschlamm-trocknung vorgeschaltete Entwässerungsstufe (Zentrifuge, Band- oder Kammerfilterpresse) einen möglichst hohen Entwässerungsgrad (mindestens auf 30 % Trockenrückstand) erreichen (z. B. durch Optimierung des Betriebs des Entwässerungsaggregats, Dünnschlamm-erwärmung mit Abwärme, Einsatz von Flockungshilfsmitteln). Wirtschaftliche und technische Gründe setzen hier allerdings Grenzen.

Der Bedarf an elektrischer Energie bei der Klärschlamm-trocknung resultiert vorrangig aus dem Betrieb des Trocknungsaggregats (Antrieb). Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Peripheriekomponenten, z. B. für den Klärschlamm-transport, die Brüdenbehandlung oder die Kesselanlage. Die elektrische Energiebedarf für das Gesamtsystem schwankt in Abhängigkeit vom Verfahren zwischen 70 und 110 kWh/(Mg H₂O).

Grundsätzlich steigt mit zunehmendem Trocknungsgrad der thermische und elektrische Energiebedarf.

1.5 Brüdenbehandlung (Energierückgewinnung, Kläranlagenrückbelastung, Emissionen)

Bei der thermischen Klärschlamm-trocknung fallen mit steigendem Trocknungsgrad zunehmende Mengen an Brüden an. Vor jeder weiteren Abgasbehandlung sollten die dem Trockner abgezogenen Brüden zuerst entstaubt werden. Danach müssen die Brüden kondensiert werden, um geruchsintensive organische Inhaltsstoffe abzuscheiden. Brüden sind grundsätzlich korrosiv; alle produktberührenden Teile (z. B. Rohre, Wärmetauscher) sind daher aus korrosionsbeständigen Materialien herzustellen bzw. zu beschichten.

Die Brüden enthalten einen Großteil der eingesetzten thermischen Energie zur Wasserverdampfung; diese lässt sich durch Auskondensation mit Wärmeauskopplung relativ einfach nutzen: z. B. für die Faulraum-, Gebäudeheizung, Vorwärmung des Rohschlammes, des zu entwässernden Dünnschlammes, der Verbrennungsluft der Kesselanlage (indirekt über Wärmetauscher), geringfügige Anhebung der Abwassertemperaturen in den Belebungsbecken (direktes Einblasen).

Je höher das Temperaturniveau liegt, bei dem die Kondensationswärme ausgekoppelt werden kann, desto effizienter (z. B. zur Gebäudeheizung) und auch technisch einfacher lässt sich die Abwärme nutzen. Dieses Niveau (Kondensationstemperatur, Taupunkt der Trocknerbrüden) hängt von der relativen Feuchte der Brüden ab. Diese ist bei Konvektionstrocknern etwa halb so hoch wie bei Kontaktstrocknern. Für die Nutzung in bestehenden Heizungsanlagen können bei Konvektionstrocknern rd. 25 %, bei Kontaktstrocknern rd. 75 % der eingebrachten Trocknungswärme ohne großen technischen Aufwand zurückgewonnen werden.

Das anfallende Brüdenkondensat wird abgezogen; es muss behandelt und dem Zulauf der Kläranlage zugeführt werden. Die Belastung des Brüdenkondensats ist von der Vorbehandlung des Klärschlammes (z. B. anaerobe oder aerobe Stabilisierung, Stabilisierungsgrad), der Klärschlamm- bzw. Korntemperatur während des Trocknungsvorgangs und dem Systemdruck abhängig. Insbesondere können hohe Ammonium-, BSB₅- und CSB-Belastungen des Brüdenkondensats auftreten.

Da die Kondensatmenge selbst bei Volltrocknung des Klärschlammes nur ca. 10 % der Zentrat-/Filtratmenge aus der Klärschlamm-entwässerung ausmacht, ist die Rückbelastung einer Kläranlage durch die Brüdenkondensate vergleichsweise als gering einzustufen und als Kriterium für eine Systementscheidung von untergeordneter Bedeutung. Dies trifft allerdings nicht für zentrale Klärschlamm-trocknungsanlagen zu, in denen der Klärschlamm mehrerer Kläranlagen getrocknet wird, die Brüdenkondensate aber nur der Standortkläranlage zufließen.

Die nicht kondensierbaren Brüdenanteile müssen aus Geruchsgründen weitergehend behandelt werden. Als verfahrenstechnische Lösung kommen hierfür Bio-, Kompostfilter, Biowäscher, Absorptions-, Adsorptionsanlagen, UV-Bestrahlung oder thermische Desodorierung (Verbrennung z. B. im Heizkessel des Klärschlamm-trockners, Blockheizkraftwerk, Monoklärschlamm-verbrennungsanlage, Kohlekraftwerk) in Frage.

Die Verbrennung der nicht kondensierbaren Brüden im Heizkessel des Klärschlamm-trockners ist bei Konvektionstrocknern problematisch. Aufgrund des erheblich größeren Brüdenluftvolumens und damit auch einer höheren Belastung des Brenners der Kesselanlage liegen sowohl die Kohlenstoffmonoxid- als auch die Stickstoffoxidkonzentrationen bei Konvektionstrocknern mit Brüdenverbrennung (50 - 70 mg/m³ CO; 125 - 260 mg/m³ NO_x) deutlich höher als bei entsprechenden Kontaktstrocknern (< 5 mg/m³ CO; ca. 100 mg/m³ NO_x). Bei der Wahl eines Konvektionstrocknungssystems ist insbesondere auf die Wahl des Brenners und des Verbrennungsluftsystems zu achten.

1.6 Entsorgungs-/Verwertungswege (Anforderungen an die Produktqualität)

Grundsätzlich kann getrockneter Klärschlamm allen Entsorgungswegen zugeführt werden, in denen auch mechanisch entwässertes Klärschlamm zum Einsatz kommt. Es sind dies v. a. die thermischen Entsorgungs-/Verwertungswege Verbrennung und Pyrolyse/Vergasung (energetische Verwertung, thermische Behandlung für Deponierung), daneben auch Landschaftsbau/Rekultivierung und in geringem Maß landwirtschaftliche Verwertung (stoffliche Verwertung). Durch die Trocknung werden die derzeitigen Klärschlamm Entsorgungswege aufrecht erhalten. Gleichzeitig erhöhen sich die Möglichkeiten, Klärschlamm anderweitig umweltverträglich zu entsorgen. Dabei kommt der Entsorgungs- und Verwertungssicherheit eine zentrale Rolle zu.

Aus Sicht des Arbeitsschutzes resultieren sicherheitstechnische Vorsichtsmaßnahmen aus den besonderen Eigenschaften des getrockneten Klärschlammes und insbesondere aus dessen Staubanteilen. Grundsatz der Klärschlamm Trocknung im Hinblick auf die Verwertungswege muss es aus sicherheitstechnischen, aber auch aus betriebstechnischen Gründen der Entsorgungswege sein, zunächst den Staubanteil so gering wie möglich zu halten.

Kommt eine Klärschlamm Trocknungsanlage in Betracht, ist im Vorfeld die Kostensituation im Vergleich zu anderen, ggf. regionalen Entsorgungsalternativen zu bewerten. Ganzheitliche Lösungen haben sowohl Umweltverträglichkeit, Kostengesichtspunkte als auch die Entsorgungssicherheit im Blickfeld. Dabei sind auch zukünftige Entwicklungen (z. B. Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen aus der Sicht des Umweltschutzes) und deren Auswirkungen sowohl auf den Betrieb der Klärschlamm Trocknungsanlage als auch auf die anvisierten Entsorgungs-/Verwertungswege in die Planung mit einzubeziehen. Die Akzeptanz des Produkts Klärschlamm dürfte insbesondere dann gesteigert werden, wenn thermische Trocknungsverfahren die hygienische Unbedenklichkeit des Klärschlammes sicherstellen.

Im Übrigen gilt, dass die Frage der Qualitätsanforderungen getrockneten Klärschlammes für jeden Entsorgungsweg neu zu stellen und im Hinblick auf die endgültige Entsorgung umwelttechnisch, arbeitsschutztechnisch und ökonomisch zu beantworten ist.

1.7 Genehmigungsanforderungen

Nach der Begriffsbestimmung des § 3 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [4] ist auch Abwasser bzw. Klärschlamm Abfall. Gemäß § 2 Abs. 2 KrW-/AbfG gelten die abfallrechtlichen Vorschriften jedoch nicht für Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasserbehandlungsanlagen eingeleitet oder eingebracht werden; hier sind die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) [5] und der Landeswassergesetze [6] anzuwenden.

Nach § 18a WHG ist die Klärschlamm entwässerung in Zusammenhang mit der Abwasserbeseitigung zu sehen. Nach Wasserrecht ist dementsprechend eine Abwasserbehandlungsanlage auch eine Einrichtung, die dazu dient, den anfallenden Klärschlamm für eine ordnungsgemäße Entsorgung aufzubereiten. Das Wasserrecht ist immer dann anzuwenden, wenn die Klärschlamm entwässerung im räumlichen und funktionalen Zusammenhang mit einer Abwasserbehandlungsanlage steht. Das trifft auch zu, wenn neben dem Klärschlamm der betreffenden Kläranlage auch Klärschlämme aus anderen Abwasserbehandlungsanlagen behandelt werden.

Als Klärschlamm entwässerung sind neben dem rein mechanischen Wasserentzug auch alle sonstigen Entwässerungsvorgänge definiert, die ganz oder überwiegend den Zweck haben, eine weitere Entsorgung/Verwertung des Klärschlammes sicherzustellen. Der Hauptzweck einer Klärschlamm-

trocknungsanlage ist und bleibt die Trocknung, d. h. der weitergehende Wasserentzug. Der Bau und Betrieb einer Klärschlamm-trocknungsanlage im räumlichen oder funktionalen Zusammenhang mit einer Abwasserbehandlungsanlage ist demnach nach WHG zu genehmigen.

Sind die Vorgänge der Klärschlamm-entwässerung jedoch in eine Anlage integriert, in der der Klärschlamm anschließend weiter behandelt, z. B. verbrannt wird, so ist auf den Hauptzweck dieser Klärschlammbehandlungsanlage abzustellen. Hier handelt es sich i. d. R. um eine Anlage, die einer Zulassung nach § 4 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [7] bedarf.

Abhängig von der grundsätzlichen Frage der Zuordnung zu Wasser- oder Abfallrecht ist zu prüfen, ob im Rahmen des Genehmigungsverfahrens weitere Anforderungen zu erfüllen sind. So hat ggf. nach den §§ 3 ff. des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) [8] und Anlage 1, Nr. 13.1, in Verbindung mit dem Landesrecht [6] vom Antragsteller eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung bzw. von der Genehmigungsbehörde eine Umweltverträglichkeitsprüfung als un-selbstständiger Bestandteil des Genehmigungsverfahrens zu erfolgen.

Immissionsschutzrechtliche Vorschriften sind zu beachten, wenn eine Anlage zur Wärmeerzeugung im Zusammenhang mit der Klärschlamm-trocknungsanlage errichtet und betrieben werden muss. In Abhängigkeit vom eingesetzten Energieträger und der installierten Feuerungswärmeleistung sind die Genehmigungsanforderungen für Wärmeerzeuger gemäß 1. BImSchV [9], TA Luft [10] oder 13. BImSchV [11] zu erfüllen. Darüber hinaus können sich genehmigungsrelevante Tatbestände aus den Ziffern 8.10 und 8.13 der 4. BImSchV [12] ergeben.

Neben den immissionsrechtlichen Regelungen sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. So sind die landesrechtlichen Verordnungen über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAwS) [] zu beachten. Darüber hinaus sind, speziell wenn die Klärschlamm-trocknungsanlage nicht im räumlichen Zusammenhang mit einer Kläranlage steht und somit besondere Maßnahmen zur Behandlung bzw. Ableitung von Abwässern wie Brüdenkondensaten zu treffen sind, die landesrechtlichen Verordnungen zur Einleitung von Stoffen und Abwasser in die Kanalisation (Indirekteinleiterverordnungen) [6] bzw. die Abwasserverordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (AbwV) [14] einzubeziehen. Im letzteren Fall bedarf die Abwassereinleitung in ein Gewässer einer behördlichen Erlaubnis nach § 7 WHG; dabei sind die Anforderungen nach § 7a WHG einzuhalten.

Ebenso sind baurechtliche und brandschutztechnische Belange zu beachten. Mögliche Auflagen und Vorgaben sind frühzeitig mit der örtlichen Baubehörde bzw. Feuerwehr abzustimmen. I. d. R. werden hier spezielle Forderungen nach konstruktivem Brandschutz, Brandmeldeanlagen, Löschwasserspeichern usw. erhoben.

Weiterhin sind Vorgaben, resultierend aus einschlägigen Verwaltungsvorschriften (z. B. TA Luft, TA Lärm [15]), sowie die Unfallverhütungsvorschriften der zuständigen Berufsgenossenschaften und Fachbehörden für Arbeitsschutz zu berücksichtigen.

2 Klärschlamm Trocknung – Baustein einer integrierten Abfallwirtschaft?

Unserer Kenntnis nach ist Trocknungstechnik für kommunale Klärschlämme derzeit in Bayern an 36 Standorten installiert. Hiervon sind 21 Anlagen thermische Trocknungsanlagen, die i. d. R. in mittelgroßen bis großen Kläranlagen, vereinzelt auch in Müllverbrennungsanlagen baulich integriert sind. Gerade in jüngster Zeit sind viele solare Klärschlamm Trocknungsanlagen in Betrieb gegangen. Die inzwischen 15 Anlagen stehen meist an kleineren und mittelgroßen Kläranlagen (bis zu 15.000 Einwohnerwerte); daneben gibt es Anlagen, die den Klärschlamm von bis zu 110.000 Einwohnerwerten solar trocknen.

Von den 21 thermischen Klärschlamm Trocknungsanlagen sind einige derzeit jedoch nicht in Betrieb. Entweder gingen diese Anlagen noch nie in (z. B. in Müllverbrennungsanlagen integrierte Trockner) oder sie wurden aus unterschiedlichen Gründen in der Zwischenzeit wieder außer Betrieb genommen: z. B. technische Probleme beim Anlagenbetrieb, fehlende Akzeptanz beim bedienenden Kläranlagenpersonal, Anliegerbeschwerden über Geruchsbelästigungen o. Ä. In den allermeisten Fällen waren es jedoch wirtschaftliche Erwägungen, die zum Abschalten der Trocknungsanlagen führten; andere Entsorgungs-/Verwertungswege stellten sich oft günstiger gegenüber der vergleichsweise kostenintensiven thermischen Trocknung dar.

Etliche Klärschlamm Trocknungsanlagen wurden zu groß ausgelegt. Geplant war ursprünglich, an diesen Anlagen auch Fremdschlämme mitzubehandeln. Nachdem sich diese Planungen aus den unterschiedlichsten Gründen oftmals nicht umsetzen ließen, werden die Anlagen derzeit intermittierend betrieben. Inwieweit die getätigten Investitionen anlagentechnisch/energetisch/wirtschaftlich sinnvoll und nachhaltig sind, sei dahingestellt.

Alle diese (Negativ-)Beispiele belegen, wie wichtig es ist, dass der relativ teure Verfahrensschritt Klärschlamm Trocknung vorher optimal in die gesamte Verfahrenskette der Klärschlammbehandlung/-entsorgung integriert sein muss, um technisch und wirtschaftlich sinnvoll betrieben werden zu können (– und wie weit man teilweise in der Realität noch davon entfernt ist).

Ziel muss es sein, langfristige Entsorgungs-/Verwertungswege vertraglich sicherzustellen. Der eingesetzte Klärschlamm (als Schadstoffsenke der Abwasserbehandlung) darf sich bei jeglichen Verwertungsmaßnahmen nicht negativ auf den Verwertungsprozess oder die in ihm gebildeten Prozessstoffströme/-produkte auswirken (z. B. Emissionen von Kohlekraftwerken, Klinkerqualität von Zementwerken). Bei nicht kontinuierlich verfügbaren Verfahren (z. B. längere Revisionsstillstände bei Zementwerken) muss durch entsprechende logistische Maßnahmen (z. B. Zwischenlagerung) dafür Sorge getragen werden, dass eine ganzjährige Entsorgungssicherheit gewährleistet ist. Auf der anderen Seite muss natürlich ebenso sichergestellt sein, dass am Standort der Verwertungsmaßnahme jederzeit auch ausreichende Mengen an zu verwertendem Klärschlamm mit den notwendigen Eigenschaften und in der notwendigen Qualität verfügbar sind.

Fazit

Die gesamte Verfahrenskette der Klärschlammbehandlung vom Nassschlamm hin zum (z. B. thermisch behandelten) Endprodukt ist hinsichtlich der Kriterien langfristige Entsorgungssicherheit, Kostenminimierung, Umweltverträglichkeit und Arbeitsschutz (einfache, sichere Technik) zu konzipieren. Diese Gesichtspunkte gelten insbesondere auch für die Klärschlamm Trocknung als wichtiger Baustein der Behandlungskette.

Da die thermische Trocknung wesentlich energie- und damit auch kostenintensiver als die maschinelle Entwässerung ist, sollte der zu trocknende Klärschlamm möglichst weitgehend mechanisch entwässert werden.

Das Trocknungsverfahren sollte aus Brand- und Explosionsschutzgründen sowie hinsichtlich einer besseren Handhabbarkeit bei nachfolgenden Entsorgungs-/Verwertungsschritten geeignet sein, ein granulatförmiges Produkt zu erzeugen.

Die Klärschlamm-trocknungsanlage ist energetisch (z. B. Abwärmenutzung für Trocknung, Nutzung der Brüdenwärme), stofflich (z. B. Kläranlagenrückbelastung) und logistisch (z. B. Nassschlamm-/Produktlagerung, -transport) optimal in die Gegebenheiten des Standorts einzubinden.

Insbesondere ist in Bezug auf die Effizienz der gesamten Klärschlammbehandlungskette eine optimale Abstimmung der einzelnen Behandlungsstufen von enormer Wichtigkeit. In die Gesamtkonzeption ist der beabsichtigte weitere Entsorgungs-/Verwertungsweg mit den individuellen Anforderungen an die Eigenschaften und Qualität des getrockneten Klärschlammes (z. B. Trocknungsgrad, Korngrößenverteilung, Schadstoffbelastung) unbedingt mit einzubeziehen. Das bedeutet, dass vor der Entscheidung über ein Trocknungsverfahren der spätere, langfristige Entsorgungs-/Verwertungsweg des Trockenguts und damit die hierfür notwendigen Produkteigenschaften festzulegen sind.

Literatur

- [1] Anonym:
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2004.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2005
ISBN 3-936385-83-1
<http://www.bayern.de/lfu/abfall/index.html>
- [2] Anonym:
Gewässerschutz in Bayern – Abwasseranlagen – Lagebericht 2004. 2. Auflage.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Oktober 2005
<http://www.bayern.de/lfw/service/download/lagber04.pdf>
- [3] Anonym:
ATV-DVWK-Regelwerk – Merkblatt ATV-DVWK-M 379: Klärschlamm-trocknung.
ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef,
Februar 2004
ISBN 3-924063-36-2
- [4] Anonym:
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz). Vom 27. September 1994.
BGBl. I (1994), S. 2705; zuletzt geändert 1.9.2005, S. 2618
- [5] Anonym:
Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG – Wasserhaushaltsgesetz). Vom 19. August 2002.
BGBl. I (2002) 59, S. 3245; zuletzt geändert 25.6.2005, S. 1746

- [6] Anonym:
Bayerisches Wassergesetz (BayWG). Vom 19. Juli 1994.
GVBl. (1994), S. 822; zuletzt geändert 26.7.2005, S. 287
- [7] Anonym:
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BImSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz). Vom 26. September 2002.
BGBl. I (2002) 71, S. 3830; zuletzt geändert 25.6.2005, S. 1865
- [8] Anonym:
Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Vom 25. Juni 2005.
BGBl. I (2005) 37, S. 1757; zuletzt geändert 24.6.2005, S. 1794, ber. S. 2797
- [9] Anonym:
Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) – Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. Vom März 1997.
BGBl. I (1997), S. 491; zuletzt geändert 14.8.2003, S. 1614
- [10] Anonym:
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Vom 24. Juli 2002.
GMBI. (2002) 25 – 29, S. 511
- [11] Anonym:
Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (13. BImSchV) – Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen. Vom 20. Juli 2004.
BGBl. I (2004) 37, S. 1717; ber. 15.11.2004, S. 2847
- [12] Anonym:
Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) – Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Vom 14. März 1997.
BGBl. I (1997), S. 504, S. 548; zuletzt geändert 20.6.2005, S. 1687
- [13] Anonym:
Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (VAwS – Anlagenverordnung) – Bayern. Vom 18. Januar 2006.
GVBl. (2006) 2, S. 63
- [14] Anonym:
Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (AbwV – Abwasserverordnung). Vom 17. Juni 2004.
BGBl. I (2004) 28, S. 1108; ber. 2004, S. 2625
- [15] Anonym:
Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm). Vom 26. August 1998.
GMBI. (1998), S. 503

Solare Klärschlamm-trocknung am Beispiel AZV-Füssen

Franz Petz, Abwasserzweckverband Füssen

Beschreibung AZV und Klärwerk

Der Abwasserzweckverband Füssen wurde 1976 gegründet und besteht seit 1983 aus der Stadt Füssen und den Gemeinden Schwangau, Hopferau und Eisenberg. Nach 2 Jahren Bauzeit konnte die Kläranlage am 15.12.1983 ihren Betrieb aufnehmen.

Die Kläranlage liegt am Westufer des Forggensees auf einer Höhe von 800 m ü. NN.

Die Gemeinden werden überwiegend im Mischsystem entwässert, wobei bei Kanalneubauten das Trennsystem bevorzugt wird. Das auf ca. 3 ha Grund gelegene Klärwerk hat eine Ausbaugröße von 70.000 EW, besitzt eine anaerobe Schlammstabilisierung und ist für biologische Nährstoffelimination ausgelegt. Die mittlere Belastung beträgt etwa 43.500 EW, wobei etwa 10.000 EW auf gewerbliche Einleitungen entfallen. Durch das saisonal bedingte Fremdenverkehrsaufkommen mit ca. 2 Mio. Übernachtungen pro Jahr unterliegt der Abwasseranfall großen saisonalen Schwankungen mit Spitzenbelastungen von bis zu etwa 140.000 EW.

Beschreibung der solaren Trocknung

Die solare Trocknungsanlage des AZV Füssen wurde im Frühjahr 1999 von der Universität Hohenheim gemeinsam mit der Fa. Thermosystem, Industrie- & Trocknungstechnik GmbH konzipiert und Ende 1999 von der Fa. Thermosystem, Industrie- & Trocknungstechnik GmbH im Rahmen der Erüchtigung der Anlage errichtet. Abbildung 1 [1] zeigt eine schematische Darstellung mit Funktionsweise der Anlage.

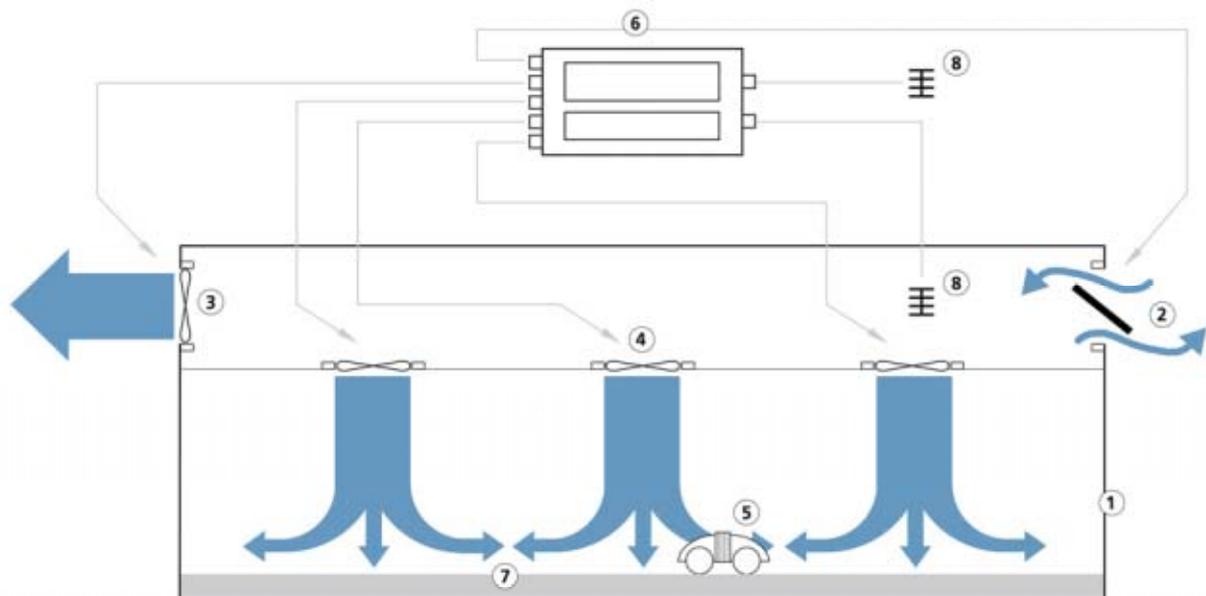


Abb. 1: Funktionsweise des solaren Klärschlamm-trockners Typ Thermo-System

- ① Geschlossene transparente Bauhülle, ② Lüftungsclappen, ③ Entlüftungsventilatoren, ④ Umluftventilatoren, ⑤ „Elektrisches Schwein“, ⑥ Mikroprozessor, ⑦ Entwässerungsboden bei Nassschlammanlagen, ⑧ Sensoren für Temperatur, relative Feuchte, Solarstrahlung und Wind.

Die Konstruktion der Solaranlage mit 4 unabhängigen Trocknungshallen basiert auf einer verstärkten Gewächshauskonstruktion, die auf einer befestigten Fläche mit seitlichen Betonwänden errichtet wird. Hierfür konnte auf dem Klärwerk Füssen die zu diesem Zeitpunkt bereits vorhandene Schlamm-Lagerplatte genutzt werden. Die geschlossene, transparente Bauhülle aus Polykarbonat-Stegdoppelplatten ist mit gesteuerten Lüftungsclappen und drehzahlgesteuerten Entlüftungsventilatoren ausgerüstet, um unkontrollierten Luftaustausch zu verhindern und periodisch große Mengen an Frischluft einzuschleusen. Dadurch wird der größtmögliche Nutzen aus dem Trocknungspotential der Umgebungsluft gezogen, welches von der direkt auf die Schlammoberfläche einfallenden Sonnenstrahlung unabhängig ist. Zweistufige Umluftventilatoren im Innern der Trocknungskammer sorgen regelmäßig für eine turbulente Luftströmung auf der Schlammoberfläche, um Grenzschichten wassergesättigter Luft von den Schlammpartikeln abzulösen und somit die Trocknungsleistung zu erhöhen. Während des gesamten Prozesses werden alle trockenungstechnisch wichtigen Parameter wie Globalstrahlung, Temperatur und relative Feuchte der Trocknungs- und der Umgebungsluft, Windgeschwindigkeit, Schlammtemperatur und der Trockenrückstandsgehalt des Schlammes von einem eingebauten Mikroprozessor alle zwei Sekunden gemessen bzw. berechnet und ausgewertet. Dieser Mikroprozessor steuert alle Komponenten der Anlage vollautomatisch.

Die Misch- und Wendeeinrichtung, das „Elektrische Schwein“ hat eine Größe von ca. 1 mal 2 Meter und besitzt zwei langsam rotierende Achsen mit dünnen Metallrädern. Jede Achse hat eine individuelle Umdrehungsgeschwindigkeit und ist mit unterschiedlichen, den Schlamm-eigenschaften angepassten Mischwerkzeugen ausgerüstet. Mit Hilfe von 6 Ultraschallsensoren sowie einem Mikroprozessor wird das „Elektrische Schwein“ in der Trocknungskammer vollautomatisch gesteuert. Während des Trocknungsverlaufs wird der Schlamm witterungs- und TR-gehaltsabhängig bis zu 12 mal täglich durchmischt, um eine geruchsfreie und effiziente Trocknung zu erreichen.



Abb. 2: „Elektrisches Schwein“

Aufgrund der ausgeklügelten Steuerung kann der Trocknungsvorgang vollständig automatisch durchgeführt werden. Eingriffe durch das Betriebspersonal sind nur beim Beschicken und Räumen der Anlage erforderlich. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Abmessungen der Trocknungsanlage und die Leistungsdaten der elektrischen Verbraucher.

Tab. 1: Abmessungen und Leistungsdaten

	Gesamtanlage	Je Kammer
Abmessungen		
Länge [m]	50	50
Breite [m]	40	10
Grundfläche [m ²]	2000	500
Senkrechte Stehwandhöhe [m]	4,0	
Höhe Begrenzungsmauer [m]	1,1	
Elektrische Verbraucher		
Deckenventilatoren	4 Stück je Kammer (P _{max} =0,9 kW, V=24000 m ³)	
Wandventilatoren	2 Stück je Kammer (P _{max} =0,9 kW, V=24000 m ³)	
Wendeeinrichtung	1 elektrisches Schwein je Kammer (P _{max} =2,0 kW)	
Wärmetauscher	1 Stück je Kammer (P _{el} = 0,75kW) (P _{therm} = 100kW)	

Betrieb der solaren Trocknungsanlage

Die für den Betrieb der Anlage wichtigen Vorgaben sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der Chargenbetrieb hat sich in Füssen als vorteilhaft erwiesen. Hierbei wird eine Halle als Puffer für entwässerten und getrockneten Schlamm benutzt. Auf diese Weise lassen sich Engpässe die durch Verzögerungen beim Schlammabtransport zur Verwertung, bei der Trocknung im Winterbetrieb oder bei einer längeren Schlechtwetterperiode auftreten können, problemlos ausgleichen.

Tab. 2: Betriebsvorgaben

	% TR	Füllhöhe	Befüllmenge in m ³	Trocknungszeit
Betriebsbedingungen im Sommerhalbjahr	65 - 75	25 - 30 cm	120 - 150	2 - 5 Wochen
Betriebsbedingungen im Winterhalbjahr	65 - 70	12 - 20 cm	60 - 100	4 - 8 Wochen

Bei Betrachtung der Vorgaben der TR-Gehalte ist zu beachten, dass in Füssen schon mehrere Chargen gezielt auf > 90 % getrocknet wurden, für den derzeitigen Verwertungsweg aber der in Tabelle 1 dargestellt TR-Gehalt von 65 - 75 % vorteilhaft ist. In Abhängigkeit vom End-Trockenrückstandsgehalt sind bei einer Befüllmenge von 120 – 150 m³ vom Frühjahr bis in den Herbst Trocknungszyklen von 2 bis 5 Wochen möglich. Im Winterbetrieb wird die Füllmenge auf 60 - 100 m³ reduziert. In dieser Jahreszeit werden die Trocknungszyklen sehr stark von Frostperioden beeinflusst, da bei wochenlangen Temperaturen von -10 bis -20 °C der Schlamm kaum trocknet. Da die Abwärme nur im Sommerhalbjahr zur Verfügung steht, friert der Schlamm bei längeren Frostperioden manchmal ein. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da die Wendemaschine dann abgeschaltet wird. Nach den oben gezeigten Vorgaben richtet sich die Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte die im Verlauf der Trocknung notwendig sind. Dazu zählen:

- Befüllen der Kammern
- Kontrolle über den Fortschritt der Trocknung durch wöchentliche Bestimmung des TR-Gehaltes

- Entleeren der Kammern
- Wartungsarbeiten (Abschmieren der Lager der Wendemaschine alle 3 - 4 Monate)

Befüllen der Trocknungshalle

Die Halle (ca. 500 m²) wird in einem Arbeitsgang aus dem Zwischenlager mit einem Radlader befüllt (Abb. 3).



Abb. 3: Befüllung der Anlage mittels Radlader

Der Schlamm hierbei wird ziemlich grob in drei Reihen in die Halle gefüllt (Abb. 4 + 5). Die einzelnen Haufen sollen dabei möglichst nicht höher als 0,5 m sein, wobei kleinere Fehlstellen keine Rolle spielen, da das elektrische Schwein beim Mischen und Wenden gleichzeitig den Schlamm verteilt und die Oberfläche einebnet. Größere Haufen von bis zu 1,5 m werden zwar ebenfalls eingeebnet, sofern die Gesamtfüllmenge nicht zu hoch ist, dies dauert aber deutlich länger wie bei einer gleichmäßigen Verteilung. Insgesamt beträgt der Arbeitszeitbedarf pro Beschickung etwa eine Stunde.



Abb. 4 + 5: Schlammverteilung im Innern der Trocknungsanlage

Die Füllmengen sind in Tabelle 1 nachzulesen. Nachdem die Halle mit Schlamm befüllt ist, wird das Schwein mittels einer Fernbedienung in die Halle gefahren, ein Absperrband, das als Barriere für die Ultraschallsensoren des elektrischen Schweins dient, wird am Halleneingang angebracht. Die Tore werden dann geschlossen und die Trocknungshalle wird in den Automatikbetrieb geschaltet. Jetzt kann der Trocknungsvorgang durch die Eingabe der Schlammmenge und des aktuellen TR-Wertes gestartet werden.

Kontrolle über den Fortschritt der Trocknung durch Bestimmung des TR-Gehaltes

Die Mikroprozessor der Anlage berechnet während der Trocknung ständig den TR-Gehalt des Schlammes, der sich gerade in der Trocknungsanlage befindet. Um den Trocknungsfortschritt der Anlage zusätzlich zu überwachen und gegebenenfalls zu korrigieren, wird zusätzlich der TR-Gehalt alle 7 Tage gemäß DIN EN [2], analysiert. Routinekontrollen und TR-Bestimmung erfordern nur relativ wenig Zeit von insgesamt etwa 1 Akh (Akh = Arbeitskraftstunde) pro Trocknungszyklus.

Entleeren der Trockenhalle

Nach Erreichen des gewünschten Trockenrückstands von 65 - 75 % TR kann mit dem Entleeren der Trocknungshalle begonnen werden. Nach Möglichkeit wird dieser Vorgang mit dem gleichzeitigen Beladen eines LKWs verbunden und der getrocknete Klärschlamm zur weiteren Behandlung in ein Kohlekraftwerk transportiert. Dazu werden die Tore auf die gesamte Hallenbreite geöffnet, das Absperrband entfernt und das Schwein mittels der Fernbedienung aus der Halle gefahren. Um Beeinträchtigungen durch Gerüche oder Staub in der Halle zu minimieren werden die Abluftventilatoren manuell auf volle Leistung geschaltet. Jetzt kann ein LKW in einem Arbeitsgang mit ca. 27 t getrockneten Schlamm durch einen Radlader beladen werden. Die Restmenge wird in ein Zwischenlager verbracht. Ist aus speditionstechnischen Gründen kein LKW zum Termin der Entleerung vorhanden kann der Schlamm im hinteren Bereich der Trocknungshalle zusammengeschoben oder in die Lagerhalle verbracht und zwischengelagert werden. Generell ist die Räumung problemlos und mit einem Arbeitszeitbedarf von ca. 1 Akh auch schnell zu erledigen.

Wartungsarbeiten

Wartungsarbeiten fallen überwiegend am elektrischen Schwein an. Dazu gehören bei normalen Betriebsbedingungen nur das Abschmieren der Lager und die Kontrolle der die Hack- und Wendewerkzeuge haltenden Schrauben im Abstand von 3 - 4 Monaten. Durch die geringe Größe des elektrischen Schweins kann es zur Durchführung der Wartungsarbeiten sehr einfach mit dem Radlader in die vorhandene Werkstatt transportiert werden. Dadurch lassen sich die Arbeiten witterungsunabhängig durchführen, was vor allem im Winter (Kälte) und im Sommer (Hitze oder Regen) ein großer Vorteil ist.

Arbeitszeitbedarf

Arbeitsaufwand bei der solaren Trocknung ohne Transport von der maschinellen Schlammmentwässerung im Jahr 2002.

		Aks
Füllen der Halle aus dem Zwischenlager a` 100 t bei 2100 t/a [21 Befüllungen Sommer / Winter]	21 x 1Aks	21
Entleeren der Halle mit Verbringung der Restmenge ins Zwischenlager bei gleichzeitiger Beladung des LKW	21 x 1Aks	21
Beladen LKW aus Zwischenlager 700 t : 27 t/LKW = 26 Transporte	(26 – 21) x 1 Aks	5
Reinigen Vorplatz und Radlader	26 x 1 Aks	26
Wartung, Reparatur und Kontrolle TR	21 x 1 Aks	21
	Summe	94

Arbeitsaufwand bei Lagerung auf dem Schlamm lagerplatz ohne Transport von der maschinellen Schlammmentwässerung (umgerechnet für 2002).

2100 t /a		Aks
Beladen LKW 2100 t : 27 t/LKW = 78 Transporte	78 x 1 Aks	78
Reinigen Platz und Radlader	78 x ½ Aks	39
	Summe	117

Aufgrund der Schlammreduzierung durch die weitgehenden Automatisierung, dem geringen Wartungsaufwand und dem Batch-Betrieb ist der insgesamt anfallende zusätzliche Arbeitsaufwand als sehr gering einzustufen und kann mit vorhandenem Personal erledigt werden.

Bewertung

Das Verfahren hat sich als robuste und zuverlässige Technologie bewährt. Während der Anfangszeit noch gelegentlich auftretende kleinere Störungen, wurden vom Hersteller stets umgehend behoben.

Der Energiebedarf ist mit etwa 25 kWh elektrischer Strom pro Tonne Wasserentzug erheblich geringer als bei anderen Trocknungsverfahren und auch der Betriebsaufwand ist denkbar gering.

Eine Einsparung ergibt sich in der Schlammmentwässerung. Auf Grund der äußerst geringen Energiekosten bei der solaren Trocknung wurde die Entwässerungsleistung der Zentrifuge von 30 – 34 % TR auf 25 - 28 % TR zurückgenommen und der Betrieb erfolgt nur noch auf Durchsatzleistung. Daraus ergibt sich neben einem problemloseren Betrieb ein geringerer Energieverbrauch sowie ein geringerer Verschleiß bei der maschinellen Schlammmentwässerung.

Beim AZV Füssen konnte die Entsorgungsmenge seit Inbetriebnahme der Anlage um jahresdurchschnittlich über 1.400 t reduziert und damit erhebliche Transport- und Entsorgungskosten eingespart werden.

Literatur

- [1] BUX, M., R. BAUMANN, J. PINNEKAMP, S. QUADT und W. MÜHLBAUER: Solare Trocknung von Flüssigschlamm in kleinen Kläranlagen. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 49 (2002) Nr. 3, S. 341-344.
- [2] ANONYM: EN 12880: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Gruppe S, Teil 2: Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes; Beuth Verlag, Berlin, 2001.

Entsorgung dezentraler Kläranlagen: Das „Modell Straubing“

Johann Buchmeier, Stadt Straubing

Inhaltsübersicht

1. Kurzvorstellung der Kläranlage Straubing
2. Fakten zur Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage Straubing
3. Gründe für die Entscheidung zur Klärschlammverbrennung
4. Rechtliches zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen
5. Umgesetztes Konzept zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen
6. Kosten für die Mitbehandlung von Fremdschlämmen
7. Zusammenfassung

1. Kurzvorstellung der Kläranlage der Stadt Straubing

Die Kläranlage Straubing wurde 1967 als mechanische Kläranlage errichtet und 1989 zur biologischen Abwasserreinigung mit Vorklärung erweitert. Die derzeitige Ausbaugröße liegt auf Basis der BSB₅-85%-Frachten bei ca. 187.000 EW. Die Ablaufanforderungen hinsichtlich CSB (75 mg/l, erklärt auf 40 mg/l), BSB₅ (15 mg/l), NH₄-N (10 mg/l) und P_{ges} (1 mg/l, erklärt auf 0,6 mg/l) können mit der bestehenden Anlage sicher erreicht werden.

Allerdings wurde der Grenzwert für N_{anorg.} (NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N) von 13 mg/l überschritten, da bei der ursprünglichen Auslegung der Kläranlage keine Möglichkeit zur Denitrifikation vorgesehen wurde. Eine Verbesserung der Denitrifikationsleistung wurde daher in drei Bauabschnitten angestrebt:

1. Einrichtung einer separaten Prozesswasserbehandlung nach dem Verfahren der Luftstripung mit anschließender Saurer Wäsche (in Betrieb seit 12/1999),
2. Ausbau der Gesamtanlage mit Einrichtung einer vorgeschalteten Denitrifikation und Rezirkulation (in Betrieb seit 12/2002)
3. Ausbau der Gesamtanlage mit hydraulischen Optimierungen (in Betrieb seit 12/2005)

Seit 01.01.2006 kann auch der Grenzwert für N_{anorg.} (13 mg/l, erklärt 9 mg/l) sicher eingehalten werden.

Die Prozesswasserbehandlung (1. Bauabschnitt) ist seit ca. 7 Jahren in Betrieb und hat sich im Betrieb sowohl hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, des Energie- und Hilfsmitelesinsatzes als auch hinsichtlich des Wartungsaufwandes bewährt. Die mittleren Stickstoffablaufkonzentrationen sind im Jahre 2000 gegenüber 1999 um ca. 25 % zurückgegangen und lagen für den Ammoniumstickstoff unter 1 mg/l und für den Parameter N_{anorg.} im Mittel in der Größenordnung von 18 mg/l.

Neue Ablaufanforderungen hinsichtlich der Gesamtstickstoffelimination, die im Rahmen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie gestellt wurden, machten jedoch die vorgesehenen weiteren Bauabschnitte (2. und 3. BA) notwendig. Sowohl im zweiten als auch im dritten Bauabschnitt waren jeweils Reduzierungen von mindestens 20 % der Stickstofffracht im Ablauf der Kläranlage erforderlich, um die vom Gesetzgeber geschaffene Motivation der Verrechnung der Investitionen mit der Abwasserabgabe nach den Vorgaben des AbwAG §10 Abs. 3, bzw. BayAbwAG Art. 9 zu nutzen.

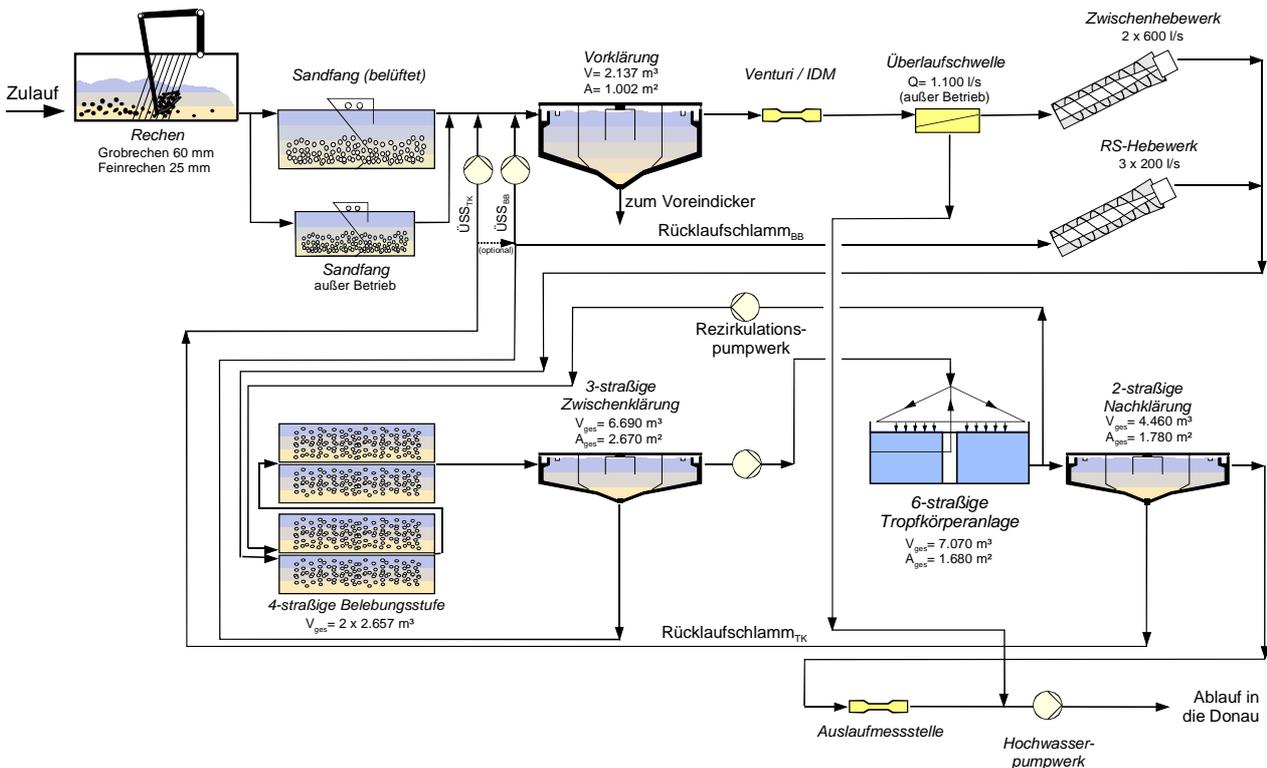


Abb. 1.1: Verfahrensschema Klärwerk Straubing

2. Fakten zur Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage Straubing

Bei der Reinigung des vorwiegend häuslichen Abwassers mit der oben beschriebenen Anlage kommt es allerdings unweigerlich zu dem „Nebenprodukt“ Klärschlamm, das in den letzten Jahren zu intensiven Diskussionen geführt hat.

Nach einer ersten Abtrennung von Feststoffen mit einem automatisierten Rechen setzen sich die im häuslichen Abwasser enthaltenen Feststoffe mit einem hohen organischen Anteil in der Vorklä- rung ab (Primärschlamm). Anschließend werden die aus dem Abwasser zu eliminierenden Nähr- stoffe, die sonst zu einer Überlastung der Gewässer führen würden, von Mikroorganismen zum Teil unter Bildung von neuer Biomasse (Überschussschlamm) verstoffwechselt.

In Abbildung 2.1 sind die Verfahrensschritte und Stoffströme der Schlammbehandlung auf der Kläranlage Straubing schematisch zusammengefasst und gekennzeichnet.

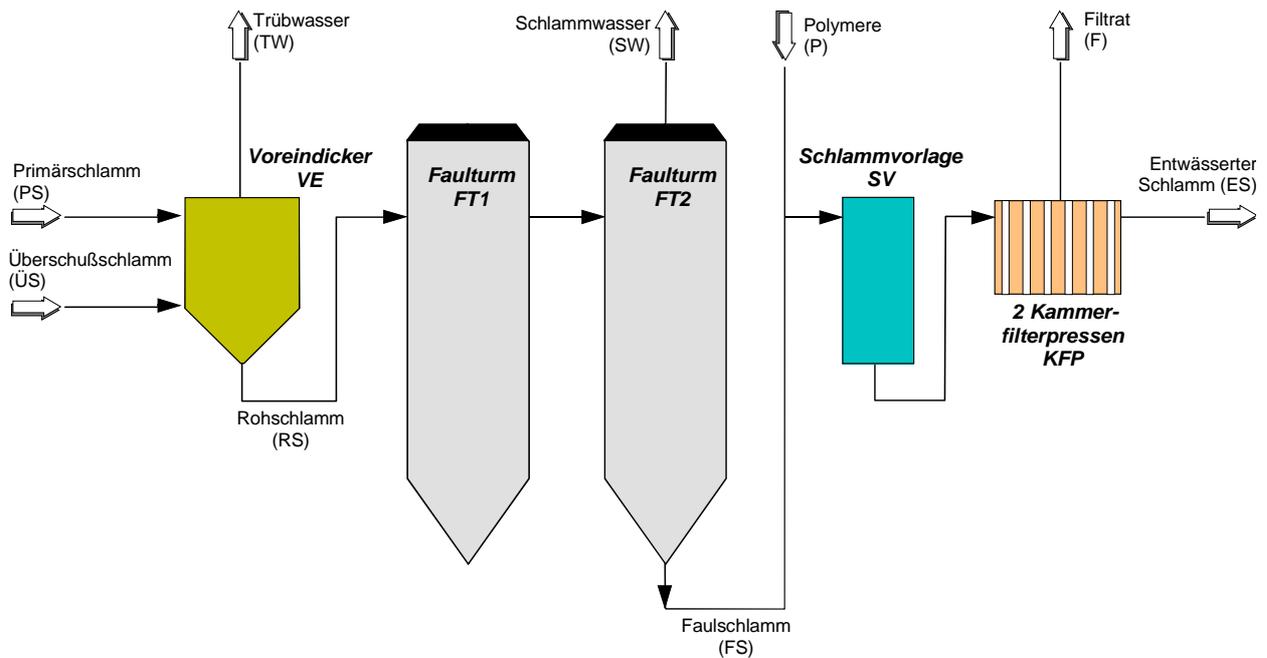


Abb. 2.1: Verfahrensschema Schlammbehandlung

Der Primärschlamm und der Überschussschlamm werden in einem Voreindicker statisch eingedickt. Der eingedickte Schlamm wird vom Voreindicker in zwei Faultürme zur anaeroben Stabilisierung weitergegeben. Die Faultürme werden zur Zeit in Reihe geschaltet betrieben. Die Verweilzeit des Schlammes in den Faultürmen liegt bei über 30 Tagen. Damit gilt der ausgefaulte Klärschlamm grundsätzlich als seuchenhygienisch unbedenklich.

Der Faulschlamm wird aus den Faulbehältern durch Beschickung mit eingedicktem Rohschlamm verdrängt und aus einer Vorlage zwei Kammerfilterpressen zugeführt, wo er unter der Zugabe von Polymeren entwässert wird.

In Abbildung 2.2 ist die Auswertung der Daten zur Schlammmentwässerung aus den Jahren 2004 bis Mitte 2006 dargestellt. Im Durchschnitt fallen auf der Kläranlage Straubing täglich ca. 140 m³ Faulschlamm mit einem Feststoffgehalt von ca. 3,5 % an. Dieser Schlamm wird durch die maschinelle Schlammmentwässerung mit einer Kammerfilterpresse auf Feststoffgehalte von mindestens 30 % entwässert. Im Jahresdurchschnitt fallen so auf der Kläranlage Straubing bis zu 5.000 t/a als Klärschlamm an. Zur Verdeutlichung der Verhältnisse: Mit einer solchen Klärschlammmenge könnte man im 16 m-Raum eines Fußballfelds einen annähernd 10 m hohen „Abwehrblock“ aufstellen.

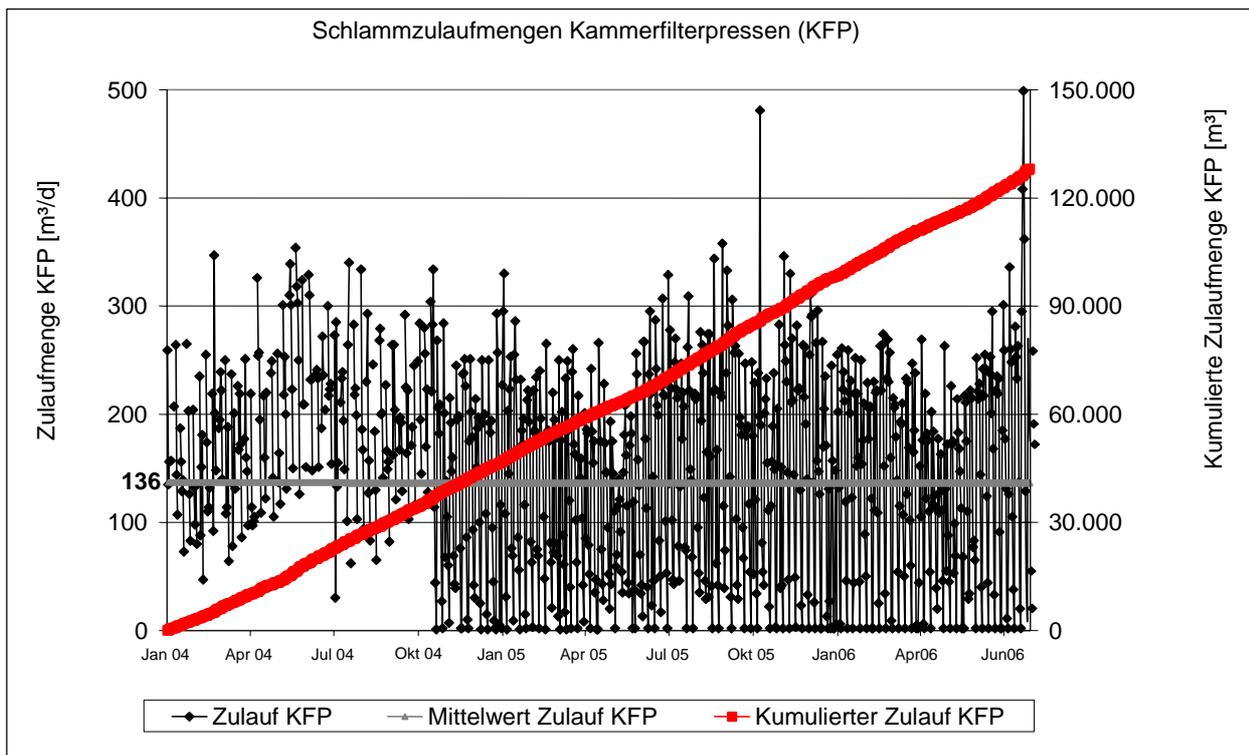


Abb. 2.2: Faulschlammengen auf der Kläranlage Straubing

3. Gründe für die Entscheidung zur Klärschlammverbrennung

Bis zum Jahr 2000 wurde dieser Klärschlamm, da er den Anforderungen der Klärschlammverordnung in jedem Fall genügte, annähernd vollständig landwirtschaftlich verwertet. Auch zur Zeit erfüllt der anfallende Klärschlamm weiterhin die Anforderungen zur landwirtschaftlichen Verwertung.

Im Jahr 2001 entstand jedoch Handlungsbedarf für die Stadt Straubing. Im Zuge der BSE-Krise und vor dem Hintergrund, dass eine Übertragung von Erregern durch Klärschlamm von den Fachbehörden nicht ausgeschlossen werden konnte, hat sich die Stadt Straubing entschieden, den Klärschlamm nicht mehr landwirtschaftlich zu verwerten, sondern verbrennen zu lassen. Insbesondere die Verantwortung der Stadt Straubing als Oberzentrum in der Gäuboden-Region war hierfür ausschlaggebend. Unterstützt wurde diese Umstellung in der Klärschlammverwertung durch die Entscheidung fast aller Landwirte, keinen Klärschlamm mehr auf die Felder aufbringen zu lassen. Zwar gab es kein ausgesprochenes Verbot, Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen einzusetzen, aber die Unsicherheit und Ungewissheit führte dazu, dass de facto kein Klärschlamm mehr ausgebracht werden konnte und sich statt dessen auf der Kläranlage Straubing stapelte.

Während auf der Kläranlage Straubing als Großkläranlage hierfür ausreichend Platz in Schlammstapelbeeten vorhanden war, mussten einige kleinere Kläranlagen aus der Umgebung kurzfristig auf diese neue Situation reagieren und dabei zum Teil erhebliche Mehrkosten auf sich nehmen. In der Regel wurde der Klärschlamm der kleinen Kläranlagen in Speicherbehältern über ca. ein halbes Jahr gespeichert und anschließend während der Vegetationsperioden als Dünschlamm in die Landwirtschaft verbracht. Der Wegfall der landwirtschaftlichen Verwertung bedeutete daher für die meisten Gemeinden nicht nur eine einmalige Belastung für die Schlamm Entsorgung, sondern

hätte darüber hinaus zum Aufbau einer eigenen Schlammentwässerung oder zu zusätzlichen Kosten für eine Lohnentwässerung des Schlammes geführt. Bei einer Umstellung auf Lohnentwässerung, bei der in einem kurzen Zeitraum eine große Schlammmenge entwässert wird, wäre zusätzlich auch ein wasserwirtschaftliches Problem aufgetreten. Durch die Rückbelastung mit dem Schlammwasser wären die Kläranlagen kurzzeitig so stark belastet worden, dass eine Einhaltung der Grenzwerte im Ablauf der Kläranlage nur schwer möglich gewesen wäre.

Hier kommt der Stadt Straubing zugute, dass im Jahr 1999 eine Anlage zur separaten Behandlung der Rückbelastung nach dem Verfahren der Luftstrippung mit anschließender Saurer Wäsche installiert wurde. Bei diesem Verfahren wird der im Prozesswasser enthaltene Stickstoff zu einem zu verwertenden Produkt (Ammonium-Sulfat) umgewandelt und so von Abwasserinhaltsstoff zum Wertstoff.

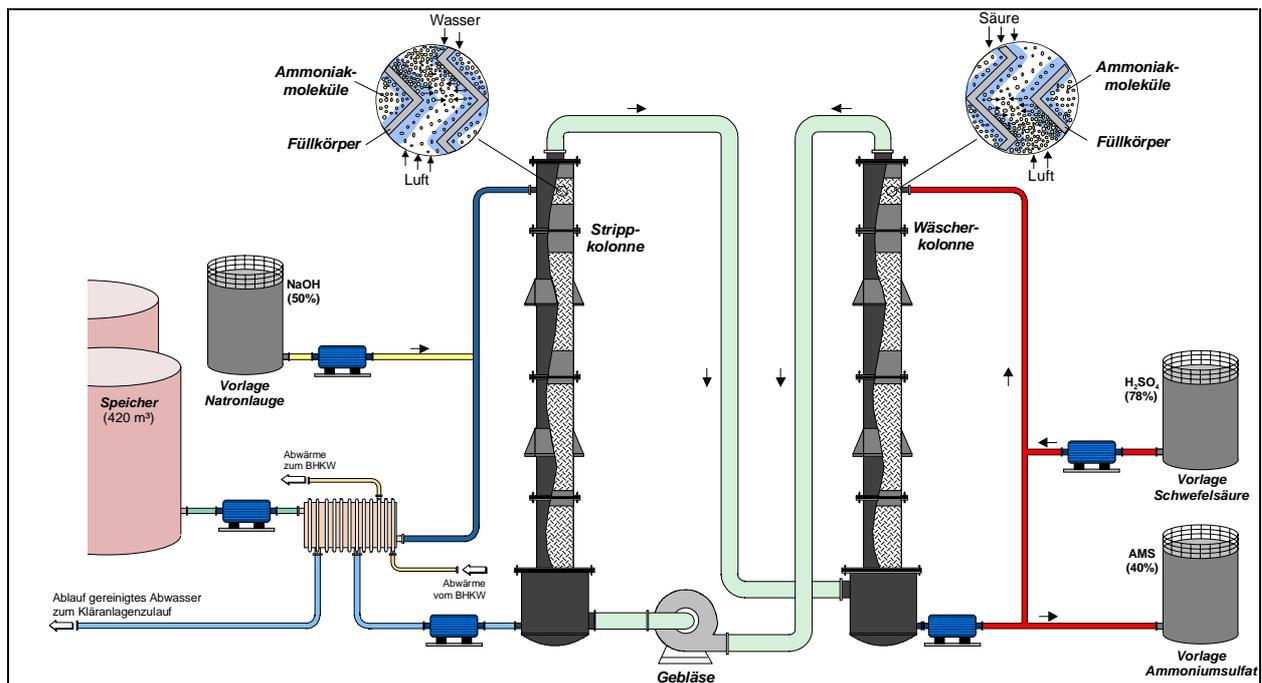


Abb. 3.1: Luftstrippung mit anschließender Saurer Wäsche auf der Kläranlage Straubing

Vor diesem Hintergrund wurde von der Stadt Straubing in Zusammenarbeit mit dem Zweckverband für Abfallwirtschaft (ZAW) den Gemeinden angeboten, den auf den kleineren Kläranlagen anfallenden Klärschlamm auf der Kläranlage Straubing mitbehandeln und gezielt verwerten zu lassen.

Um für die nächsten Jahre Planungs- und Entsorgungssicherheit zu haben, hat die Stadt im Rahmen einer Ausschreibung daher die thermische Entsorgung des Klärschlammes über einen Zeitraum von 10 Jahren angefragt und vergeben.

4. Rechtliches zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen

Die Tatsache, dass es in den letzten Jahren immer wieder Diskussionen über Klärschlamm gegeben hat, zeigt, dass dieser kein ausschließlich begehrtes Gut ist.

Diesem Umstand wird auch dadurch Rechnung getragen, dass Klärschlamm nach der Schlamm-entwässerung als Abfall angesehen wird. Dies ist jedoch für die Betreiber von Kläranlagen keine Besonderheit, da ja auch für Abwasser, das der Kläranlage zufließt, grundsätzlich die Kriterien des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (§ 3) zutreffen, die an Abfall gestellt werden. So ist das Wasserhaushaltsgesetz in seiner Ausformulierung in den Landeswassergesetzen für die Genehmigung zu Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen eine Konkretisierung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts. Dem entsprechend ergeben sich auch zwei Sichtweisen für die Mitbehandlung von Schlämmen auf der Kläranlage Straubing.

Zum einen besteht der als Fremdschlamm angelieferte Stoffstrom zu ca. 95 % aus Wasser und ist daher als Abwasserstrom anzusehen. Der Transport ist dann als „Kanal auf Rädern“ anzusehen. Nach dieser Auslegung handeln auch die Abwasserverbände in anderen Bundesländern, die zentrale Schlammbehandlungsanlagen betreiben. Dafür spricht auch, dass Faultürme und Schlamm-entwässerung auf Kläranlagen als ursächlich mit der Abwasserreinigung zusammenhängende Gewerke nach Wasserrecht und nicht nach der BImSchV genehmigt werden.

Eine zweite Auslegungsmöglichkeit ist, den Stoffstrom als Klärschlamm und damit als Abfall aufzufassen, da die Definition des § 3 des KrW/AbfG zutrifft, wonach alle beweglichen Sachen (...), deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss Abfälle sind. Der Hauptzweck der Mitbehandlung von Fremdschlämmen ist sicher nicht die Nutzung des Klärschlammes nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten, sondern die Beseitigung.

Im Fall der Kläranlage Straubing wurde die erste Sichtweise von den Behörden bestätigt, so dass der Klärschlamm aus anderen Kläranlagen angenommen werden konnte, ohne dass die Kläranlage Straubing dadurch zur Abfallbehandlungsanlage wird.

Eine gegenteilige Entscheidung hätte zur Folge gehabt, dass die Stadt Straubing ihr Angebot den Umlandgemeinden gegenüber hätte zurückziehen müssen, da dann eine Genehmigung der Gesamtkläranlage nach BImSchG und eine Umweltverträglichkeitsprüfung für den gesamten Standort notwendig geworden wäre.

5. Umgesetztes Konzept zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen

Aufgrund der positiven Entscheidung des Genehmigungsrahmens wurde daher im Herbst mit der Planung eines Schlammstapelbehälters begonnen, der im Jahr 2002 in Betrieb genommen wurde. In diesen abgedeckten Behälter mit einem Volumen von 500 m³ wird der Schlamm, der von Transportunternehmen von den umliegenden Kläranlagen abgeholt wird, über eine Übergabestation gepumpt. Die Freischaltung und Auswertung der Übergabestation ist über ein Chip-Kartensystem so gestaltet, dass automatisch aus den Angaben auf der Chip-Karte eine Rechnung an den Anlieferer erstellt werden kann.

Aus dem Schlammstapelbehälter kann der angelieferte Schlamm entweder direkt zur Schlamm-entwässerung gepumpt werden oder in die Faultürme der Kläranlage.

Wird der Schlamm zuerst in die Faultürme gepumpt, kommt es dort zu einer Durchmischung und Homogenisierung mit dem Klärschlamm der Kläranlage Straubing. Durch diese Durchmischung soll eine gleichmäßig gute Entwässerungseigenschaft des Schlammes gewährleistet werden. Soll der Schlamm direkt zur Schlammmentwässerung gepumpt werden, so kann diese Vergleichmäßigung auch durch die Beschickung des Schlammstapelbehälters mit ausgefaultem Schlamm aus dem Faulturm erfolgen. In diesem Fall wird der Schlammstapelbehälter als Nacheindicker und Vorlage vor der Schlammmentwässerung betrieben.

Abbildung 5.1 zeigt eine Ansicht der Schlammstapelbehälters zur Zeit der offiziellen Einweihung.



Abb. 5.1: Schlammstapelbehälter für externe Schlämme auf der Kläranlage Straubing

6. Kosten für die Mitbehandlung von Fremdschlämmen

Im Vorfeld der Vertragsabschlüsse der Stadt Straubing mit den Umlandgemeinden wurde eine detaillierte Kostenberechnung durchgeführt, die eine Nachvollziehbarkeit der Kosten und eine Kostenanpassung bei unterschiedlichen angelieferten Schlämmen berücksichtigt. Insgesamt ist derzeit für die Anlieferung von 1 m³ Rohschlamm mit einem Feststoffgehalt von 4 % ein Preis von ca. 19 € zu zahlen. Dieser Preis beinhaltet die Schlammmentwässerung und Verbrennung mit ordnungsgemäßigem Nachweis. Die Kosten werden dabei wesentlich (ca. 75 %) von Kosten für die externe Verbrennung bestimmt, wie auch an der detaillierten Aufstellung in Abbildung 6.1 zu erkennen ist.

Kostenanteile der Klärschlammverwässerung und -verwertung				
derzeitige Jahresschlammmenge [m³RS]:			50.000 m³/a	
Feststoffgehalt:			5 Gew.%	
zusätzliche Jahresschlammmenge vom ZV [m³RS]:			18.000 m³/a	
Feststoffgehalt:			4 Gew.%	
notwendige Investitionen:			[DM]	Anteil ZAW
1. Rührer, Räumer und Übergabestation			150.000	150.000
2. Zusätzlichen Schlammspeicher (500 m³)			250.000	250.000
3. Zusätzliche Meßgeräte für Schlammanalytik im Labor			20.000	20.000
Investitionskosten			420.000	420.000
<u>Jährliche Fixkosten</u>			DM/a	Anteil ZAW
3. Kapaldienst AT	(10 Jahre,	6 %)	20.400	20.400
4. Kapaldienst BT	(20 Jahre,	6 %)	21.800	21.800
5. Wartung, Reparaturen für AT			1.500	1.500
6. Wartung, Reparaturen für BT			1.250	1.250
7. Versicherungen			1.500	1.500
8.a Personalkosten Betrieb	(0,3 MA mit	65 TDM/MA/a)	19.500	19.500
8.b Personalkosten Verwaltung	(0,3 MA mit	70 TDM/MA/a)	21.000	21.000
Zwischensumme I				86.950
spez. Fixkosten [DM/m³ RS]				4,83
<u>Betriebskosten</u>			DM/m³	Anteil ZAW
09. Erneuerung Filtertücher	(20 TDM/a)		0,29
10. Polymere	(7300 DM/t,	0,2 kg/m³ RS)	1,46	1,46
11. Brauchwasser	(5 DM/m³,	0,2 m³/m³ RS)	1,00	1,00
12. Elektrische Energie	(0,30 DM/kWh,	3 kWh/m³ RS)	0,90	0,90
13. Reinigungsmittel (HCl)	(48 DM/t HCl,	0,2 kg/m³ RS)	0,01	0,01
14. Verbrennung entw. Schlamm	(620 DM/t TS,	40 kgTS/m³ RS)	24,80	24,80
15. Rückbelastung	(3 DM/m³,	1 m³/m³ RS)	3,00	3,00
16. Zusätzliche Analytikskosten	(10 DM/Analyse,	1 Analyse/25m³ RS)	0,40	0,40
17. EisenIIIchlorid	(200 DM/t	2,3 kg/m³ RS)	0,46	0,46
18. Ersatzteile KFP	(20 TDM/a)		0,29
Zwischensumme II				32,62
spez. Betriebskosten [DM/m³ RS]				32,62
spezifische Gesamtkosten [DM/m³ RS]				37,45

Abb. 6.1: Kostenanteil für die Mitbehandlung von Fremdschlämmen

7. Zusammenfassung

Aufgrund der in den letzten Jahren aufgebauten technischen Möglichkeiten, war die Stadt Straubing kurzfristig in der Lage, auf die Unsicherheiten bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zu reagieren und eine mittelfristige Entsorgung durch Verbrennung anzustreben.

Neben der sicheren Entsorgung der eigenen Klärschlammengen konnte die Stadt Straubing den umliegenden Gemeinden eine Mitbehandlung des dort anfallenden Klärschlammes anbieten. Aufgrund der rechtlichen Randbedingungen (Genehmigung der Mitbehandlung nach Wasserrecht) und technischen Verhältnisse auf der Großkläranlage (ausreichende Entwässerungskapazität, separate Behandlung des Schlammwassers) konnte so zu einem wirtschaftlich fairen Preis eine Entsorgung für die gesamte Region angeboten werden, die auch das politisch gewünschte Konzept

weg von der Landwirtschaft hin zur Verbrennung unterstützt. Gerade für Kläranlagen bis 10.000 EW ist das überörtliche Klärschlamm Entsorgungskonzept, wie es die Stadt Straubing ermöglicht, eine zukunftsorientierte und langfristige Alternative.

Besonders daran ist, dass durch die Art der Behandlung der Rückbelastung ein Großteil des im Schlamm enthaltenen Wertstoffs, nämlich Stickstoff als Ammoniumsulfat zurückgewonnen werden kann.

Derzeit stehen Planungen über weitere Verfahrensschritte in der Klärschlammverwertung an. Faulturnsanierung, Mitbehandlung von anderen Co-Substraten, Klärschlamm Trocknung, in Abhängigkeit einer günstigen Energiequelle, sind Maßnahmen, die wir 2006/2007 realisieren wollen. Die Ziele, Langfristige Entsorgungssicherheit, stabile optimierbare Entsorgungspreise, Minderung des CO₂ Ausstoßes durch unnötigen Transport von Wasser, sowie Ökologisch sinnvolle Verwertung des Abfallproduktes Klärschlamm stehen im Mittelpunkt unserer Bemühungen.

Klärschlamm-Mono-Verbrennung in der Wirbelschicht beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“, Neu-Ulm

Dipl. Ing. (FH) Georg Hiller, Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“, Neu-Ulm

1 Einführung:

Die Wirbelschichtverbrennung mit Vortrocknung, Wärmenutzung und Verwertung der Reststoffe ergänzt die Abwasserreinigungskonzepte durch eine ganzjährig gesicherte, umweltfreundliche und ordnungsgemäße Schlammbehandlung.

Voraussetzung einer ordnungsgemäßen Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung mit Verwertung der Reststoffe ist der Vollzug der Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer mit den entsprechenden Anhängen. In der Verordnung wird bundesweit die Vermeidung, Vorsortierung und Verwertung von Schadstoffen im Abwasser nach Herkunftsbereichen festgelegt. Die Umsetzung dieser Verordnung gewährleistet, dass bei der Abwasserreinigung ein schadstoffreduzierter Klärschlamm entsteht. Die restlichen nichtvermeidbaren Schadstoffe werden bei der therm. Behandlung des Klärschlammes mit Wirbelschichtanlagen in wieder verwertbare bzw. deponierfähige Stoffe verwandelt.

Am Beispiel der Klärschlammverbrennungsanlage des Zweckverbandes „Klärwerk Steinhäule“ in Neu-Ulm werden im folgenden allgemeine Entwicklungskriterien sowie Besonderheiten der Wirbelschichtfeuerung mit Vortrocknung aufgezeigt.

2 Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“

Im Jahre 1984 haben sich die Städte Ulm, Neu-Ulm, Senden sowie die Blautal- und Weihungstalgemeinden zum Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ zusammen-geschlossen.

Die Verbandskläranlage reinigt die Abwassermengen von z. Zt. 360.000 EW. Hiervon entfallen auf Industrie und Gewerbe rd. 40 %. Die Abwasserreinigung erfolgt mechanisch, biologisch und chemisch. Jährlich müssen rd. 40 Mio. cbm Abwasser gereinigt werden. Dabei entstehen ca. 10.000 t TS Schlamm, 350 to Rechengut und Fett, sowie 120 t Sandfanggut. In den Schlammverbrennungsanlagen werden die Schlammmenge, Rechengut und Fett, sowie das Sandfanggut auf rd. 2.500 t TS Asche reduziert. Die Asche wird einer Wiederverwertung zugeführt.

Zukünftig erfolgt die Abwasserreinigung durch eine Adsorptionsstufe mit Aktivkohle und einer Filteranlage. Durch die Aktivkohledosierung wird der Schlammanfall um 3 - 5 % erhöht. Ab dem Jahr 2007 ist vorgesehen 15.000 m³ Fremdschlamm mit 25 % TS zusätzlich zu verbrennen.

3 Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung und -verwertung

Bis Anfang der 70er Jahre wurden die Abwässer nur mechanisch gereinigt. Der in den Vorklärbecken abgeschiedene Schlamm wurde ausgefault und in Schlamm-trockenbeeten getrocknet.

Die Verwertung des ausgefaulten Klärschlammes in der Landwirtschaft war nur begrenzt möglich. Deshalb wurde der Klärschlamm in vorhandenen Deponien untergebracht. Mit der Inbetriebnahme der biologischen Reinigungsstufe und durch den Anschluss weiterer Stadtteile und Gemeinden haben sich die Schlamm-mengen erheblich erhöht. Die Unterbringung dieser großen Schlamm-mengen auf den Deponien bereiteten dann wegen des schwierigen Einbaues und auch aus Kapazi-tätsgründen große Probleme.

Diese und viele andere Faktoren führten schließlich dazu, den Schlamm mit Zentrifugen zu ent-wässern und anschließend zu verbrennen. Dass diese Entscheidung langfristig richtig war, zeigen die Entwicklungen beim Gewässer-, Natur- und Bodenschutz sowie bei der Abfallentsorgung.

Beim Gewässer- und Naturschutz ist vorgesehen, das Einzugsgebiet des Zweckverbandes „Klär-werk Steinhäule“ auf bis zu 50 % als Wasser- und Naturschutzgebiet auszuweisen. Nach der Ver-ordnung über Schutzbestimmungen in Wasser- und Quellschutzgebieten darf Klärschlamm und Gülle in Baden-Württemberg je nach Bodenart und Bepflanzung für bestimmte Zeiträume nicht auf landwirtschaftlich genutzte Böden ausgebracht werden. Der kürzeste Zeitraum für das Düngever-bot liegt zwischen dem 15. Oktober bis 31. Januar und der längste Zeitraum wurde von der Ernte ab bis 15. Februar [3] festgesetzt. Eine weitere Einschränkung der landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes erfolgte durch die Klärschlammverordnung, mit den entsprechenden Aufbrin-gungsverboten. Auch die Abfallverwertung, die immer mehr Kompost aus Nahrungsmitteln und Grünabfällen erzeugt, reduziert den Flächenanteil für eine landwirtschaftliche Klärschlammverwer-tung.

Die Ausbringung von Klärschlamm nach der Klärschlammverordnung vom 15.04.1992 ist wegen dem vorsorgeorientierten Boden- u. Gewässerschutz nicht mehr zu vertreten. Bei der direkten Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft wird ein weitgehend unbekanntes Vielstoffgemisch aus Haus-, Industrie-, Pharmazie- u. Gewerbechemikalien in den Boden einge-bracht [2].

Durch die Thermische Behandlung werden die Schadstoffe im Klärschlamm zerstört und die Rest-stoffe in deponierfähige bzw. wieder verwertbare Stoffe verwandelt.

Die Rückgewinnung des Rohstoffes Phosphor aus dem Abwasser bzw. aus dem Klärschlamm als auch aus der Verbrennungasche ist technisch möglich [4]. Ein marktfähiger Preis kann jedoch z. Zt. für die Gewinnung von schadstofffreien Phosphorsalzen aus Abwasser bzw. aus Klär-schlamm oder Asche nicht erzielt werden.

Der Stickstoffgehalt im Klärschlamm ist für eine ordnungsgemäße landwirtschaftliche Bodennut-zung nicht erforderlich.

Mit dem Luftstickstoff bzw. dem Güllestickstoff steht der Landwirtschaft genügend Stickstoff für die Pflanzen zur Verfügung.

Nach dem Bundesbodenschutzgesetz (17.03.1998) [1] sollen „nachhaltig die Funktionen des Bo-dens gesichert“ und die Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen soweit wie möglich vermieden werden.

Hauptziel einer umweltorientierten Abfallwirtschaft ist eine emissionsarme nachhaltige stoffliche Entsorgung, die keine „Stoffkredite“ in Form von Deponien an die nachfolgenden Generationen weitergibt [5].

In den Jahren 1988 und 1989 wurden in Ulm und Neu-Ulm die Deponien aus Kapazitätsgründen geschlossen.

Nach der Schließung der Deponien in Ulm und Neu-Ulm hat der Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ außer der Deponierung der Reststoffe aus der Kläranlage die Verwertung der Reststoffe verstärkt weiterverfolgt. Seit November 1990 werden die gesamten Reststoffe aus der Klärschlammverbrennungsanlage als Bergbaumörtel im Untertagebau verwertet.

Nach dem eine Deponierung des Klärschlammes nicht mehr möglich ist und der Deutsche Bauernverband und einzelne Länderminister von einer landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen abraten, verbleibt als langfristiger sicherer Verwertungsweg nur noch die thermische Klärschlammverwertung.

Die thermische Verwertung des Klärschlammes erfolgt z. Zt. in Müllheizkraftwerken in Mono-verbrennungsanlagen und in Kohlekraft- und Zementwerken.

Beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ erfolgt die thermische Behandlung von Klärschlamm in einer Monoverbrennungsanlage (Wirbelschichtanlagen). Die thermische Klärschlammverwertung in einer Wirbelschichtanlage ist eine umweltverträgliche Lösung, bei der die Energie im Schlamm optimal genutzt und die Reststoffe im Bergbau als Versatzbaustoffe verwertet werden.

4 Verfahren

Im Jahre 1973 wurde in Ulm/Neu-Ulm eine der ersten Wirbelschichtverbrennungsanlagen für Klärschlamm erstellt. Die in den ersten Betriebsjahren dieser Anlage gesammelten Erfahrungen gaben der Wirbelschichttechnik neue Impulse.

Daten der Wirbelschichtanlagen

Anlage I (1973 - 1987)

Durchsatzleistung	1-1,3 to TS/h 5-6,5 cbm/h Schlamm mit 20 % TS
Entwässerung	Zentrifugen
Feuerungssystem	Wirbelschicht
Energierückgewinnung	Luftvorwärmung
Brenngut	Rohschlamm und Heizöl
Rauchgasreinigung	Elektrofilter

Anlage II (1979)

wie Anlage I mit folgenden Zusatzeinrichtungen:

Energierückgewinnung	Luftvorwärmung und Dampferzeugung
Rauchgasreinigung	Elektrofilter und Nasswäsche
Nutzung der Dampfwärme	- Beheizung der Betriebsgebäude - Erwärmung des Schlammes vor den Zentrifugen - Verkauf an die Industrie

Die Erweiterung des Einzugsgebietes und der fortschreitende Ausbau der Regenwasserbehandlung machten eine weitere Vergrößerung der Verbrennungskapazität notwendig. Die Verteuerung der Zusatzbrennstoffe einerseits und die beengten Platzverhältnisse andererseits führten zum Konzept einer autarken Verbrennung mit thermischer Vortrocknung des Schlammes.

Daraus resultiert für die Feuerung eine größere Leistungsdichte und für die Gesamtanlage eine entsprechende Kapazitätssteigerung. Wegen dem erforderlichen Abhitzeessel und die nicht mehr ausreichende Rauchgasreinigung wurde der Ofen I durch den Ofen III ersetzt.

Anlage III (1987)

Durchsatzleistung	1 to TS/h = 5 cbm Schlamm 20 % TS 2,5 to TS/h = 7 cbm Schlamm 35 % TS
Entwässerung	Zentrifugen rd. 2,5 to TS/h
Trocknung	Dünnschicht-Schlammrockner
Feuerungssystem	Wirbelschicht
Energierückgewinnung	Luftvorwärmung u. Dampferzeugung
Brenngut	Rohschlamm
Rauchgasreinigung	Kalkstein zur Schadstoffeinbindung Elektrofilter
Nutzung der Dampfwärme	- Beheizung der Betriebsgebäude - Erwärmung d. Schlammes i. d. Trocknern - Verkauf an die Industrie

Anlage II (1987)

wie Anlage III mit folgender Zusatzeinrichtung:

Rauchgasreinigung	Nasswäsche
-------------------	------------

Anlage II u. III (1995)

mit folgenden Zusatzeinrichtungen:

Rauchgasreinigung	- Entstickungsanlage, 2-stufige Nasswäsche u. Gewebefilter
-------------------	--

Anlage II u. III (2000)

mit folgender Zusatzeinrichtung:

Nutzung der Dampfwärme	- Stromgewinnung
------------------------	------------------

4.1 Klärschlamm – Vorbehandlungsstufen

Die Schlammzusammensetzung, -behandlung, -entwässerung und -trocknung sind wichtige Faktoren für die Dimensionierung der Wirbelschicht- und Rauchgasreinigungsanlagen sowie deren optimalen Betrieb. Die Klärschlamm-Vorbehandlungsstufen haben bei der Klärschlammverbrennung beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Die Herstellung eines homogenen Brennstoffes aus der regenerativen Biomasse "Klärschlamm";
- Reduzierung des Wassergehaltes im Schlamm damit eine autarke Verbrennung erreicht wird.

4.2 Schlammzusammensetzung:

Der Brennstoff wird sehr stark beeinflusst von der Schlammzusammensetzung. Ein schadstoffarmer Schlamm ist Voraussetzung für eine ordnungsgemäße Verwertung der Verbrennungsrückstände.

Beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ konnten die Inhaltsstoffe im Abwasser durch eine ständige Beratung der Gewerbe- und Industriebetriebe erheblich reduziert werden. Die Inhaltsstoffe im Klärschlamm liegen alle unter den zulässigen Grenzwerten nach der Klärschlammverordnung.

Im Rahmen der Beratung sowie auch im Rahmen der Bearbeitung von Baugesuchen bzw. wasserrechtlichen Verfahren für Abwasservorbehandlungsanlagen hat die Vermeidung und Verwertung von Stoffen oberste Priorität.

Abwasservorbehandlungsanlagen müssen nicht nur die Verwaltungsvorschriften für das Einleiten von Abwasser in öffentliche Abwasseranlagen erfüllen, sondern auch zusätzliche Auflagen einhalten, die eine thermische Schlammbehandlung sowie eine Verwertung der Rückstände ermöglichen.

4.3 Schlammbehandlung

Im Klärwerk Steinhäule wird der Überschussschlamm aus der biologischen Anlage mit Floccungsmittel eingedickt und mit dem Schlamm aus den Vorklärbecken über Vorlagebehälter der Entwässerung zugeführt.

Der wirtschaftliche Einsatz einer anaeroben Schlammstabilisation vor einer Klärschlammverbrennung ist abhängig vom Heizwert und von der Entwässerbarkeit des ausgefaulten Schlammes.

Im Klärwerk Steinhäule wurde die Schlammfäulung nicht mehr erweitert und die anaerobe Schlammstabilisation schließlich aus folgenden Gründen eingestellt:

- Die Entwässerbarkeit des ausgefaulten Schlammes war schlechter als die des Rohschlammes.
- Bei der Klärschlammverbrennung tritt durch den Verfahrensschritt "Schlammfäulung" ein Energieverlust gegenüber der direkten Verbrennung des Schlammes auf.
- Der betriebliche Mehraufwand einer Schlammfäulung kann in Ulm nicht durch eine bessere Entwässerung bzw. Vergleichmäßigung des Schlammes kompensiert werden.

4.4 Entwässerung

Die Entwässerung des Schlammes erfolgt mit Zentrifugen. Der Schlamm wird mit organischen Flockungshilfsmitteln entwässert und mit Brüden aus der Trocknungsanlage auf ca. 40 - 60° C erwärmt.

Daten-Dekanter

Schlammart	Rohschlamm
Schlammtemperatur	50° C
TS-Eingang Mittelwert	4,5 % Bereich 4 - 5 %
TS-Austrag Mittelwert	25 % Bereich 23 - 27 %
Flockungshilfsmittel-	
Einsatz Mittelwert	5,0 kg/tTS Bereich 4,0 - 6,0 kg/tTS
Abscheidegrad	> 95 %
Durchsatzleistung	2 Zentrifugen mit je 50 - 70 cbm/h bei 5 % TS 2 Zentrifugen mit je 20 - 30 cbm/h bei 5 % TS

Die Zulaufverschmutzung vor der Kläranlage erhöht sich bei der Rückführung des Abwassers aus der Schlamm-entwässerung beim BSB₅, CSB und NH₄-N bei der Brüdenkondensation im Schlamm um 15 - 30 %.

Alternativ können auch die Brüden mit Brauchwasser kondensiert werden. Die Zulaufverschmutzung vor der Kläranlage wird dabei beim BSB₅, CSB und NH₄-N um 10 - 25 % erhöht.

4.5 Transporteinrichtung

Der Transport des Schlammes erfolgt mit Schneckenförderer u. Dickschlamm-pumpen.

4.6 Schlamm-trocknung

Ziel der Schlamm-trocknung im Klärwerk Steinhäule ist, den Schlamm soweit vorzutrocknen, dass eine autarke Verbrennung erreicht wird. Bei einem Heizwert (Hu) von 11.000 - 15.000 kJ/kg TS und einem Wassergehalt von 55 - 65 % erfolgt die Verbrennung des Schlammes ohne Zusatzenergie (Öl oder Gas).

Eine Trocknung auf über 90 % TS bzw. < 10 % Wassergehalt wurde aus folgenden Gründen nicht gewählt:

- Bei der Trocknung < 50 % TS muss die Klebezone des Schlammes nicht durchfahren werden.
- Eine Rückmischung um Schlamm mit Trockengut aufzukonzentrieren ist nicht notwendig, damit können weitere Aggregate wie Mischer, Silo und Transporteinrichtungen eingespart werden.
- Die Selbstentzündungseigenschaften von getrockneten Klärschlämmen bei der Trocknung, Bunkerung und Lagerung sowie die Staubexplosionsgefahr ist bei einer Trocknung < 50 % TS ausgeschlossen.

Als Trocknungsverfahren wurde die Kontakt-trocknung oder indirekte Schlamm-trocknung gewählt, damit die Brüden (Gemisch aus Wasserdampf, leichtflüchtige Schlamm-teile und Transportluft) in der Wirbelschichtverbrennung ohne zusätzliche Abluftbehandlungsanlagen und ohne Störung des Verbrennungsprozesses verbrannt werden können.

Zur Auswahl des geeigneten Verfahrens wurden drei verschiedene Versuchstrockner installiert und beheizt mit dem Dampf des Ofens II. Alle Trockner wurden über mehrere Wochen betrieben. Als Versuchstrockner wurde ein Dünnschichttrockner, Scheibentrockner und ein Knetztrockner getestet.

Alle drei Aggregate brachten zufrieden stellende Ergebnisse und eine Trocknung bis weit in den Bereich der autarken Verbrennung.

Nach der Wertung der Angebote fiel die Wahl auf den Dünnschichttrockner der Fa. Buss. Der Trockner der Fa. Buss hat wegen der kurzen Aufenthaltszeit des Schlammes im Trockner ein geringes Füllvolumen und eine gute Regelfähigkeit und schnelle Anpassung an wechselnde Betriebsverhältnisse. Der Schlammaustrag und damit die Brennstoffzufuhr ist gleichmäßig. Eine Zwischenlagerung des getrockneten Schlammes ist nicht erforderlich. Gleichzeitig ermöglicht der Trockner im Störfall ein schnelles Ausräumen und eine gute Zugänglichkeit.

Beim Dünnschichttrockner wird der Klärschlamm auf die dampfbeheizte Gehäusewand so verteilt, dass die Schlammschicht ca. 5 Millimeter stark ist und der eingebrachte Schlamm den Trockner in nur 2 - 4 Minuten durchläuft. Dabei wird der Schlamm auf ca. 100° C erwärmt. Die Beheizung des Trockners erfolgt mit Sattdampf von ca. 6 bar und einer Heiztemperatur von ca. 159° C.

Daten – Dünnschichttrockner

Spez. Wasserverdampfung	kg H ₂ O/qm ² h	70 - 90
Thermische Energie / kg Wasserverdampfung ohne Wirkungsgrad d. Dampferhitzers	kJ/Kg H ₂ O	ca. 2.600
Spez. Leistung	KWh/t H ₂ O	25 – 30
Drehzahl	Upm	132
Aufenthaltszeit	min	2 – 4
Schlammzugabe	% TS	20 – 25
Schlammaustritt	% TS	35 - 45

Die Brüdenkondensation erfolgt in zwei Mischkondensatoren.

Im ersten Mischkondensator wird Dünnschlamm durch die Energie der Brüden aus der Schlamm-trocknung auf 40° C - 50° C erwärmt. Dadurch wird die anschließende mechanische Schlamm-twässerung verbessert. Überschüssige Brüden können in einem nachgeschalteten zweiten Mischkondensator unter Zugabe von Wasser kondensiert werden. Eine nicht kondensierbare geringe Brüdenmenge wird ständig abgesaugt und in den Feuerraum des Wirbelschichtofens geleitet. Auf diese Weise wird dafür gesorgt, dass im gesamten Brüdensystem – einschließlich des Trockners – stets ein leichter Unterdruck herrscht und keine unerwünschten üblen Gerüche austreten können.

4.7 Wirbelschichtverbrennung

Mit der Wirbelschichtfeuerung wurde ein Verbrennungssystem gewählt, das sich für Brennstoffe mit unterschiedlicher Konsistenz eignet. Für die Verbrennung von Abwasserschlamm mit einem Wassergehalt von 50 - 80 % hat sich dieses Verfahren in zahlreichen Anlagen bewährt.

Wirbelschichtöfen zur Klärschlammverbrennung sind gemauerte Öfen mit einem Düsenboden, durch den die Verbrennungsluft von unten in den Ofenraum eintritt.

Das Gehäuse des Wirbelschichtofens besteht aus einem Stahlblechmantel und der Wandaufbau aus einer feuerfesten und wärmeisolierenden Ausmauerung. Die feuer- und abriebfesten Steine sowie die Stampfmasse an der Ofendecke werden über Halterungen, die an den Stahlblechmantel angeschweißt sind, gehalten.

Der Düsenboden (Anströmboden oder Rost) ist ein aus mehreren Kastenelementen zusammengesetzter hitzebeständiger Stahlblechboden. Er ist mit speziell geformten Düsen aus hitzebeständigem Sicromal bestückt.

Der Stahldüsenboden hat sich bei der diskontinuierlichen Fahrweise der Öfen I, II und III bewährt.

Oberhalb des Düsenbodens befindet sich eine Sandschicht, Körnung 0,5 - 3 mm, die durch die Luft fluidisiert wird.

Die Temperaturen in der Brennkammer können zwischen 800° C und 900° C eingestellt werden. In diese Brennkammer wird vom Ofenkopf der entwässerte Klärschlamm eingetragen. Der Klärschlamm wird in der Wirbelschicht getrocknet, gemahlen und nach erfolgter Zündung verbrannt. Inerte Bestandteile (Asche) werden mit dem Rauchgasvolumenstrom ausgetragen.

Die Verbrennungsgase treten mit ca. 850° C vom Ofen in den Kessel ein und erzeugen ca. 7 - 8 t. Dampf/h von 52 bar und 400° C. Der Dampf wird auf die erste Turbinenstufe zur Stromgewinnung geschickt und dabei auf 6 bar entspannt.

Der 6 bar-Dampf wird dann den beiden Schlamm-trocknungsanlagen, den Heiz- und Kühlanlagen und die restlichen Dampf-mengen der zweiten Turbinenstufe ebenfalls zur Stromgewinnung zugeführt.

Daten Wirbelschichtverbrennung Ofen II

Klärschlamm

Klärschlamm-durchsatz	1,0 - 2,5 to TS/h
Wassergehalt des Schlammes	55 - 65 %
Unterer Heizwert bezogen auf die gesamte Trockensubstanz d. Schlammes	11.000 - 15.000 kJ/kg

Feuerung

Düsenbodenquerschnitt	10 qm
Betthöhe	ca. 1,0 m
Wärmeproduktion	11 MW

Verbrennungsluft

Volumenstrom	9.000 - 12.000 cbm/hi.N
Temperatur nach Rauchgas - Luvo	300° C
Luftüberschuss	1,3 - 1,6

Zusatzbrennstoff Heizöl EL (bei Bedarf)

Rauchgas

Volumenstrom 16.000-19.000 cbm/hi.N

Temperaturen nach

Wirbelschichtofen	ca. 850° C
Verdampfer	ca. 410° C
Luftvorwärmer	ca. 320° C
Speisewasservorwärmung	ca. 200° C

Dampferzeuger

Typ	Dampfkessel mit Naturumlauf
Druck	52 bar
Temperatur	400° C
Dampfmenge	7.000 - 8.000 kg/h
Dampfverbrauch im Trockner	3.000 - 5.000 kg/h

Stromgewinnungsanlage

Hochdruckturbine

Niederdruckturbine

Dampfmenge	7,9 to. Dampf/h	7,9 to Dampf/h
2-stufige Dampfturbine	40 - 6 bar	6 - 1,5 bar
Leistung Generator	460 kW	280 kW
Frischdampf Temperatur am Turbineneintritt	rd. 400 °C	rd. 257 °C

4.8 Rauchgasreinigung

Im Jahre 1995 wurden die Rauchgasreinigungsanlagen der Öfen II und III um eine Entstickungsanlage, zweistufigen Nasswäsche und einer Filtrationsabscheideanlage erweitert.

Entstickungsanlage

Die NO_x-Minderung zur Einhaltung der Grenzwerte nach der 17. BImSchV erfolgt durch die zweistufige Verbrennung des Klärschlammes. Durch die gezielte Zuführung von Primär- und Sekundärluft und die Einhaltung von einer Temperaturdifferenz von ca. 150° C zwischen der Wirbelschicht- und Brennkammertemperatur kann der Grenzwert für NO_x nach der 17. BImSchV eingehalten werden.

Bei Störungen oder Änderung der Schlammzusammensetzung können mit der zweistufigen Verbrennung die NO_x-Werte nach der 17. BImSchV nicht mehr eingehalten werden.

Zur ständigen Einhaltung der NO_x-Grenzwerte werden Harnstoffe (Carbamin S452) dem Rauchgas zugeführt. Das Carbamin S452 wird in wässriger Lösung vor dem Reaktionsraum im Rauchgas verteilt. Das Wasser verdampft. NO und NO₂ wird durch die Harnstoffzuführung in Stickstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid umgesetzt.

Die eingedüστε Wassermenge erhöht den CO-Wert. Zur CO-Minderung wird dem Klärschlamm ein wasserlösliches Additiv (Carbamin P352) und dem Heizöl ein öllöslicher Katalysator (Satamin

P150) zudosiert. Die Zugabe der Ausbranntverbesserer erfolgt ab einem CO-Wert von 30 mg/cbm automatisch, damit der CO-Grenzwert von 50 mg/cbm nicht überschritten wird.

Staubabscheidung

Die Staubabscheidung aus den Rauchgasen erfolgt in einem Zweifeldtrocken-Elektrofilter. Der niedergeschlagene Staub wird periodisch abgeklopft und über Staubschleusen ausgetragen. Die Staubgehalte im Rauchgas werden auf 20 - 100 mg/Nm³ reduziert.

Wärmetauscher

Nach dem Elektrofilter werden die Rauchgase in einem Gas-Gas- Wärmetauscher von 200° C auf 130° C abgekühlt. Das heiße Rauchgas strömt in Abwärtsrichtung durch die vertikal angeordneten Graphitrohre, während das aus dem Wäscher kommende Reingas im Kreuzstrom hierzu um die Rohre geführt wird. Das Reingas aus der Waschstufe 2 wird von ca. 70° C auf 110° C erwärmt und danach dem Gewebefilter zugeführt.

2-stufige Nasswäsche

Zur Reduzierung der Schadstoffemissionen (Staub, HCl, HF, SO₂ u. Schwermetalle) wurden die Ofenlinien mit einer 2-stufigen Rauchgaswaschanlage nachgerüstet.

Die 1. Wäscherstufe besteht aus einem Strahlwäscher. Dort werden zunächst die Rauchgase von ca. 130° C auf ca. 70° C mit Wasser abgekühlt. Durch Zugabe von Säure kann der pH-Wert im Wäscher I bis ≤ 1 eingestellt werden. Ein Teil des Staubes, HCL, HF und Schwermetalle werden dabei in der 1. Waschstufe abgeschieden.

Die 2. Wäscherstufe besteht aus einem Füllkörperwäscher, über die Zugabe von Natronlauge wird der pH-Wert zwischen 7 und 8 eingestellt. Ein weiterer Teil des Staubes, HCL, HF und Schwermetalle sowie SO₂ werden in der 2. Waschstufe abgeschieden.

In beiden Waschstufen wird das auslaufende Waschwasser im Kreislauf zur Eindüsung zurückgeführt, wobei die entstehenden Verdampfungsverluste und Absalzungen in jedem Kreislauf durch entsprechende Frischwasserzugaben ersetzt werden.

Das Abwasser aus dem Wäscher 1 und 2 wird im Neutralisationsbehälter neutralisiert und zur Schlammbehandlungsanlage der Kläranlage gefördert.

Alle gasberührten Flächen innerhalb des Wäschers sind gummiert. Der temperatur- und säurebelastete Übergangsbereich am Wäschereintritt besteht aus hochwertigem Sonderstahl.

Filtrationsabscheidung

Die Filtrationsabscheideanlage wird überwiegend zur Reduzierung von Reststaub und Quecksilber metallisch erforderlich. Mit der Filtrationsabscheideanlage werden gleichzeitig weitere feste, flüssige und gasförmige Reststoffe aus dem Rauchgas entfernt.

Der Gewebefilter ist ein Schlauchfilter, der als Saugfilter betrieben wird. Dem Rohgas wird ein Gemisch aus Kalk und Aktivkohle zudosiert.

Im Filter durchströmt das Rohgas die Filterschläuche von außen nach innen.

An den Filterschläuchen erfolgt die Trennung des Rohgases in Staub und Reingas. Der Staub mit dem Adsorbens bleibt auf den Filterschläuchen und bildet eine zusätzliche Filterschicht. Der Filter besteht aus 5 vollkommen getrennten Filterkammern. Die Filter werden während dem Betrieb druckabhängig abgereinigt.

Die Abreinigung der Filterschläuche erfolgt durch Druckluftinjektoren, die Spülluft in die Filterschläuche leiten. Dabei wird der außen anhaftende Staub entfernt.

Die Reststoffe aus dem Gewebefilter werden einer Wiederverwertung zugeführt.

5 Emissionswerte

Mit den Rauchgasreinigungsanlagen können die Emissionswerte der 17. BImSchV gesichert eingehalten werden.

Der Grenzwert für Dioxine und Furane mit 0.1 ng/Ncbm an Toxizitätsäquivalenten (TE) wird beim Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ mit den vorhandenen Anlagen weit unterschritten. Die Werte im Reingas liegen unter bzw. im Bereich der Nachweisgrenze. Die Wirbelschichtverbrennung ist praktisch vollkommen. Die Asche enthält in der Regel weniger als 1 % Restbrennbares. Durch den optimalen Ausbrand werden Dioxine und Furane in Ulm bis zu 90 Prozent reduziert. Die Gesamtminderung an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polychlorierten Biphenylen (PCB) ist größer als 80 Prozent. Die organischen Schadstoffe werden der Kläranlage mit dem Abwasser zugeführt.

Die Emissionsdaten werden laufend kontrolliert und können im Internet unter www.bayern.de/lfu/abfall/einwirk/kva/stein/sthol1.htm beim Landesamt für Umwelt in Bayern eingesehen werden.

Dass die Umwelt durch die Abluft der Klärschlammverwertung nicht beeinträchtigt wird, beweisen Messungen des Bayerischen Instituts für Abfallforschung:

Zwei Jahre lang untersuchte das Bayerische Institut für Abfallforschung Luft und Pflanzen in der Umgebung der Anlage auf Rückstände und Schadstoffe. Ein nachteiliger Einfluss der Klärschlammverwertung auf die Immissionssituation wurde aber weder in den Ergebnissen des Biomonitorings noch in der windrichtungsabhängigen Luftprobennahme festgestellt.

6 Wärmenutzung

Das Wärmenutzungsgebot nach der 17. BImSchV wird erfüllt.

Die Nutzung der Abwärme wird im Klärwerk Steinhäule schon seit 1979 betrieben.

Die gesamte Dampfmenge wird z. Zt. in eine Gegendruckturbine zur Stromerzeugung gefördert. Die zwei einstufigen Getriebe-Dampfturbinen ausgeführt als Tandemsatz bestehen aus einer Hochdruck-Turbine (40 - 6 bar) u. aus einer Niederdruckturbine (6 - 1,5 bar). Die Hoch- u. Niederdruckturbinen sind an einem Generator angeschlossen. Diese Variante eignet sich sehr gut für eine problemlose Anpassung an die Dampferzeugung u. Dampfabnahme. Schwankende Dampfmengemengen für die Schlamm Trocknung, Heizung, Kühlung und sonstige im Prozess benötigte Dampfverbraucher lassen sich somit schnell ausgleichen.

Durch die Nutzung von Wärme u. elektrischer Leistung wird ein Wirkungsgrad von über 70 % erreicht.

7 Reststoffverwertung

Die Asche aus dem Wirbelbett und der Kesselanlage sowie die Elektrofilterstäube werden in einem Aschebunker zwischengelagert und von dort an Silofahrzeuge zur Wiederverwertung abgegeben.

Seit November 1990 wird die Asche und Filterstaub aus der Wirbelschichtverbrennung als Bergbaumörtel im Untertagebau verwertet. Die Inhaltsstoffe der Asche und der Filterstäube liegen unter den Grenzwerten der Klärschlammverordnung.

Auch die Reststoffe aus dem Gewebefilter werden ebenfalls mit Silofahrzeugen einer Wiederverwertung im Bergbau zugeführt.

8 Erfahrungen beim Bau und Betrieb

Die Erstellung der Genehmigungs- und Ausschreibungsunterlagen für die Entwässerungs-, Trocknungs- und Verbrennungsanlagen erfolgten durch den Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ und durch Ingenieurbüros. Ein Ingenieurbüro sowie der Zweckverband ist für die Einhaltung des Terminplanes sowie für die Minimierung der Ausfallzeiten während Anschlussarbeiten an die bestehenden Anlagen zuständig. Die einzelnen Anlagenteile wurden EG-weit ausgeschrieben. Die Vergabe der Einrichtungen erfolgte durch den Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“. Die Ingenieurbüros müssen jeweils für ihren gesamten geplanten Anlagenteil eine Funktionsgarantie übernehmen.

Bei der Klärschlammverbrennung hat sich die Entwässerung des Schlammes mit Zentrifugen und die Vortrocknung des Schlammes mit der Dünnschichttrocknung bewährt. Die Schlammförderung mit Trogkettenförderer beim Einsatz von Einstrangkettensystemen war ein sicherer und wirtschaftlicher Betrieb. Die Förderung des getrockneten Schlammes (35 - 45 % TS) funktioniert nur im Trogkettenförderer mit einer Zweistrangkette. Die Zweistrangkette ist aber sehr wartungsintensiv. Zurzeit erfolgt die Förderung des getrockneten Schlammes mit Schneckenförderer sowie mit Dickstoffpumpen.

Die Brüdenkondensation mit Dünnschlamm funktioniert mit dem eingebauten Wärmetauscher in Ulm ohne Probleme. Damit das Geruchsproblem minimiert wird, muss das gesamte Schlammfördersystem im Unterdruck gefahren werden.

Die Brennkammer der Ofenanlage I hatte einen ovalen Querschnitt. Bei den Öfen II und III wurde unter Ausnutzung aller Platzreserven im vorhandenen Verbrennungsgebäude die Brennkammer mit rechteckigen Querschnitten erstellt. Die Reparaturarbeiten am rechteckigen Querschnitt sind deutlich höher als beim ovalen Querschnitt.

Die Erwärmung der Verbrennungsluft auf 600° C (Ofen II) führte zu einem erhöhten Wartungsaufwand am Gas-Gas Wärmetauscher und Düsenboden gegenüber einer Erwärmung der Verbrennungsluft auf 300° C (Ofen III).

Die Rauchgasreinigungsanlagen (Elektrofilter und Nasswäscher) sind bei der richtigen Auslegung und Materialwahl ohne Probleme zu betreiben.

Für einen optimalen Betrieb einer Wirbelschichtanlage sollten Input- u. Outputmess-Werte ständig erfasst und beim Erreichen von Grenzwerten automatische Gegenmaßnahmen erfolgen (z. B. durch Proportional-Integral-Regler oder eine Fuzzy Logic-Regelung, bzw. eine Prozessregelung über Neuronale Netze).

Sehr wichtig für einen ordnungsgemäßen Betrieb einer Wirbelschichtanlage ist ein qualifiziertes Personal, das von sachkundigen Vorgesetzten informiert, geschult und überwacht wird.

9 Betriebszeiten und Kosten

Die Entwässerung, Trocknung und Verbrennung des Schlammes wird dreischichtig betrieben.

Die Betriebskosten mit Abschreibung und Verzinsung der Abwasserreinigung Entwässerung, Trocknung und Verbrennung des Schlammes mit Verwertung der Rückstände liegen im Jahre 2006 bei 0,68 €/m³ Trinkwasser.

10 Zusammenfassung

Die Ausbringung des Klärschlammes in der Landwirtschaft im Einzugsgebiet des Zweckverbandes „Klärwerk Steinhäule“ ist nicht möglich bzw. wegen dem vorsorgeorientierten Boden- und Gewässerschutz nicht mehr zu vertreten.

Die betriebstechnisch bewährte Entwässerung, Trocknung und Verbrennung in der Wirbelschicht mit Wärmenutzung und Verwertung der Reststoffe bietet für den Zweckverband „Klärwerk Steinhäule“ eine ganzjährig gesicherte, umweltfreundliche, wirtschaftliche und ordnungsgemäße Schlamm Entsorgung.

Literatur

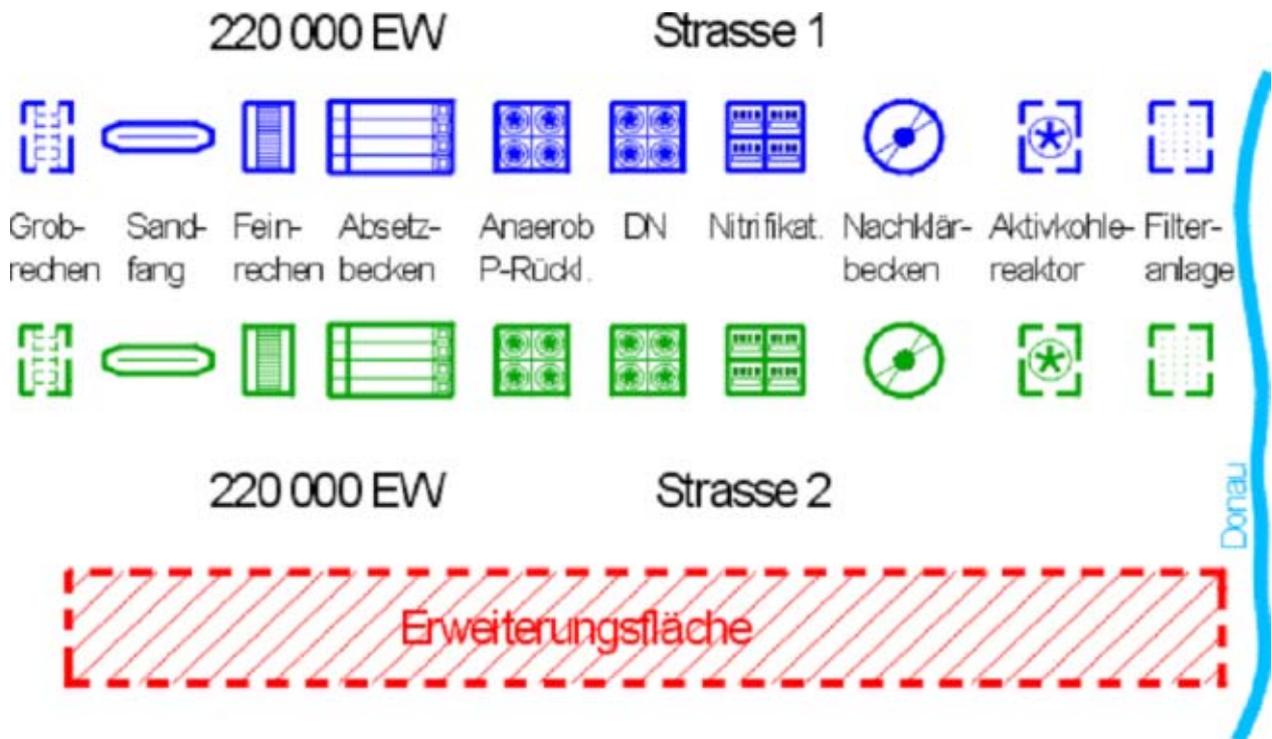
- [1] Bundesbodenschutzgesetz vom 17.03.1998
- [2] Hahn, J. Grundsätze u. Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in Böden am Beispiel der Klärschlammverwertung.
- [3] Verordnung des Baden-Württembergischen Umweltministeriums über Schutzbestimmungen im Wasser- und Quellschutzgebieten und die Gewährung von Ausgleichsleistungen (Schutzgebiets- u. Ausgleichsverordnung SchALVO vom 08.08.1991
- [4] Schnurer, H. Die Sicht des BMU zur Klärschlammverwertung ATV-DVWK Seminar am 30. u. 31.01.2002 in Kassel
- [5] Hahn, J. Anforderungen an die schadlose Entsorgung von Abfällen aus der Sicht des Umweltbundesamtes

Angeschlossene Städte und Gemeinden am Klärwerk „Steinhäule“

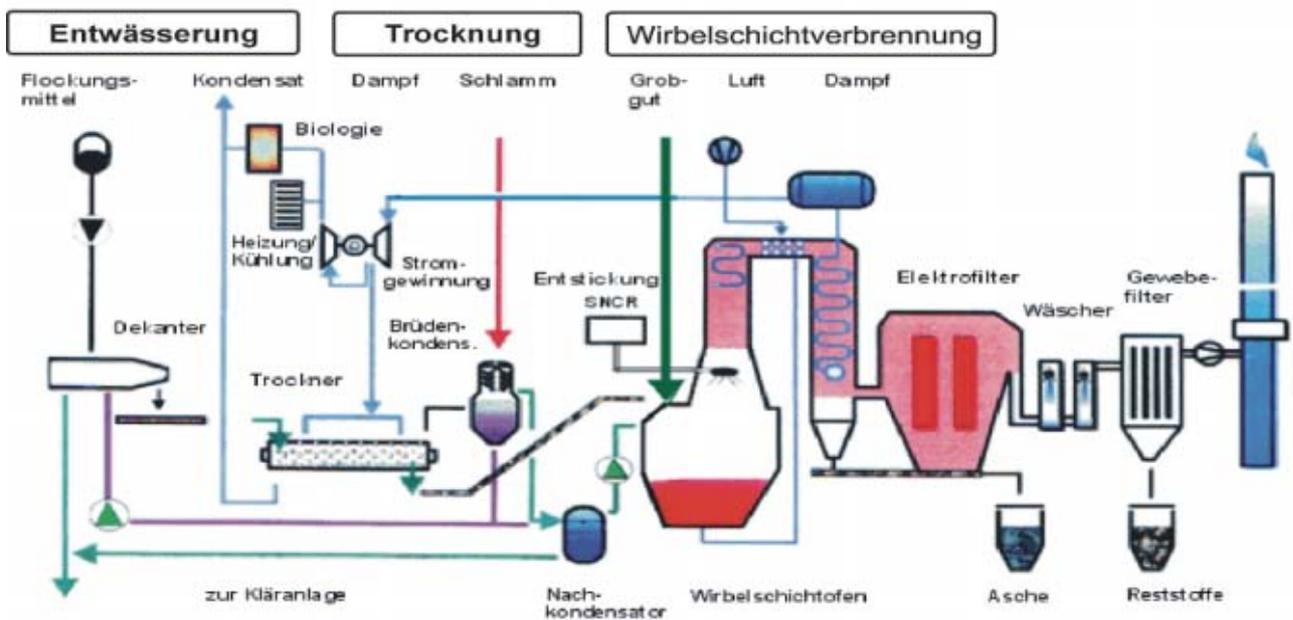


 nach 1984 angeschlossen

Zweckverband Klärwerk „Steinhäule“ – Abwasserreinigung



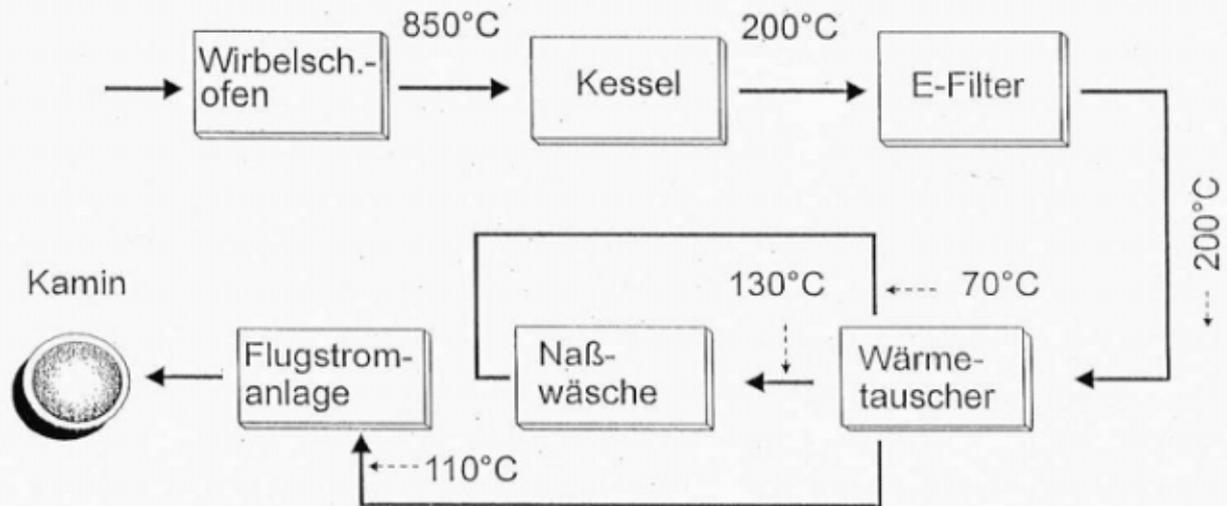
Zweckverband Klärwerk „Steinhäule“ – Schlammbehandlung



Zweckverband Klärwerk Steinhäule

Rauchgasreinigung

Ofenlinie II und III



Klärschlammvergasung – Kläranlage Balingen

Dipl.-Ing. Christian Burgbacher, Fa. Kopf AG Umwelt- und Energietechnik, Sulz-Bergfelden

Entstehungsgeschichte

Der Zweckverband Abwasserreinigung Balingen betreibt eine Kläranlage mit einer Kapazität von 124.000 EWG. Ausgelastet ist diese Anlage derzeit lediglich mit ca. 80.000 EWG, da in den letzten Jahren verschiedene große Einleiter (Papierfabrik, Molkerei, Brauerei, Textilindustrie) weggefallen sind.

Der Abwasserzweckverband ist für seine innovativen Konzepte (erste solare Schlamm Trocknung, Nutzung der Fallhöhe im Kläranlagenauslauf durch eine Wasserkraftanlage, sowie drei Biogas-Blockheizkraftwerke zur Energieeinsparung) weithin bekannt. Durch die oben angeführten Konzepte, ist der Zweckverband in der Lage, ca. 80 % seines elektrischen Energiebedarfs selbst zu decken. Ehrgeiziges Ziel jedoch war es den gesamten Bedarf an elektrischer Energie aus eigener Erzeugung zu decken. So wurde das Ingenieurbüro Götzelmann + Partner (Stuttgart) beauftragt, nach einer noch nutzbaren Energiequelle zu suchen. Nach eingehenden Untersuchungen kam man damals zum Ergebnis, dass einer der noch nutzbaren Energieträger, der solargetrocknete Klärschlamm ist. Um Strom zu erzeugen und somit den Energieinhalt sinnvoll zu nutzen kam nur die Hochtemperaturvergasung des Klärschlammes in Frage. Mit der Vergasung ist es möglich ein brennbares Gas zu erzeugen, das in einem BHKW verwertet werden kann.

Die Entwicklung und der Bau einer solchen Anlage wurden anschließend vom Zweckverband ausgeschrieben, nachdem das IVD (Institut für Verfahrenstechnik- und Dampfkesselwesen) in einem Versuch die prinzipielle Machbarkeit eines Vergasungskonzeptes nachgewiesen hat.

Aufgrund der Erfahrungen die, die Firma Kopf mit einem Prototyp zur Holzvergasung gemacht hat, beteiligte sich die Firma Kopf an der oben genannten Ausschreibung und erhielt im Anschluss daran den Auftrag.

Nach viel mühseliger Kleinarbeit und mit Ausdauer gelang es der Firma Kopf AG Sulz, erstmalig eine Klärschlammvergasungsanlage in den Dauerbetrieb zu überführen und eine Dauerbetriebsgenehmigung zu erhalten

Was macht getrockneten Klärschlamm tauglich für eine Vergasung?

Getrockneter Klärschlamm hat je nach Ausfäulungsgrad einen Heizwert der im Bereich schlechter (weicher) Braunkohle liegt. Ein Vergleich des Heizwertes von Klärschlamm mit verschiedenen fossilen Energieträgern verdeutlicht dies:

Brennwerte verschiedener Energieträger

- Braunkohle weich: 8,4 MJ/kg
- Braunkohle hart: 17 MJ/kg
- Holz, frisch 8,4 MJ/kg
- Benzin 32 MJ/kg
- **Klärschlamm gut ausgefault *** **6,7 MJ/kg**
- Klärschlamm nicht ausgefault* 2 MJ/kg
- Klärschlamm: in getrocknetem Zustand

Grundlagen der Vergasung

Definition:

Unter Vergasung versteht man die Thermochemische Umwandlung von Kohlenstoffhaltigen, festen Brennstoffen, in einen gasförmigen Energieträger, unter Zugabe eines Oxidationsmittels (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf).

Prinzip der Vergasung

Während die Verbrennung von Biomasse weitgehend als Stand der Technik bezeichnet werden kann und Anlagen von einigen wenigen Kilowatt bis zu etlichen Megawatt Feuerungsleistung erhältlich sind, konnte die Vergasung noch keine nennenswerte Verbreitung erreichen. Um im Bereich kleinerer und mittlerer Leistungen mit akzeptablem Wirkungsgrad, Strom zu erzeugen, kommt praktisch nur die Vergasung in Betracht. So lassen sich dabei schon bei kleineren Anlagen, Stromwirkungsgrade von ca. 25 % erreichen. Technische Vergasungsprozesse laufen bei Temperaturen von über 500° C ab. Es gibt Verfahren bei denen Temperaturen von bis zu 1200° C erreicht werden.

Größtes technisches Hindernis bei der Nutzung des dabei erzeugten Synthesegases ist, dass die hohen Anforderungen von Gasmotor und Gasturbine bezüglich der Gasqualität bislang nur mit einer aufwändigen Gasreinigung zu gewährleisten waren. Wird als Vergasungsmittel Luft eingesetzt, wird durch die partielle Verbrennung (Oxidation) die zur Deckung der endothermen Teilschritte notwendige Energie geliefert. Dabei laufen bei Vergasungsreaktionen folgende Teilschritte ab:

Trocknung	=	Verdampfung von Restfeuchte
Pyrolyse	=	Freisetzung der flüchtigen Bestandteile
Vergasung	=	Teiloxidation des Kokes
Gasfasenreaktionen	=	Reaktionen, der in den oben genannten Schritten gebildeten Komponenten

Teere als Grundproblem der Vergasung

Probleme bereiten vor allem, die bei der Vergasung entstehenden Teere. Werden diese nicht entfernt, kommt es zu starken Ablagerungen an Gaskühlern, sowie bei den Motoren an den Einlassventilen, dem Turbolader, bzw. an den Einlassschaufeln bei Gasturbinen. Die Gasreinigung erforderte dabei einen hohen apparativen Aufwand, um die erforderliche Gasqualität sicher zustellen. Möglich ist z.B.: eine Nasswäsche, wobei gleichzeitig auch Partikel abgeschieden werden. Dabei

entstehen jedoch größere Mengen an kontaminiertem Waschwasser, das gereinigt und entsorgt werden muss. Die Erfahrungen mit dem Holzvergaser haben gezeigt, dass es in einem Festbettvergaser problemlos möglich ist, Temperaturen von 1.200° C und mehr zu fahren. Dabei werden die hohen Temperaturen in der Regel in der Oxidationszone, also einem eng begrenzten Reaktionsfeld, erreicht. Eine Klärschlammvergasung ist bei diesen Temperaturen nicht möglich, da diese Temperaturen zu einem Aufschmelzen des Ascheanteils führen und der Reaktor somit verschlackt. Damit jedoch eine vernünftige Vergasung im gesamten Reaktor bei einer möglichst homogenen Temperaturverteilung und optimalen Durchmischung stattfinden kann, kam nur eine stationäre Wirbelschicht in Frage.

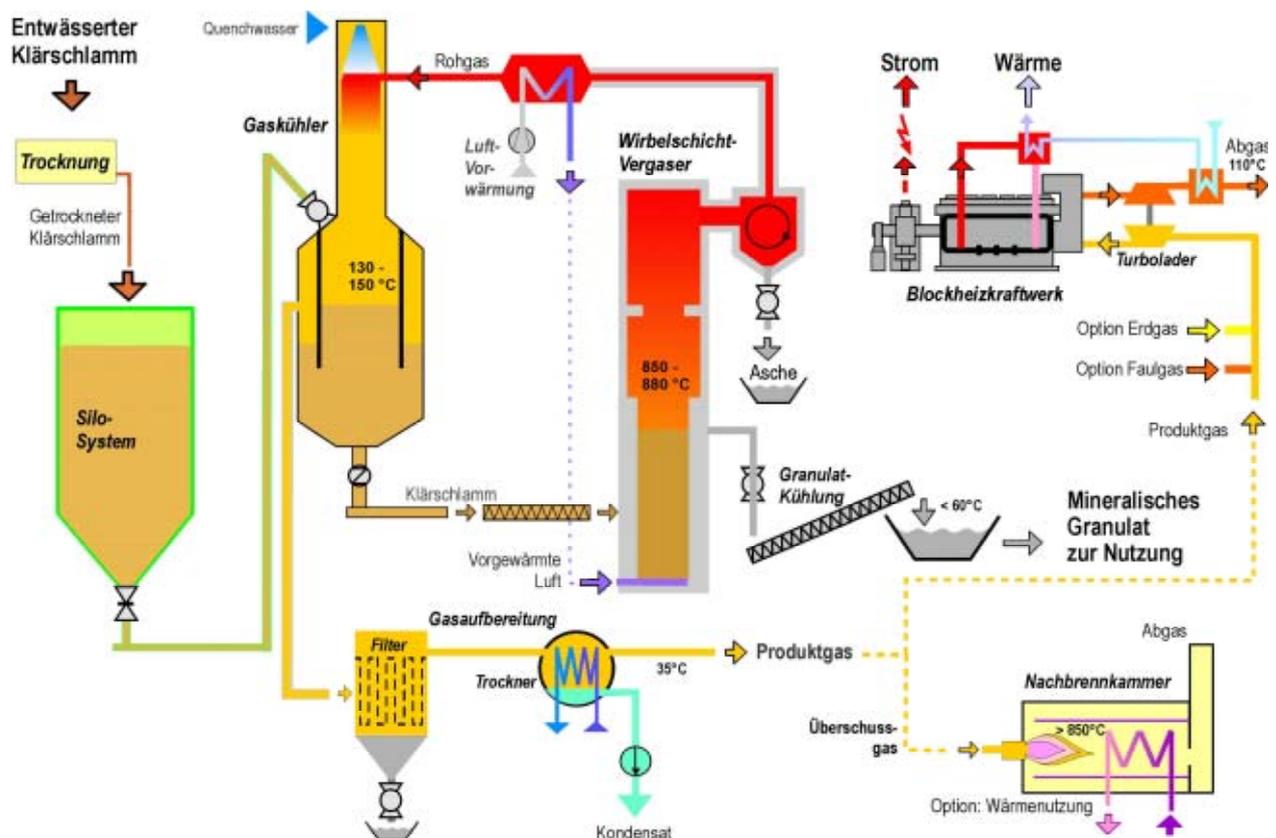
Dabei ist eine Vergasung mit einer stationären Wirbelschicht durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- gute Durchmischung im Reaktor
- gute Reaktionskinetik
- guter Gas- u. Feststoffkontakt
- guter Wärme- u. Stoffübergang

Der verhältnismäßig hohe Ascheanteil dient gleichzeitig als Bettmaterial. Das gewählte Temperaturfenster für die Vergasung sollte demnach unter dem Erweichungspunkt der Asche liegen.

Darüber hinaus war es ein maßgebendes Entwicklungsziel, durch ein möglichst einfaches Verfahren ein sauberes motorentaugliches Synthesegas zu erzeugen mit möglichst wenig belastenden Reststoffen.

Verfahrens- und Anlagenbeschreibung



Verfahrensbeschreibung

Das Grundprinzip des Verfahrens ist die Vergasung in der Wirbelschicht. Die Wirbelschicht gewährleistet eine optimale Durchmischung der Reaktionspartner im gesamten Reaktionsraum und damit eine schnelle, gleichmäßige und vollständige Umsetzung. Zur Aufrechterhaltung der Reaktion wird lediglich vorgewärmte Luft benötigt. Es wird nur etwa ein Drittel der Luftmenge zugeführt, die für eine vollständige Verbrennung erforderlich wäre. Durch die unterstöchiometrische Verbrennung wird eine Temperatur von etwa 850° C erreicht, bei der die typischen Vergasungsreaktionen ablaufen. Damit werden die großmolekularen organischen Anteile des Einsatzstoffes praktisch vollständig in einfache gasförmige Verbindungen umgewandelt. Die anorganischen Bestandteile verbleiben als ein inertes Granulat.

Feststoffpfad

Für die Vergasung wird getrockneter Klärschlamm mit einem Restfeuchtgehalt zwischen 5 und 30 % benötigt. Am besten geeignet, ist mechanisch stabiles Granulat mit geringem Staubgehalt, einem TS-Gehalt zwischen 80 und 90 % und einer Körnung zwischen 2 und 10 mm. Aus dem Vorlagesilo wird der getrocknete Klärschlamm über Förderschnecken und ein gasdichtes Schleusensystem in den Gaskühler gefördert. Von dort gelangt er über ein beheiztes Schleusensystem, eine Dosiereinrichtung und eine Stopfschnecke in den Vergasungsreaktor. Dort werden auf Grund der langen Verweilzeit von etwa 30 Minuten die organischen Anteile vollständig umgesetzt. Da die Temperatur unterhalb des Ascheschmelzpunktes liegt, entsteht ein rieselfähiges Produkt und es kommt nicht zur Verschlackung. Zuschlagstoffe sind nicht erforderlich. Das Granulat gelangt vom Überlauf der Wirbelschicht über ein Schleusensystem in eine Kühlschnecke. Aus dieser fällt es mit einer Temperatur von unter 60° C in einen geschlossenen Container und steht damit als inertes und nicht mehr auslaugbares (eluierbares) Mineralgranulat zur Verwertung bereit.

Gaserzeugung

Die Vergasungsluft wird über einen Düsenboden von unten in den Reaktor eingebracht. Mit Hilfe des Luftsauerstoffs laufen Verbrennungs- und Vergasungsreaktionen parallel zueinander ab. Die Reaktionstemperatur wird über die Luftmenge geregelt. Im nachgeschalteten Zyklon wird der aus der Wirbelschicht mitgerissene Staub abgeschieden und über ein Schleusensystem ausgetragen. Im Rekuperator sinkt die Temperatur des Rohgases auf etwa 600° C, gleichzeitig wird die Vergasungsluft auf etwa 400° C erwärmt. Das Auskondensieren von Ölen und Teeren, die im Rohgas noch in geringen Mengen vorhanden sind, wird durch diese Wahl der Temperaturen vermieden. Durch die Luftvorwärmung benötigt die Vergasung – abgesehen vom Aufheizen des Reaktors zum Anfahren – keine Zusatzenergie.

Rohgasquenche

Der Gaskühler kombiniert die Funktion einer Quenche und eines Filters. Oben wird mit hohem Druck durch feine Düsen Wasser eingesprüht. Es entstehen sehr kleine Tröpfchen, die auf dem Weg nach unten vollständig verdampfen. Das Gas wird so schlagartig auf Temperaturen von unter 150° C abgekühlt. Der für die Neubildung von Dioxinen und Furanen relevante Temperaturbereich wird also sehr schnell durchlaufen, so dass die so genannte de-novo-Synthese vermieden wird. Der Effekt lässt sich eindeutig an den extrem niedrigen Messwerten für diese Schadstoffe nachweisen (siehe Tabelle „Dioxine und Furane im Abgas“). In Folge der Abkühlung kommt es zur Kondensation der im Rohgas noch in geringen Mengen enthaltenen Öle und Teere, während die

Kondensation von Wasserdampf vermieden wird. Im unteren Teil des Gaskühlers werden die kondensierten Bestandteile an der Schüttung aus Klärschlammgranulat abgeschieden. Sie gelangen mit dem Granulat in den Vergaser, wo sie in einfache gasförmige Verbindungen gespalten werden.

Gasaufbereitung

Das Produktgas wird in einem Spezialfilter mit einer Porengröße von 1 µm entstaubt, der Reststaubgehalt beträgt maximal 2 mg/m³. In der Gastrocknung wird das Gas unter die Umgebungstemperatur abgekühlt. Die im Gas enthaltene Feuchtigkeit (das eingedüστε Quenchwasser und etwas Wasserdampf als Nebenprodukt der Vergasungsreaktionen) wird dadurch größtenteils kondensiert. Die größeren der gebildeten Tröpfchen schlagen sich bereits im Kühler nieder, die kleineren werden in einem Fliehkraftabscheider erfasst. Das gesammelte Kondensat in einer Menge von 300 l je Tonne Klärschlamm wird der Kläranlage zugeleitet. Zur Senkung der relativen Feuchte (Vermeidung von Kondensation) wird die Temperatur des Produktgases anschließend unter Verwendung von Abwärme leicht angehoben. Durch die Gastrocknung verbessern sich die Zündigenschaften und der Brennwert des Gases, und damit seine Eignung als Brennstoff.

Energetische Nutzung

Das erzeugte Gas ist durch die vorangegangene Aufbereitung weitgehend schadstofffrei und enthält die brennbaren Komponenten Wasserstoff (6 - 10 % Vol), Kohlenmonoxid (6 - 10 % Vol.) und Methan (3 - 5 % Vol.). Die genaue Zusammensetzung hängt dabei vom eingesetzten Schlamm ab. Das Gas kann sowohl für die Verstromung in einem Gasmotor als auch Brennstoff in einem Dampf- oder Thermoöl-Kessel eingesetzt werden.

Nachbrennkammer

In verschiedenen Betriebssituationen, zu zum Beispiel beim An- und Abfahren der Anlage, kann Überschussgas entstehen, das im BHKW nicht verwertet werden kann. Dieses Gas wird der thermischen Nachverbrennung zugeleitet und dort bei über 850° C schadlos entsorgt. Beim Anfahren wird Erdgas oder Faulgas verwendet um die Nachverbrennung zu starten. Im normalen Betrieb genügt Produktgas zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur.

Es wird ersichtlich, dass die einzige Emission neben dem Abgas des Motors, das anfallende Kondensat aus der Gastrocknung darstellt. Da neben dem anfallenden Wasser auch Kohlenwasserstoffe auskondensieren, die im Temperaturbereich zwischen 30° C und 130° C noch flüchtig sind, ist das Kondensat leicht mit auskondensierten Kohlenwasserstoffen belastet. Das Kondensat wird durch einen Ölabscheider und einem Aktivkohlefilter aufbereitet. Die belastete Aktivkohle wird von Zeit zu Zeit ausgetauscht. Das Kondensat weist nach der Aufbereitung folgende Belastung auf:

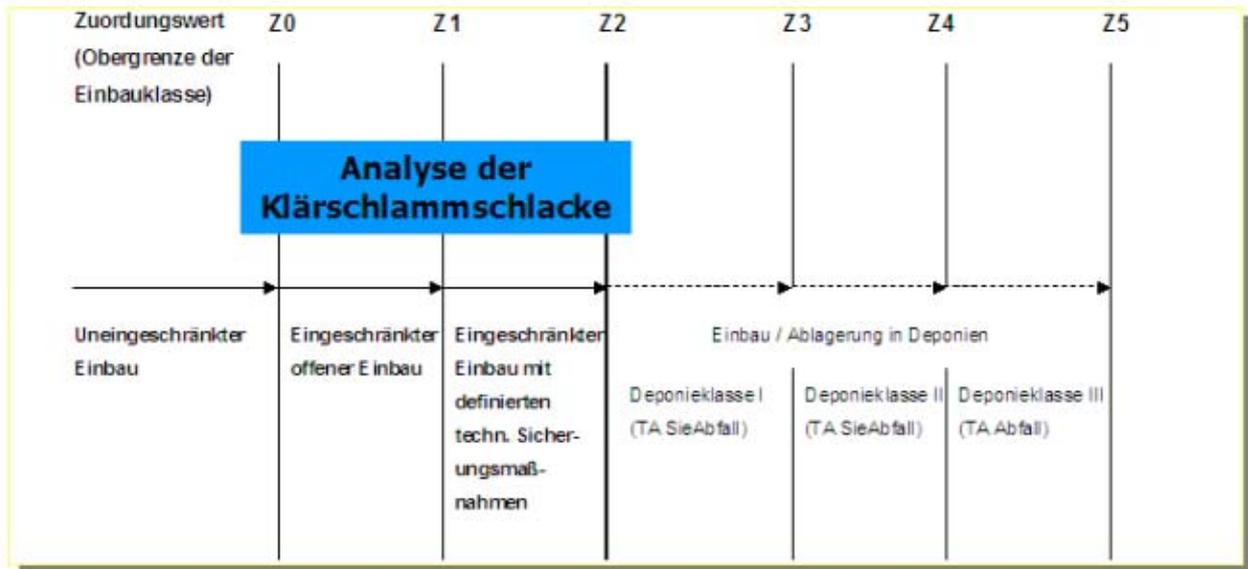
Kondensatanalyse

Untersuchungen im Labor			
<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Prüfergebnis</i>	<i>Prüfverfahren</i>
pH-Wert		9,8	DIN 38404-5 (C 5)
Elektrische Leitfähigkeit (bei 25°C)	µS/cm	3640	DIN EN 27888 (C 8)
Ads. Org. geb. Halogene (AOX)	mg/l	0,040	DIN EN 1485 (H 14)
Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)	mg/l	975	DIN EN 1484 (H 3)
Bakterienleuchthemmung in GL in der Originalprobe		32	ISO 11348-1
Arsen	mg/l	< 0, 1	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Blei	mg/l	< 0,5	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Cadmium	mg/l	< 0,05	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Chrom, gesamt	mg/l	< 0,5	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Kupfer	mg/l	< 0,6	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Nickel	mg/l	< 0,5	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Quecksilber	mg/l	< 0,001	DIN EN 1483 (E 12)
Zink	mg/l	< 0,5	DIN EN ISO 11885 (E 22)
Aromatische Kohlenwasserstoffe (AKW)			DIN 38407-9 (F 9)
Benzol	mg/l	< 0,005	
Toluol	mg/l	< 0,005	
m.p-Xylol	mg/l	< 0,005	
Ethylbenzol	mg/l	< 0,005	
Summe AKW	mg/l	nicht nachweisbar	berechnet

Neben dem Kondensat bleibt der im Klärschlamm vorhandene mineralische Anteil nach der Vergasung übrig. Der verbleibende mineralische Reststoff fällt als festes, körniges Granulat an. Ca. 25 % davon wird als feiner Staub (Abrieb aus der Wirbelschicht) durch den Zyklon ausgeschleust. Das Granulat weist einen Glühverlust von deutlich unter 1 % auf und erfüllt die Kriterien der Deponieklasse Z 1.1.

Das anfallende Granulat wird in Balingen einem Asphaltmischwerk zugeführt.

Einbauklassen



Darstellung der einzelnen Einbauklassen mit den dazugehörigen Zuordnungswerten [LAGA, 1997]

Genehmigungsrechtliche Situation

Als Vergasungsanlage zur Beseitigung von Abfällen unterliegt die Klärschlammvergasungsanlage genehmigungsrechtlich der 17. BImSchV. Der einzige Emittent stellt jedoch das Blockheizkraftwerk dar. Aus technischen Gründen (z. B.: Gasschlupf) ist ein Gasmotor jedoch nicht in der Lage die strengen Auflagen der 17. BImSchV zu erfüllen. Ein Gasmotor hat genehmigungsrechtlich ab einer Feuerungsleistung von einem MW die TA-Luft zu erfüllen. Aus diesem Sachverhalt heraus wurde, um die genehmigungsrechtliche Situation des Gesamtkonzeptes zu entwirren, eine Zweiteilung des gesamten Anlagekonzeptes vorgenommen.

Anlagenteil 1 Vergasungsanlage

Diese Anlage produziert ein werthaltiges Synthesegas aus dem Abfallprodukt Klärschlamm und stellt somit eine Anlage zur Verwertung von Abfällen da. Sie ist nach der 17. BImSchV zu genehmigen.

Anlagenteil 2 Blockheizkraftwerk

Das Blockheizkraftwerk stellt den zweiten Anlagenteil dar. Es handelt sich hierbei um einen für die Nutzung von Synthesegas optimierten Gasmotor. Dieser Gasmotor hat im Betrieb die Auflagen der TA-Luft zu erfüllen. Da der installierte Gasmotor in Balingen eine Feuerungsleistung von maximal 450 KW besitzt, ist diese Maschine streng genommen genehmigungsfrei. Trotzdem war man bemüht durch Optimierungen und Nachrüstungen die Auflagen der TA-Luft zu erfüllen.

Tab.: Grenzwerte Emissionswerte

<i>Luftschadstoff</i>	<i>max. Massenkonz. b. 5 % O₂ (mg/m³)</i>	<i>Emissionswerte</i>
Schwefeloxide (angegeben als SO ₂)	350	135
Stickstoffoxide (angegeben als NO ₂)	500	1081
Kohlenmonoxid (CO)	300	613
Formaldehyd	60	34,4
Benzol	1	0,7

Die Klärschlammvergasungsanlage weist folgende Leistungsdaten auf:

- Durchsatzleistung: 5 t/d getrockneter Klärschlamm mit einem TS-Gehalt von 75 - 85 %
- Elektr. Leistung BHKW: 75 kW mit Synthesegas
- Elektr. Eigenbedarf: 15 kW
- Abgegebene elektr. Überschussleistung: 60 kW
- Kaltgaswirkungsgrad: 70 %
- Heizwert des erzeugten Gases: 2,5 - 5 MJ/Nm³, abhängig vom Heizwert des vergasten Schlammes

Erfahrungen im Betrieb

Die Vergasungsanlage läuft vollautomatisch im 24-Stunden Betrieb. Tagsüber ist die Anlage durch einen Monteur besetzt. Nachts läuft die Anlage im vollautomatischen Betrieb. Falls Störungen auftreten sollten, wird ein Monteur der Bereitschaftsdienst hat, durch eine SMS mit der entsprechenden Störung benachrichtigt. Er kann dann selbst entscheiden, ob es notwendig ist, zur Anlage zu fahren, oder ob die Störung von untergeordneter Bedeutung ist und am nächsten Tag behoben werden kann.

Bislang aufgetretene Störungen

- Fremdkörper wie z. B.: große Schrauben, Holzstücke, Blechteile und Steine, meist aus nicht gereinigten Containern, gelangen mit dem getrockneten Schlamm in die Anlage und führen zum Blockieren der Zellenradschleuse. Die Brennstoffzufuhr wird unterbrochen.
- Containerwechsel = Austausch leerer gegen voller Container wird versäumt, dies führt zum Blockieren der Austragsschnecke und zur Überfüllung des Reaktors.
- Füllstandsmessung im Gaskühler fällt aus durch Kabelbruch oder ähnliches. Dadurch wird der Gaskühler zu weit abgewirtschaftet. Das teerhaltige Gas wird nicht mehr durch den Klärschlamm filtriert. Dies führt nach wenigen Sekunden zum Verkleben des Keramikfilters mit Teeren aus dem Synthesegas.
- Ein Ausfall von Heizelementen kann zur Kondensation von Feuchtigkeit und somit zu Verbackungen und Materialstockungen führen.

Abschließende Bemerkung:

Aus Sicht des Abwasserzweckverbandes ist die Klärschlammvergasungsanlage ein wirtschaftliches Konzept zur dezentralen thermischen Verwertung von getrocknetem Klärschlamm. Mit der gewonnenen elektrischen Überschussleistung von 60 kW ist das Ziel des Abwasserzweckverbandes Balingen erreicht, einen energieautarken Betrieb der Kläranlage zu gewährleisten. Meist wird noch etwas elektrische Energie in das Netz zurückgespeist.

Hinzu kommen noch ökologische Aspekte, wie CO₂-Reduktion, verringerte LKW-Transporte etc., sowie ökologische Aspekte, wie die Einsparung von Schlammentsorgungskosten.



Klärschlammvergasungsanlage Balingen

Kleinverbrennungsanlagen für Klärschlamm

Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Dr.-Ing. Mario Mocker, Dr.-Ing. Peter Quicker, ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg

1 Einleitung

Aus Gründen des vorsorgenden Boden- und Verbraucherschutzes ist die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung kritisch zu betrachten. Die sinkende Akzeptanz und eine mögliche Absenkung der Grenzwerte für diese Art der Verwertung trägt zu einer veränderten Entsorgungssituation bei. Bayern kann hier als Vorreiter angesehen werden und hat bereits frühzeitig eine neue Strategie für die zukunftsfähige und nachhaltige Klärschlammentsorgung ausgearbeitet, die mittelfristig die thermische Verwertung bzw. thermische Behandlung des bisher landbaulich und landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammes vorsieht [1]. Dementsprechend wurden im Jahr 2004 bereits 38,8 % der in Bayern insgesamt angefallenen Klärschlammmenge von 297.372 Mg, bezogen auf die Trockenmasse, thermischen Anlagen zugeführt [2].

Die Behandlung in großtechnischen Monoverbrennungsanlagen stellt hierbei einen bewährten Entsorgungsweg dar, wobei eine rasche Steigerung der verfügbaren Kapazitäten allerdings nicht zu erwarten ist [3]. Müllverbrennungsanlagen werden nach der Umsetzung des Deponierungsverbots vorrangig mit anderen Abfallfraktionen beschickt. Aufgrund der guten Auslastung, aber auch wegen der vergleichsweise hohen Behandlungskosten, wird die Bedeutung dieser Entsorgungsoption für Klärschlamm begrenzt bleiben [3]. Auch die wenigen thermischen Sonderverfahren, die im großtechnischen Maßstab arbeiten, können nur beschränkte Behandlungsmöglichkeiten für den anfallenden Klärschlamm bereitstellen [3],[4].

Aus Kosten- und Kapazitätsgründen wird derzeit vor allem eine Ausweitung der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken erwartet [5]. Daneben ist ein deutlich steigendes Interesse der Zementwerksbetreiber am Einsatz von Klärschlamm zu verzeichnen [3]. Während in den Kraftwerken auch mechanisch entwässerte Schlämme angenommen werden, erfordert die Verwertung im Zementwerk in der Regel eine Volltrocknung des Klärschlammes.

Neben der Behandlung in Großanlagen empfiehlt sich auch die Etablierung von dezentralen Kleinverbrennungsanlagen zur Klärschlammentsorgung. Die Vorteile solcher Anlagen, gerade für den ländlich geprägten, schwach strukturierten Raum, liegen auf der Hand. So werden lange Transportwege, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch nachteilig sind, vermieden. Die dezentrale Entsorgung erfolgt direkt am Ort des Anfalls, die Energie für die Trocknung wird durch die anschließende Verbrennung erzeugt und fossile Brennstoffe werden zur Trocknung nicht mehr benötigt. Den Kläranlagenbetreibern bieten dezentrale Lösungen in eigener Obhut langfristige Entsorgungs- und Kostensicherheit.

Neben diesen Aspekten steht für den Abfall Klärschlamm und dessen energetischer Nutzung auch die darin enthaltene Ressource Phosphor im Blickpunkt. Die Vorräte an wirtschaftlich erschließbaren Phosphaterzen reichen noch für etwa 60 bis 130 Jahre [6]. Da eine direkte Ausbringung des Klärschlammes als Dünger aufgrund der darin enthaltenen toxischen Schwermetalle, persistenten organischen Verbindungen und endokrinen Stoffe [7]-[9] nicht erwünscht ist, werden derzeit die Forschungsaktivitäten zur Rückgewinnung des Phosphors intensiviert. Die Rückgewinnung aus den Reststoffen thermischer Behandlungsverfahren ist nur bei ausreichend hohen Phosphatkon-

zentrationen sinnvoll. Diese Anforderung wird ausschließlich durch Monoverbrennungsverfahren erfüllt.

Die vorgenannten Gesichtspunkte gaben den Anstoß zur Neuentwicklung einiger Verfahren zur dezentralen Klärschlammbehandlung. Mittlerweile existieren Anlagen mit Behandlungskapazitäten ab etwa 1.000 Mg TR/a, die zumindest teilweise einen wirtschaftlichen Betrieb nachweisen konnten. Manche dieser Anlagen beruhen auf Verbrennungstechniken und verfügen normalerweise nicht über Vorrichtungen zur Stromerzeugung. Daneben befinden sich auch einige dezentrale Vergasungs- und Pyrolysetechnologien zur energetischen Klärschlammverwertung in der Entwicklung oder der Markteinführung. Diese Verfahrensalternativen könnten durch die Verwertung der erzeugten Brenngase in Blockheizkraftwerken Wirkungsgradvorteile bei der Erzeugung elektrischer Energie bieten.

Im folgenden Kapitel werden einige der dezentralen Behandlungsverfahren kurz vorgestellt, die durch erste Referenzen bekannt wurden. Der Hauptteil des Beitrags widmet sich einem am ATZ Entwicklungszentrum erarbeiteten und erprobten Anlagenkonzept auf Basis der so genannten Pebble-Heater-Technologie. Die dezentrale Klärschlammverwertung nach diesem Prinzip dient ebenfalls zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung und erlaubt somit eine energetisch autarke Entsorgung. Das Verfahrensprinzip soll in Kürze mit einer Demonstrationsanlage der Hans Huber AG in die Praxis umgesetzt werden.

2 Dezentrale thermische Behandlungsverfahren

2.1 Klärschlammverbrennungsanlage Sande

Im friesischen Sande ist seit 1997 eine Verbrennungsanlage für 2.250 Mg TR/a Klärschlamm in Betrieb [10]. Der entwässerte Klärschlamm wird mit einem Fließbettrockner auf 85 % TR getrocknet und in einer Zykloïdbrennkammer verbrannt. Die Wärme wird über einen Abhitzeessel genutzt. Die Reinigung der Rauchgase erfolgt über Gewebe- und Herdofenkoksfilter.

2.2 Klärschlammverbrennungsanlagen Obrigheim / Eferding (A)

Ebenfalls ein Zyklonofen für die dezentrale Verbrennung von Rohschlamm wurde 1998 in Obrigheim vom Abwasser-Zweckverband Elz-Neckar in Betrieb genommen. Die Anlage wurde für eine Kapazität von 1.500 Mg TR/a konzipiert. Die Schlammrocknung erfolgt bei diesem Verfahren bei etwa 95° C in einer Wirbelschicht. Hierbei wird ein Granulat als Produkt erzeugt, von dem ein Teilstrom in den Trockner zurückgeführt wird. Die Verbrennung des Granulats erfolgt in einer Zyklonfeuerung mit ca. 600 kg/h Wasserverdampfungsleistung. Die Rauchgasreinigung besteht aus einem Gewebefilter und einer anschließenden Nasswäsche. Seit 2002 ist die Anlage bis auf weiteres stillgelegt. Mittlerweile wird für dieses Anlagenkonzept (Andritz „EcoDry“) ein Mindestdurchsatz von etwa 4.000 Mg TR/a angegeben [11]. In Eferding (Österreich) befindet sich eine entsprechende Anlage in Betrieb.

2.3 Klärschlammverbrennungsanlage Bad Vöslau (A)

In der gleichen Größenordnung liegt der Durchsatz der sog. Kalogeo-Anlage in Bad Vöslau (Österreich). Der Verbrennungsvorgang erfolgt dort in einem Wirbelschichtofen [11]. Der Klärschlamm wird vor der Verbrennung mittels Solartrocknung auf einen Trockensubstanzgehalt von etwa 60 % eingestellt. Die bei der Verbrennung frei werdende Wärme unterstützt im Winter die Solartrock-

nung, im Sommer wird in ein Fernwärmenetz eingespeist. Die Abgase werden in einem Trockensorptionsverfahren, durch Kalkhydrat als Adsorbens, von sauren Schadkomponenten befreit. Anschließend erfolgt durch Eindüsen von Wasser eine schnelle Quenche des Gases von 380 auf 180° C, um die Bildung von Dioxinen und Furanen zu unterbinden. In das gekühlte Gas wird Aktivkohle zugegeben, um die Adsorption von Quecksilber zu ermöglichen. Letzter Schritt der Abgasreinigung ist ein Keramikfilter, der die Partikel aus dem Gas entfernt.

2.4 Klärschlammverbrennungsanlage Brønderslev (DK)

Im Klärwerk der dänischen Stadt Brønderslev wurde eine Verbrennungsanlage errichtet, die über eine Kapazität von 1.200 Mg TR/a verfügt. Das relative einfache Anlagenkonzept mit Rostfeuerung und Wärmeauskopplung zur Schlamm-trocknung über einen Thermalölkreislauf wurde inzwischen auch in Schweden mehrfach realisiert [12]. Die Trocknung des vorentwässerten Schlammes erfolgt indirekt über ein Bandfördersystem. Die notwendige Trocknungsluft wird über den Thermalölkreislauf mit Hilfe der Rauchgaswärme erhitzt und im Kreislauf gefahren. Die aufgenommene Feuchte wird an einem Kondensator niedergeschlagen. Der Schlamm wird auf 90 % TR getrocknet.

2.5 Klärschlammvergasungsanlage Balingen

Eine Vergasungsanlage im Versuchsmaßstab wurde im Oktober 2002 auf dem Gelände der Kläranlage Balingen errichtet. Die Anlage wurde für die Vergasung von 1.100 Mg/a Klärschlamm (85% TR) ausgelegt und erhielt inzwischen eine Dauerbetriebsgenehmigung [13]. In einer Wirbelschicht findet bei 900 - 1.100° C und hohen Verweilzeiten die Vergasung statt. Hierbei sollen die anwesenden Teere möglichst vollständig gespalten werden. Der Vergaser wird über ein Gebläse mit Frischluft (Primär- und Sekundärluft) versorgt, die über einen Rekuperator gegen das Rohgas auf 350° C vorgewärmt wird. Das gebildete Produktgas wird im Gleichstrom durch Eindüsung von Wasser und durch Wärmeabgabe an den vorgetrockneten, frischen Klärschlamm in der Rohgasquenche abgekühlt. Neben der Wärmeabgabe an den Klärschlamm sollen hier auch organische Bestandteile, vor allem Teere, im Klärschlamm gebunden und mit diesem in den Wirbelschichtvergaser zurückbefördert werden. Das Gas wird anschließend über einen Staubfilter geleitet und in einem Kühler/ Kondensator von Wasser befreit. Das kondensierte Wasser wird über einen Ölabscheider und einen Aktivkohlefilter geleitet und dann in die Abwasserbehandlung zurückgeführt. Das Gas wird in einem ebenfalls neu entwickelten Schwachgasmotor verbrannt. Inzwischen befinden sich weitere derartige Vergasungsanlagen, unter anderem an der Kläranlage Schweinfurt, in Planung.

2.6 Niedertemperaturkonvertierungsanlage Füssen

In einer Pilotanlage wurde an der Kläranlage Füssen die thermokatalytische Umwandlung von Klärschlamm zu Konvertierungsöl und Konvertierungskohle untersucht. Dieses Verfahren der Niedertemperaturkonvertierung (NTK) arbeitet bei Temperaturen zwischen 320 und 400° C und soll nun im Landkreis Regensburg im Demonstrationsmaßstab realisiert werden. Dieser Technologie ist ein ausführlicher Beitrag an anderer Stelle gewidmet.

2.7 Klärschlamm-pyrolyseanlagen Düsseldorf / Neustadt a. d. Weinstraße

Bei dem so genannten Pyromex-Verfahren handelt es sich um ein Hochtemperatur-Entgasungsverfahren, das bereits in Düsseldorf und in Neustadt an der Weinstraße umgesetzt wurde. Vor der Entgasung wird der Schlamm unter Verwendung des erzeugten Pyrolysegases bei

280 - 300° C auf 80 % TR vorgetrocknet. Die dabei entstehenden Brüden werden mittels Biofilter und zweier Nasswäscher gereinigt, um Geruchsemissionen zu minimieren. Der Entgasungsprozess findet in einem mit Strom beheizten Induktionsofen bei 1.200 - 1.700° C unter Sauerstoffabschluss statt. Dabei wird die Organik quantitativ in ein CO- und wasserstoffreiches Gas überführt. Es verbleibt ein vorwiegend mineralischer Rückstand. Die Abgasreinigung erfolgt in einem sauren und einem alkalischen Wäscher, deren Waschwässer durch Neutralisation und Fällung der Schwermetalle regeneriert werden.

3 Verfahrensprinzip des ATZ Entwicklungszentrums

3.1 Zielsetzung

Ziel des hier vorgestellten Konzepts ist die Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Verfahrens zur thermischen Verwertung von Klärschlamm unter gleichzeitiger Gewinnung von elektrischer und thermischer Energie. Neben Klärschlamm könnten auch stückige kommunale Abfälle, z. B. Strauchschnitt, Rechengut oder Kompostierungsreste, mitbehandelt werden. Kernstück des Verfahrens ist der Einsatz der patentierten Pebble-Heater-Technologie in Kombination mit einer Mikrogasturbine, was die Gewinnung von elektrischer Energie aus der Wärme heißer Rauchgase ohne Installation eines Wasser-Dampf-Kreislaufs ermöglicht.

Die Wärme der bei der Verbrennung erzeugten heißen Rauchgase wird über radial durchströmte regenerative Wärmetauscher (so genannte Pebble-Heater) an komprimierte Umgebungsluft transferiert, die anschließend über eine modifizierte Mikrogasturbine unter Erzeugung von elektrischer Energie entspannt wird. Die verbleibende Wärme kann über Wärmetauscher dem Trockner zugeführt werden.

Das beim ATZ Entwicklungszentrum erarbeitete und erprobte Verfahrenskonzept wird in Form einer Demonstrationsanlage der Hans Huber AG in die Praxis umgesetzt. Am Ende der Optimierung stehen der Bau und die kommerzielle Verwertung von standardisierten Anlagen in Systembauweise. Die Anlage ist derzeit auf einen jährlichen Schlammanfall bis ca. 2.200 Mg TR ausgelegt.

3.2 Pebble-Heater-System und Mikrogasturbine

Die Pebble-Heater-Technologie arbeitet mit getakteten Schütttschicht-Wärmetauschern, die abwechselnd mit heißem Rauchgas aufgeheizt, bzw. mit komprimierter Umgebungsluft gekühlt werden (vgl. Abb. 1). Das heiße Rauchgas aus der Verbrennung gibt seine Wärme an die Schüttung der radial durchströmten Pebble-Heater ab, wird dabei bereits teilentstaubt und verlässt im Anschluss an eine weitere Reinigungsstufe nach 17. BImSchV [13] die Anlage über den Kamin.

Während der Heizphase des ersten Pebble-Heaters wird ein anderer, bereits aufgeheizter Wärmetauscher mit verdichteter Luft (ca. 4 bar) beaufschlagt. Nach der Verdichterstufe erfolgt eine Zwischenkühlung, z. B. durch Wärmeauskopplung. Alternativ kann die Zwischenkühlung durch Wassereindüsung erfolgen. Beim Durchgang durch den Pebble-Heater erhitzt sich die verdichtete Luft auf über 900° C und wird anschließend auf den Eingangsteil der Turbine aufgebracht. Ohne weitere Brennstoffzugabe entspannt sich die Luft in der Turbine und kühlt dabei auf etwa 600° C ab. Die Turbine treibt sowohl den Verdichter als auch einen Generator zur Stromerzeugung an.

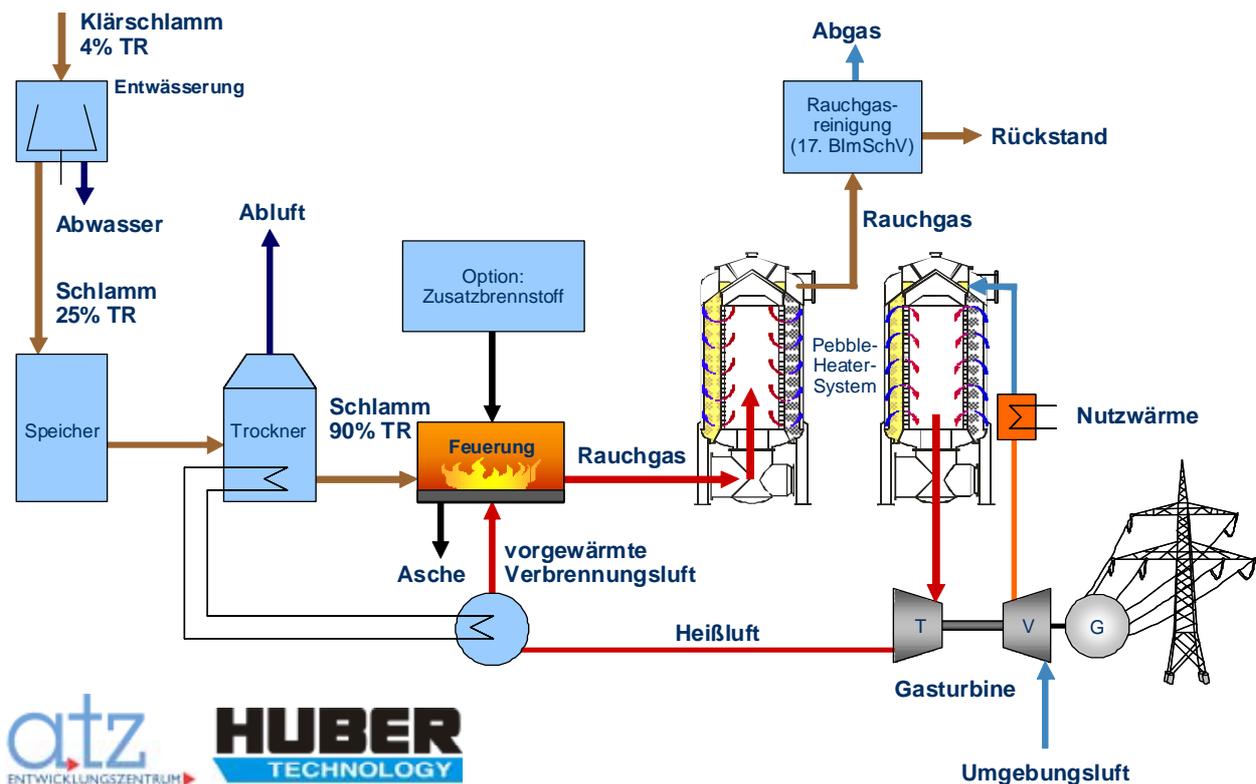


Abb. 1: HUBER Klärschlammverwertungsanlage nach ATZ-Verfahrenskonzept

Prinzipiell handelt es sich bei diesem Gasturbinenprozess um die spezielle Form eines niederdruckseitig rekuperierten Prozesses. Für rekuperierte Prozesse mit Gasturbinen sind moderate Druckverhältnisse zwischen 3 und 6 hinsichtlich des erreichbaren Wirkungsgrads besonders günstig. Das Druckverhältnis solcher Maschinen entspricht den Anforderungen der Demonstrationsanlage. Auch die Turbineneintrittstemperaturen von 900 bis 1.000° C liegen im erforderlichen Bereich. Die Verbrennungstemperatur darf nicht über 1.000° C liegen, um ein Aufweichen leicht schmelzbarer Fraktionen in der Asche und das Verblocken der Feuerung (z. B. das Verkleben der Roste) zu vermeiden. Wesentliche Unterschiede zwischen dem Heißluftbetrieb der Turbine, im Vergleich mit dem direkt gefeuerten Standardfall, liegen in der unterschiedlichen Dynamik von Brennkammer und Pebble-Heater sowie im periodisch getakteten Betrieb. Unterschiedliche thermodynamische Eigenschaften der Heißluft im Vergleich zum wasserhaltigen Gasturbinenabgas führen zu einer veränderten Leistungsabgabe der Turbine, auch wenn in beiden Fällen die Eintrittstemperatur gleich gewählt wird. Für die Demonstrationsanlage wurde eine Turbine mit einer elektrischen Leistung von 100 kW gewählt.

3.3 Klärschlammvorbehandlung

Vor der Verbrennung muss der Klärschlamm entwässert und getrocknet werden. Zur Entwässerung des kommunalen Faulschlammes sind innovative, kompakte Aggregate, beispielsweise Dekanterzentrifugen, am Markt verfügbar.

Der Schlamm wird in der Schlammvorlage zwischengepuffert und mit einem Förderorgan dem kontinuierlich arbeitenden Bandtrockner zugeführt. Die Aufgabevorrichtung verteilt den Klärschlamm über die gesamte aktive Breite des Bandes. Dieses transportiert den Klärschlamm in den mit Luft durchströmten Bereich. Die Prozessluft wird mittels Wärmetauschern zum einen aus der

Zwischenkühlung der Verdichterstufe der Mikrogasturbine und zum anderen aus der entspannten Luft der Turbine erwärmt.

Bei der Durchströmung der mit Klärschlamm belegten Bänder wird die Luft abgekühlt und mit Wasser aus dem Klärschlamm beladen. Die Prozessluft wird mittels eines Gebläses durch den Trockner gesaugt. Durch diesen Unterdruckbetrieb des Trockners kommt es zu keiner wesentlichen Geruchsbelastung. Durch eine Klappenregelung wird die Prozessluft in einen Abluft- und einen Umluftteilstrom aufgeteilt und somit die Feuchte nach der Trocknerstufe geregelt.

Der Abluftstrom wird über einen Wärmetauscher geführt. Der Luft wird Wärme entzogen, die dem Zuluftstrom über den Wärmetauscher wieder zugeführt wird. Durch diese Wärmerückgewinnung wird der thermische Energiebedarf drastisch reduziert. Die bei der Abkühlung anfallenden Kondensate werden abgeleitet. Der Umluftteilstrom wird mit der vorgewärmten Zuluft gemischt und wie zuvor beschrieben als Ganzes auf die Temperatur von bis zu 130° C gebracht.

Die Abluft wird bei Bedarf nachbehandelt und von Feinstaubanteilen, Geruchsstoffen und weiteren Komponenten befreit. Die Abluftqualität entspricht den Anforderungen der TA-Luft.

3.4 Feuerung

Die großtechnisch eingesetzten Feuerungsverfahren zur Klärschlammverbrennung, wie Etagenofen, Wirbelschicht oder Etagenwirbler, sind aus Kostengründen in dem angestrebten Maßstab nicht einsetzbar. Individuell konzipierte Rostfeuerungen, wie sie in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt werden, führen ebenfalls zu einem hohen Investitionsbedarf. Interessante Alternativen bietet der Markt für Biomassefeuerungen. Diese in größeren Stückzahlen hergestellten Feuerungen sind nach geringfügigen Anpassungen auch für die Verbrennung von granuliertem, getrockneten Klärschlamm zu verwenden. Systeme wie Vorofenfeuerung oder Einblasfeuerung können ggf. ergänzt werden, um die notwendigen verbrennungstechnischen Eigenschaften zu erreichen.

3.5 Abgasreinigung

Die Minderung von Stickoxiden erfolgt durch bewährte feuerungstechnische Maßnahmen wie gestufte Verbrennungsführung und Rauchgasrezirkulation sowie durch selektive nichtkatalytische Reduktion (SNCR). Aufgrund der geplanten Verbrennungstemperatur von ca. 950° C sind günstige Voraussetzungen für diese Art der Entstickung gegeben. Außerdem ist durch die Auslegung der Brennkammer sowie die konstruktiv bedingte Länge der Heißgasleitung zwischen Feuerung und Pebble-Heater eine ausreichende Verweilzeit sichergestellt. Selbstverständlich sind auch die übrigen feuerungstechnischen Anforderungen der 17. BImSchV z. B. hinsichtlich der Temperaturüberwachung zu beachten. Zum An- und Abfahren der Anlage wird deshalb eine zusätzliche Stützfeuerung vorgesehen.

Zur Entfernung saurer Schadgase, wie SO₂ und HCl, aus dem Abgasstrom wird ein trocken-sorptives Verfahren eingesetzt. Dazu wird in den Abgasstrom ein chemisch reaktives, disperses Material dosiert, das eine basische Komponente (z. B. Ca(OH)₂) enthält. Die Elimination von unverbrannten Kohlenwasserstoffen, Dioxinen und Furanen sowie flüchtigen Schwermetallen erfolgt durch Adsorption an Aktivkohle. Geeignete Adsorbensmischungen sind im Handel erhältlich. Um die vorgeschriebenen Reingaswerte einzuhalten, ist es notwendig, das Reaktionsmaterial im Überschuss anzubieten. Dadurch wird das Adsorbens nicht vollständig verbraucht. Aus diesem Grund wird ein Teil des Materials rezirkuliert.

4 Verfahrensumsetzung am ATZ Entwicklungszentrum

4.1 Verfahrensauslegung

Für die Berechnung der Prozess- und Feuerungsparameter werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Das Pebble-Heater-System wird durch ein spezielles Rechenprogramm des ATZ dimensioniert. Die Berechnungen liefern die wichtigsten Daten zur konstruktiven Auslegung des Pebble-Heaters (Schüttungsdicke und -höhe, Heißrost- und Kaltrostdurchmesser etc.) sowie den zeitabhängigen Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen in der Schüttung.

Volumen-, Massen- und Energieströme der Anlage werden in einem gesonderten Auslegungsprogramm, abhängig vom jeweiligen Brennstoffinput, ermittelt. Der Bilanzraum der Verbrennung dient als Ausgangsbasis für die weiteren Berechnungen. In der Verbrennungsrechnung werden unter Eingabe bestimmter Randbedingungen - wie Zusammensetzung des Brennstoffs, Luftfeuchte, Verbrennungstemperatur etc. - die Gleichungssysteme des Verbrennungsvorgangs gelöst und die Luftzahl λ errechnet. Neben dem Luftbedarf werden der Asche- und Rauchgasanfall bilanziert. Aus diesen Ergebnissen werden Leitungsquerschnitte und Wärmeverluste des Rohrsystems ermittelt. Weitere Unterprogramme dienen der Turbinenberechnung sowie der Stoff- und Energiebilanzierung.

4.2 Versuchsanlage

Die Verbrennung von Klärschlamm stellt besondere Anforderungen an Feuerungsanlage, Wärmeübertrager und Abgasreinigungssystem. Um eine ausreichende Datenbasis zur sicheren verfahrenstechnischen Auslegung der maßgeblichen Anlagenkomponenten zu erhalten, werden am ATZ Entwicklungszentrum umfassende Versuchsreihen durchgeführt. Das Augenmerk liegt vor allem auf den Feuerungsparametern, der Abgasreinigung und der Staubabreinigung im Pebble-Heater. Insbesondere sollen Erkenntnisse über die Staubbelastung der aus dem Pebble-Heater freigesetzten Heißluft im Hinblick auf eine ausreichende Turbinenlebensdauer gewonnen werden. Zu diesem Zweck besteht seit 2001 eine Technikumsanlage, die inzwischen mehrmals erweitert und angepasst wurde.

In der jetzigen Ausbaustufe besteht die Anlage aus einer Rostfeuerung, einem Pebble-Heater und einer Abgasfilteranlage mit integrierter Trockensorption. Eine geeignete Mikrogasturbine, welche bisher noch nicht in die Versuchsanlage integriert ist, wird derzeit am Lehrstuhl für Thermodynamik der TU München an die Erfordernisse des Verfahrens angepasst.

Die Abscheidung von Flugstaub und gebrauchtem Adsorbens erfolgt an neuartigen Filterelementen aus temperaturbeständigem Filtermaterial, die bis zu 350° C eingesetzt werden können. Im Gegensatz zu konventionellen Schlauchfiltern stellen deshalb auch kurzzeitige Temperaturspitzen, welche in kleinen Anlagen nicht auszuschließen sind, kein Problem dar.

Das Zusammenspiel zwischen staubförmigen bzw. kondensierenden Abgasbestandteilen und der Pebble-Heater-Schüttung wurde im mehrmonatigen Betrieb untersucht. Aus genehmigungsrechtlichen Gründen wurde zunächst behandeltes Industrie-Restholz eingesetzt. Die Gehalte an Zink und Blei in diesem Brennstoff liegen in vergleichbarer Größenordnung wie in kommunalem Klärschlamm. Damit besteht bei Verbrennungstemperatur ein ähnliches Potenzial zur Bildung von leicht flüchtigen Verbindungen, die während des Abkühlvorgangs der Rauchgase als Aerosolfraktion aus dem Abgas auskondensieren können. Solche leicht flüchtigen bzw. niedrig schmelzenden Abgasbestandteile bergen die Gefahr, bei Kondensation in der Pebble-Heater-Schüttung zum Verstopfen des Schüttguts zu führen. Diese Problematik wird durch diskontinuierliche Bewegung

der Schüttung wirksam überwunden. Mit der Installation der Abgasreinigungsanlage wurden die Voraussetzungen zum befristeten Einsatz von Klärschlamm geschaffen. Mittlerweile liegen auch mit diesem Brennstoff über mehrere hundert Stunden reichende Betriebserfahrungen vor.

Trotz zahlreicher Ergänzungen entspricht die Konfiguration der Technikumsanlage nicht exakt der späteren Systemverbrennungsanlage. Beispielsweise fehlt bisher eine Einrichtung zur Entfernung von Stickoxiden und das Aschenausstragssystem ist noch nicht vollständig automatisiert. Bei der Bewertung der im Technikum registrierten Emissionswerte sind diese Einschränkungen zu berücksichtigen.

4.3 Verbrennungsversuche

Im Lauf der bisherigen Anlagenentwicklung wurden die technischen Anforderungen an ein geeignetes Rostfeuerungs-system spezifiziert und experimentell untermauert. Aus den Versuchsreihen bestehen umfangreiche Erfahrungswerte zur Luftverteilung, welche die Inbetriebnahme späterer Anlagen entscheidend erleichtern.

Aufgrund des hohen Aschegehalts von Klärschlamm muss auch unterhalb der Rostzonen ein automatischer Rückstands-austrag vorgesehen werden, um eine ungehinderte Luftführung zu gewährleisten. Die vorhandene Versuchsanlage verfügt noch nicht über eine derartige Einrichtung. Deshalb behindern Ascheansammlungen nach mehrstündigem Betrieb die geregelte Verbrennungsluftzufuhr. Diese Beeinträchtigungen können beispielsweise zu erhöhten CO-Emissionen führen. Bei einem geplanten Umbau des Feuerungstechnikums sowie für die kommerziell angebotenen Anlagen sind automatische Aschenausstragssysteme unter dem Rost vorgesehen.

Tabelle 1 enthält Eluatwerte einer Mischprobe des Verbrennungsrückstands. Der Glühverlust dieser Probe lag bei 7,45 %. Allerdings konnten bei entsprechender Verbrennungseinstellung gut ausgebrannte Rostaschen mit Glühverlusten durchweg unter 5 % TR erreicht werden (Abb. 2). Auch der Rostdurchfall in die Luftkästen unter dem Rost, in denen sich Material über längere Zeit sammelt, bestand fast nur aus ausgebrannten Aschen. Lediglich im letzten Luftkasten vor dem Aschenausstrag lag ein erhöhter Glühverlust vor. Bei angepasster Feuerungseinstellung im Langzeitbetrieb sollten auch Aschen aus dieser Zone einen zufrieden stellenden Ausbrand aufweisen. Eine oberirdische Deponierung der Verbrennungsrückstände erscheint möglich zu sein, zumindest dann, wenn kommunale Klärschlämme mit nicht allzu hoher Schwermetallbelastung eingesetzt werden. Dies ist im Hinblick auf die Phosphor-Rückgewinnung aus den Aschen, für die in einigen Jahren wirtschaftliche Verfahren zur Verfügung stehen könnten, von Bedeutung.

Tab. 1: Eluatwerte des Verbrennungsrückstands

Messkomponente	TOC	Phenol-Index	As	Pb	Cd	Cr-VI	Cu
Eluatwert [mg/l]	1,4	0,19	<0,005	<0,005	<0,001	<0,02	0,01
Messkomponente	Ni	Hg	Zn	F ⁻	NH ₄ ⁺	CN ⁻	AOX
Eluatwert [mg/l]	<0,01	<0,0002	<0,01	0,68	0,27	<0,01	0,02

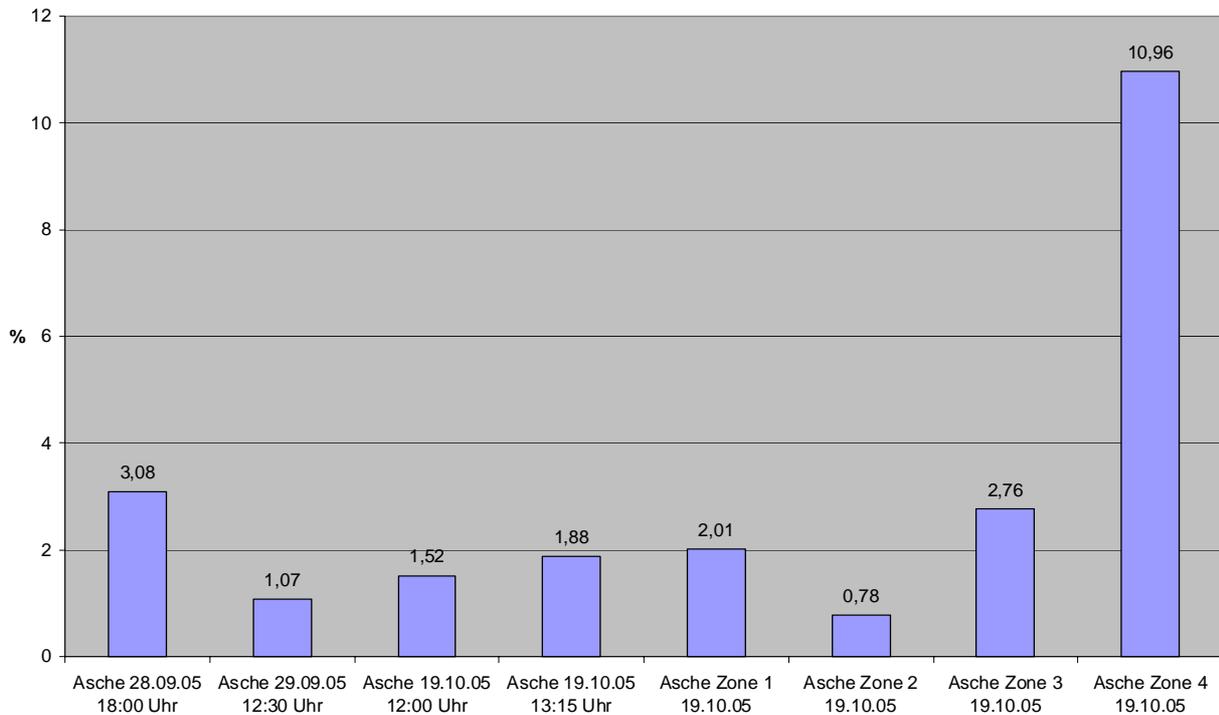


Abb. 2: Glühverlust von Rostaschen und Rostdurchfall (Zone 1 - 4)

4.4 Staubmessungen

Um weitere Erkenntnisse über das Staubabschleideverhalten im Pebble-Heater und die Staubbelastung der Heißluft zu gewinnen, wurden während der Klärschlammverbrennung Staubmessungen an verschiedenen Stellen der Anlage vorgenommen. Tabelle 2 enthält die Mittelwerte dieser Staubmessungen.

Tab. 2: Ergebnisse der Staubmessungen

Messstelle	Mittelwert [mg/m ³ _N]	Anzahl der Messungen
Heißes Rauchgas vor Pebble-Heater	1628,1	3
Abgekühltes Rauchgas nach Pebble-Heater	66,8	3
Heißluft nach Pebble-Heater	5,5	5

Rohgaswerte von ca. 1.600 mg/m³_N entsprechen der Erwartung beim Brennstoff Klärschlamm. Im Pebble-Heater wird der Staubgehalt auf etwa 66 mg/m³_N vermindert. REM-Aufnahmen zeigten, dass grobe Staubfraktionen zurück gehalten werden und im Reststaub überwiegend Teilchen mit einem Durchmesser von 2 µm und kleiner vorliegen. Da sich bei der Klärschlammverbrennung eine leistungsfähige Abgasreinigungsanlage mit zusätzlicher Entstaubung anschließt, ist der Staubgehalt nach Pebble-Heater nicht emissionsrelevant. Mit anderen Pebble-Heater-Schüttungen konnten in früheren Versuchen Reststaubgehalte im Abgas nach Pebble-Heater unterhalb von 20 mg/m³_N erreicht werden. Die Ermittlung des Staubabschleideverhaltens diverser Schüttgüter ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

Der im Pebble-Heater zurück gehaltene Staub wird nur in sehr geringem Maße mit der Heißluft ausgetragen und verbleibt zunächst in der Schüttung. Die mittleren Staubgehalte in der Heißluft liegen bei etwa 5,5 mg/m³_N. Durch die diskontinuierliche Entfernung eines geringen Teils der

Schüttung werden betriebsstörende Staubablagerungen im Pebble-Heater vermieden. Der Staub wird mit der Schüttung entfernt und über pneumatische oder mechanische Systeme abgereinigt.

Die Korngrößen der Staubpartikel in der Heißluft wurden ebenfalls anhand von REM-Aufnahmen bestimmt (vgl. Abb. 3). Die Korngrößen der meisten Partikel liegen deutlich oberhalb von 100 µm, die kleinsten Partikel liegen bei etwa 20 µm. Aufgrund der groben Körnung besteht die Erwartung, dass, sofern überhaupt notwendig, ein effektiver Schutz der Turbine durch vergleichsweise einfache Maßnahmen (z. B. Heißgaszyklon) gewährleistet werden kann. Für die Installation eines aufwändigen Heißgasfiltersystems besteht aus jetziger Sicht keine Notwendigkeit.

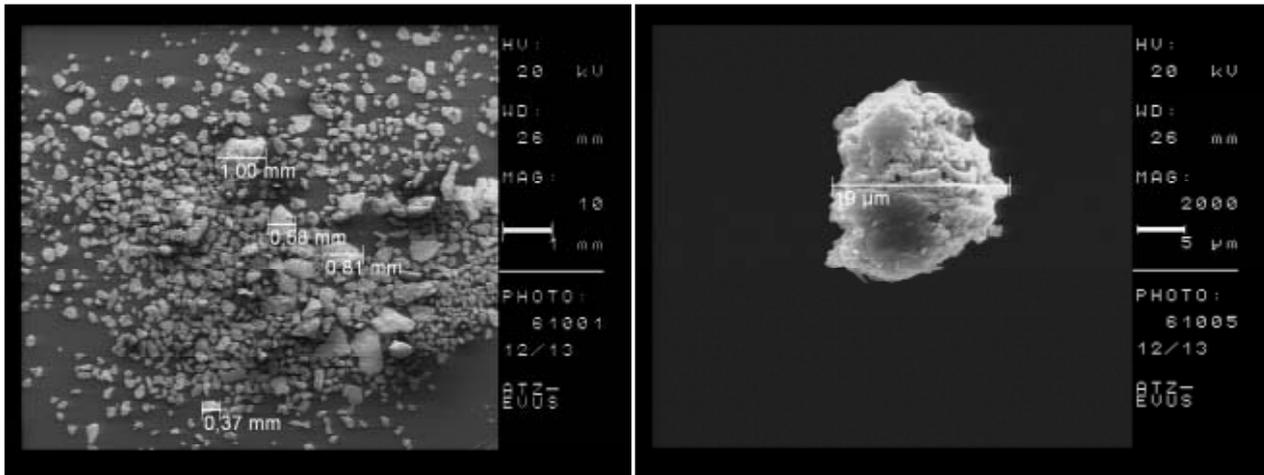


Abb. 3: REM-Aufnahmen des in der Heißluft enthaltenen Staubs – Gesamtansicht (links) bzw. kleinste Partikel (rechts)

4.5 Abgasmessungen

Während der Verbrennungsversuche werden stets umfangreiche Emissionsmessungen vorgesehen. Neben der kontinuierlichen Aufzeichnung von CO, SO₂ und NO_x im Roh- und Reingas wurden bereits diskontinuierliche Messungen von Gesamtstaub, HCl sowie der Einzelkomponenten Hg, As, Cd, Co, Cr, Ni und Pb im Reingas vorgenommen. Als Adsorptionsmittel diente eine handelsübliche Adsorbensmischung.

Die Rohgasmessungen lieferten wertvolle Auslegungskriterien für das Abgasreinigungssystem einer kommerziellen Anlage. Die Reingasmessungen wiesen auf den verbleibenden Entwicklungs- und Erprobungsbedarf hin.

Auf die an der Versuchsanlage fehlende kontinuierliche Entstickung wurde bereits hingewiesen. Die kurzzeitige versuchsweise Eindüsung von NH₃-Lösung (25 %) in den Feuerraum führte sofort zu einer deutlichen Abnahme der NO_x-Emissionen. Zur Einhaltung des Grenzwerts bietet sich somit die SNCR-Technik an. Die bereits geschilderte Problematik der Ascheansammlung in der Versuchsanlage führte in der Vergangenheit auch zu erhöhten CO-Emissionen von im Mittel etwa 90 mg/m³_N, bezogen auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 11 %. Der Grenzwert von 50 mg/m³_N wird voraussichtlich mit einfachen Anpassungen der Feuerungstechnik (automatischer Aschenaustrag) zu erreichen sein. Brennstoffmischungen von Klärschlamm und Holzhackschnitzeln (Gewichtsverhältnis 1:1) weisen einen geringeren Ascheanfall auf und verbrannten auch in der Versuchsanlage unter Einhaltung der strengen CO-Emissionsvorgabe. Dagegen lagen die gemittelten SO₂-Emissionswerte bei der Verbrennung von reinem Klärschlamm mit ca. 350 mg/m³_N noch deutlich über dem maßgeblichen Grenzwert von 50 mg/m³_N. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf

hinsichtlich der Adsorbensauswahl und der Reaktionsparameter bei der Entschwefelung. Angesichts der vielfältigen industriellen Erfahrungen mit der Abreinigung dieses Schadstoffs sollte dieser Befund einer erfolgreichen Verfahrensumsetzung nicht im Wege stehen.

Die Mittelwerte der diskontinuierlich ermittelten Emissionen von Gesamtstaub, HCl und ausgewählten Schwermetallen lagen weit unterhalb der zulässigen Grenzwerte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aus Gründen des vorsorgenden Umwelt- und Gesundheitsschutzes ist eine Abkehr von der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung unausweichlich. Als einzige sinnvolle Entsorgungsalternative rückt nun die thermische Klärschlammbehandlung in den Mittelpunkt. Neben dem zu erwartenden Ausbau der Mitverbrennungskapazitäten in Kohlekraftwerken kommt auch dezentralen Verfahren eine wachsende Bedeutung zu. In jüngster Zeit sind hierzu einige interessante Entwicklungen zu verzeichnen.

Das ATZ Entwicklungszentrum und die Hans Huber AG bringen derzeit ein Verfahren zur dezentralen thermischen Verwertung von Klärschlamm unter gleichzeitiger Gewinnung elektrischer Energie zur Marktreife. Kernstück des Verfahrens ist die Kombination der Pebble-Heater-Technologie mit einer Mikrogasturbine. Für die Erstanlage ist eine elektrische Leistung von 100 kW vorgesehen. Die Behandlungskapazität liegt bei ca. 2.200 Mg TR/a. Die Installation einer derartigen Anlage bietet den Klärwerksbetreibern Unabhängigkeit vom Entsorgungsmarkt und langfristige Kostensicherheit

Im Zuge der Verfahrensentwicklung finden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an einer eigens konzipierten Versuchsanlage statt. Für viele Schadstoffe werden bereits im Versuchsstadium strengste Grenzwerte eingehalten; für weitere Schadgase konnten die erforderlichen Maßnahmen zur Erfüllung der Emissionsbegrenzungen aufgezeigt werden. Zusätzlicher Entwicklungsbedarf besteht lediglich bei der Abscheidung von SO₂. Aufgrund der vielfältigen technischen Erfahrungen mit der Entfernung dieser Abgaskomponente sollte die Problematik einer erfolgreichen Umsetzung des Verfahrens nicht entgegenstehen. Der im Pebble-Heater zurück gehaltene Staub wird nicht in die Turbine ausgetragen, sondern verbleibt zunächst in der Schüttung. Für die Installation eines aufwändigen Heißgasfiltersystems besteht aus jetziger Sicht keine Notwendigkeit.

Literatur

- [1] Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern (AbfPV) vom 18. Dezember 2001
- [2] Abfallwirtschaft & Umwelttechnik GmbH: Bilanzen 2004 – Hausmüll in Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg 2005
- [3] Hanßen, H., Rothsprack, J.: Perspektiven der thermischen Klärschlammverwertung, KA – Abwasser Abfall 2005 (52) Nr. 10, S. 1126-1133
- [4] Quicker, P., Mocker, M., Faulstich, M.: Energie aus Klärschlamm, in: Faulstich, M. (Hrsg.): Verfahren & Werkstoffe für die Energietechnik, Band 1 – Energie aus Biomasse und Abfall, Sulzbach-Rosenberg 2005, S. 53 - 76

- [5] Quicker, P., Faulstich, M.: Perspektiven der Klärschlammverbrennung – Mono- oder Co-Verbrennung, in: Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VIII, biologisch – mechanisch – thermisch, Witzhausen 2004, S. 422-442
- [6] Cornel, P.: Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammaschen, Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie – Geo- und Wassertechnologie 2002 (1) Nr. 3, S. 102 - 114
- [7] Thomé-Kozmiensky, K.-J.: Klärschlamm darf nicht auf den Boden & Verantwortungsbewusster Umgang mit dem Boden, Vorwort und Vortrag zur Tagung „Verantwortungsbewusste Klärschlammverwertung“, Berlin, 20.-21.02.2001, Tagungsband S. 3 - 201
- [8] Hahn, J.: Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung – eine notwendige Harmonisierung im vorsorgenden Umweltschutz, Bodenschutz 2000 (3), S. 72-73
- [9] Gehring, M.: Bedeutung endokriner und organischer Schadstoffe im Klärschlamm, VDI-Seminar „Klärschlamm/Tiermehl/Altholz/Biogene Abfälle“, München, 12.-13.02.2004
- [10] Hermann, T., Goldau, K.: Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt, 2004
- [11] Kügler, I., Öhlinger, A., Walter, B.: Dezentrale Klärschlammverbrennung, Bericht BE-260, Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2004
- [12] mündliche Firmeninformation Krüger A/S: IFAT 2005, München, 2005
- [13] [Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) vom 14. August 2003 (BGBl. I S. 1633)

Niedertemperaturkonvertierung (NTK): Verfahren und Ökoeffizienzanalyse

Das NTK-Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück unter dem Kennzeichen Az. 18153 sowie AiF PRO INNO finanziell gefördert.

Prof. Dr. Ernst A. Stadlbauer, S. Bojanowski, A. Fiedler, A. Frank, M. Hossain, T. Banholzer, B. Weber, Fachhochschule Gießen-Friedberg, Gießen, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik, Labor für Entsorgungstechnik

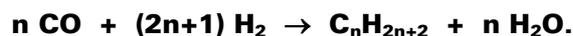
1 Einleitung

1.1 Neue Energie- und Rohstoffquellen

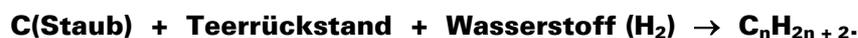
In den letzten Jahren ist ein Strukturwandel in der Energiewirtschaft erkennbar. Elemente dieser nationalen und internationalen Bemühungen betreffen die Steigerung der Energieeffizienz, die Solarenergie, die auf Wasserstoff basierenden Brennstoffzellen und die nachhaltige Nutzung regenerativer Energiequellen [1], [2]. Parallel dazu sind F&E-Aktivitäten zur Gewinnung von Energie, Heiz- und Kraftstoffen sowie Chemierohstoffen aus Biomasse und Abfällen stetig gewachsen [3], [4]. Die Kohleverflüssigung steht vor einer Renaissance. Antriebe sind in der Problematik eines potenziell anthropogen verursachten Klimawandels [5], dem Anstieg des weltweiten Energiebedarfs, dem steigenden Aufwand für Exploration neuer Erdölvorkommen und den dadurch verursachten Ölpreiserhöhungen zu sehen. Letztere erweisen sich als Innovationsmotor.

1.2 Kohlenwasserstoffe aus Biomasse

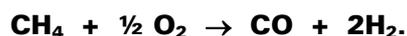
Bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus Biomasse sind grundsätzlich zwei Verfahrensweisen zu unterscheiden. **Zum einen:** Die Zerlegung biogener Kohlenstoffverbindungen in C1-Bausteine und deren gezieltes Zusammenfügen zu höhermolekularen Kohlenwasserstoffketten. Dies entspricht dem um 1925 entwickelten katalytischen Verfahren der Kohleverflüssigung nach Fischer-Tropsch [6]:



Auch die katalytische Hochdruckhydrierung (Pier/Bergius-Verfahren, 1927, DRP 301 231; [6] ist erneut von aktuellem Interesse:



Gas to Liquid (GTL) verwendet Methan (Erdgas) als Ausgangskomponente. Dieses wird durch partielle Verbrennung in Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt [10]:



Versetzt mit weiterem Wasserstoff erhält man an Fischer-Tropsch-Katalysatoren das entsprechende Kohlenwasserstoffspektrum.

Fermentative Verfahren wandeln polymere Biomasse durch Hydrolyse und Gärung in Ethanol ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} + 2 \text{ CO}_2$) oder Biogas ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) um.

Zum andern: Weitgehende Erhaltung der Syntheseleistung der Natur in Form der Kohlenwasserstoffketten [4], [7], [8], [9], [13] zur Gewinnung biogener Heiz- und Treibstoffe. Diesbezüglich er-

folgt beim Biodiesel eine katalytische Umesterung der Fettsäureglycerinester in Fettsäuremethylester: $R_1\text{-COO-R}_2 + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow R_1\text{COO-CH}_3 + R_2\text{-H}$.

Beim Verfahren der Niedertemperaturkonvertierung (NTK) von Biomasse zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen steht die katalytische Entfunktionalisierung, d.h. die milde Abspaltung von Kohlendioxid aus Ester- bzw. Peptidgruppen organischer Verbindungen im Vordergrund.

Tabelle 1 gibt eine Synopse über Kraftstoffe der Zukunft [10]. Die EU rechnet mit einem Biokraftstoffanteil von 5,75 % bis 2010 bzw. 20 % im Jahre 2020 [11].

Tab. 1: Kraftstoffe der Zukunft (nach [4], [10])

Konventionelle Kraftstoffe	Fischer-Tropsch-Kraftstoffe			Konventionelle Biokraftstoffe
Benzin	Gas to Liquid	Coal to Liquid	Biomass to Liquid	Biodiesel (RME: $R_1\text{COO-CH}_3$)
				Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
Diesel	GTL	CTL	BTL	Ethyltertiäbutylester / ETBE , ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-O-C(CH}_3)_3$)
				Biogas ($\text{CH}_4 / \text{CO}_2$)
				<i>NTK</i> ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)
Fossile Mineralöle	Designer Kraftstoffe		2. Generation Biokraftstoffe	1. Generation Biokraftstoffe
Marktführend	In Entwicklung			Markteinführung / <i>Entwicklung</i>

2 NTK-Verfahrensbeschreibung

2.1 Historie

Analog der Kohleverflüssigung handelt es sich bei der NTK um ein altes Verfahren. Die Hitzezerersetzung organischer Stoffe (Holz, Zucker, Knochen, Blut) unter Luftabschluss war als „Trockene Destillation“ bereits im Jahre 1906 chemisches Lehrbuchwissen [12] und diente technisch der Herstellung von Aktivkohle zum Entfärben von Zuckerlösungen in der Lebensmittelindustrie sowie von Phosphor aus Tierkohle. Das ist heute wieder aktuell, wie facettenreiche F&E-Projekte zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Tiermehlasche bzw. Tiermehl/NTK-Kohle zeigen [13].

Wissenschaftliche Aspekte der „Trockenen Destillation“ von Biomasse bzw. der NTK wurden ab 1980 im Arbeitskreis von Prof. Bayer (†2002), Institut für organische Chemie der Universität Tübingen aufgeklärt [14], [15], [16]. Bayer ist der primäre Patentträger [14]. Biomasse wird unter Ausschluss von Luft bei Normaldruck für ca. 2 Stunden auf Temperaturen im Bereich von 280° C - 400° C erhitzt. Dabei entwickeln sich gasförmige Stoffe, die in einem nachgeschalteten Kühler in flüssige Kohlenwasserstoffe (Rohöl), Reaktionswasser und Salze kondensieren. Daneben entweichen geringe Anteile nichtkondensierbarer Gase (H_2 , CO_2 , C1-C3-KW). Als fester Rückstand verbleibt ein graphithaltiges Material, in dem nichtflüchtige Bestandteile fixiert sind. Das Verfahren der NTK wurde inzwischen auf eine Vielzahl organischer Substrate angewandt, u.a.: Klärschlamm [16]-[23], Hausmüll [24], Lackschlämme, Kunststoffabfälle und Altfarben [25], [26], Ölsaaten [27], [28], Raffinerierückstände [29]-[31], Tier- und Fleischknochenmehl [32], [20], sowie Tierfett [33], [34] und Kunststoffe [9]. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung des technischen Werdegangs der NTK. Ergebnisse der bisherigen NTK-Umsetzungen fließen in ein Promotionsvorhaben in Zusammenarbeit mit der Universität Kassel ein [35].

Tab. 2: Technische Entwicklung der NTK von Biomasse

Jahr	NTK-Aktivitäten
1900	Trockene Destillation zur Gewinnung von Dippels Öl und Aktivkohle
Ab 1980	Grundlagenuntersuchungen, Prof. Bayer Universität Tübingen (UT)
1990	Versuche in Kanada und Australien (Lizenz Bayer Patent), [36]-[39] Versuche in Deutschland (Steger / Aicher Patent)
1997	Bau kommerzieller Anlagen: Perth, Australien (ESI); Rositz (Aicher)
2000	BMBF-Pilotanlage in Rehau (UT, Südleider & Lederinstitut)
2001	Laboruntersuchungen zu Tiermehl & Klärschlamm im Rahmen von BSE FH Gießen-Friedberg (FHGiFb) und Arbeitskreis von Prof. Bayer (UT)
2004	DBU-Pilotanlage an Kläranlage des AZV Füssen (FHGiFB, KA Füssen, W+F, Ober-Mörlen; Rünagel, Viereth Trunstadt)
2006	AiF-Projekt: Tierfett und Kunststoffe (FHGiFb)
Herbst 2006	EU-LIFE Projekt Klärschlamm und Altfette (BSM Mintraching, FHGiFb W+F Ober-Mörlen, Venus Tonwerke)

2.2 Einordnung der NTK in Techniken der Klärschlammbehandlung

Die Niedertemperaturkonvertierung kann als anaerobe Verfahrenstechnik formal durch Reaktionsgleichungen analog der Buswell-Beziehung [40] für den anaeroben Stoffabbau im Faulturm dargestellt werden.

2.2.1 NTK als Anaerobreaktor mit technischen Katalysatoren

Kohlenwasserstoffe werden im wesentlichen aus Fetten (Lipiden) gebildet. Durch Elimination der Heterofunktionen als Ammoniak (NH_3), Dihydrogensulfid (H_2S), Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) entstehen aus Eiweißstoffen ebenfalls Kohlenwasserstoffe. Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Cellulose) konvertieren zu Kohlenstoff und Wasser.

Die NTK von Klärschlamm entspricht als technische Katalyse den biokatalytischen Vorgängen im Faulturm (33°C bzw. 55°C) bei der Schlammstabilisierung. Bei dieser anaeroben Fermentation wird polymere Biomasse in einer mikrobiellen Fresskette unter dem Einfluss hydrolytischer, acidogener, acetogener und methanogener Bakterien in Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) abgebaut. Die Energie bleibt weitgehend erhalten und steckt im Methan, dem ersten Glied ($n=1$) der homologen Reihe der Kohlenwasserstoffe vom Typ Alkane ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$). Mechanistisch erfolgt nach der Hydrolyse der Fette der Abbau von Fettsäure durch β -Oxidation [41]. Dabei werden aus der langen Kohlenwasserstoffkette sukzessive C2-Fragmente in Form von Essigsäure biokatalytisch herausgeschnitten. Diese in-situ gebildete Essigsäure wird von Substratspezialisten in Form von Methanbakterien in Biogas umgewandelt und aus dem System entfernt.

Die anaerobe technische Katalyse der NTK erfolgt bei höherer Temperatur ($280 - 350^\circ\text{C}$) und ist weniger selektiv. Mit technischen Katalysatoren gelingt nur die einmalige Abspaltung von Kohlendioxid (CO_2) aus der Fettsäure. Im Ergebnis erfolgt lediglich eine Grobzerlegung der Fettsäuren in Alkane ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) mit $n>1$. Dabei entstehen die höheren Homologen des Methans. Die weitere Feinzerlegung analog der mikrobiellen β -Oxidation in C2- bzw. C1-Einheiten unterbleibt aufgrund der Unzulänglichkeit katalytischer Systeme der Technik im Vergleich zu jenen der Evolution.

2.2.2 NTK als heterogene Gas/Feststoff-Katalyse

Die Aktivierungsenergie für Eliminierungsreaktionen wird durch katalytisch aktive Metalloxide herabgesetzt. Diese können bei Biomassen in situ aus dem Spurenelementmuster gebildet werden, von vorne herein als Begleitsubstanzen vorhanden sein (Schwemmsande bei Klärschlamm) oder gezielt extern zugesetzt werden. Dementsprechend liegt dem Prozess der NTK reaktionstechnisch eine katalytische Gas/Festkörperreaktion zugrunde. Generell wird diese durch intensiven Kontakt zwischen dem umzusetzenden, organischen Molekül und dem anorganischen Katalysator begünstigt. Infolgedessen ist in der Reaktionsführung eine innige Durchmischung von Substrat und katalytisch wirkendem System, hinreichend langer Verweilzeit katalytisch wirksamer Massen und Substrate und damit eine niedrige Raumgeschwindigkeit der Gas/Feststoffreaktion von Vorteil [42]. Dieses Charakteristikum zeigt sich bei konstanter Reaktionstemperatur in der Abhängigkeit der Viskosität des entstandenen Öles von der Raumgeschwindigkeit ganz deutlich (vgl. Abb. 10).

2.2.3 Reaktionsmechanismen der NTK

Mechanistische Detailschritte bei der Konversion von Biomassen (Lipiden, Proteinen, Kohlenhydraten) wurden u.a. von Rupp [43] und Ettl [44] untersucht.

2.2.3.1 Abbaumechanismus: Fette & fette Öle

In der präparativen organischen Chemie ist die Zersetzung von Alkylestern eine Methode zur Darstellung von Olefinen. Bereits 1897 wurden Hepten-1 ($\text{CH}_2=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_3$) und Hexadecansäure ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$) aus Hexadecansäureheptylester hergestellt. Dabei wurde bei 350°C das entstehende Hepten-1 direkt aus dem Reaktionsansatz herausdestilliert [45]. Prinzipiell sind drei Spaltungsmechanismen möglich: ionisch, radikalisch und cyclischer Übergangszustand (Abb. 1).

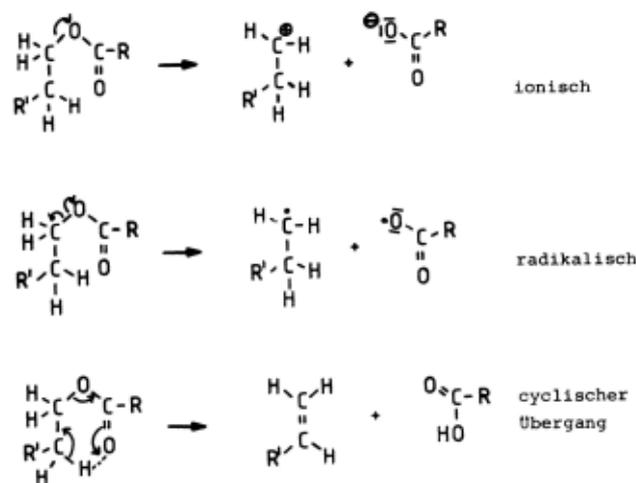


Abb. 1: Möglichkeiten einer thermischen Esterspaltung

Bei der Zersetzung von Alkylestern, die Alkoholreste mit β -Wasserstoffatomen besitzen, ist die Spaltung nach dem Mechanismus eines cyclischen Übergangszustandes aus kinetischen Daten bei negativer Aktivierungsenergie am Wahrscheinlichsten [43]. Das der Estergruppe benachbarte β -Wasserstoffatom wird in einem zur Lösung der Kohlenstoff-Sauerstoffbindung synchronen Prozess an den Carbonylsauerstoff gebunden. Als Reaktionsprodukte entstehen ein Olefin und eine freie Carbonsäure.

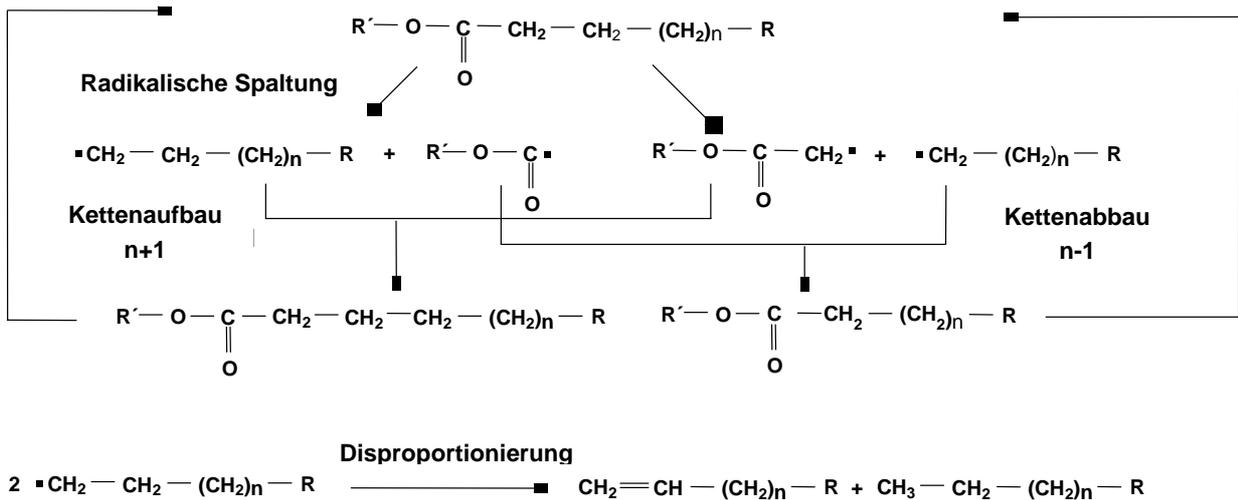


Abb. 4: Schema einer radikalischen Spaltungsreaktion eines Esters und Stabilisierung entstandener Radikale durch Disproportionierung zu Alken und Alkan im Laufe des thermokatalytischen Abbaus von Lipiden

2.2.3.2 Abbaumechanismus: Proteine

Eiweißstoffe sind vielseitige Biomoleküle. Primärstruktur: Peptidartig (-CO-NH-) verknüpfte α -Aminosäuren (R-CHNH₂-COOH). Sekundär- und Tertiärstruktur betreffen die räumliche Faltung über Wasserstoffbrückenbindungen. Damit sind Proteine natürliche Polymere mit Aminosäuren als den monomeren Bausteinen. Proteine haben neben Wasser den größten Anteil am Aufbau von Zellen. Einige Proteine sind Bestandteil aktiver Biokatalysatoren (Enzyme), andere Eiweißstoffe fungieren als Strukturelemente, Signalrezeptoren oder Transportmoleküle.

Für den thermokatalytischen Abbau wird eine Depolymerisation der Primärstruktur zu Vinyleinheiten (Abb. 5) mit anschließender Oligomerisation zu höheren Olefinen diskutiert [46]:

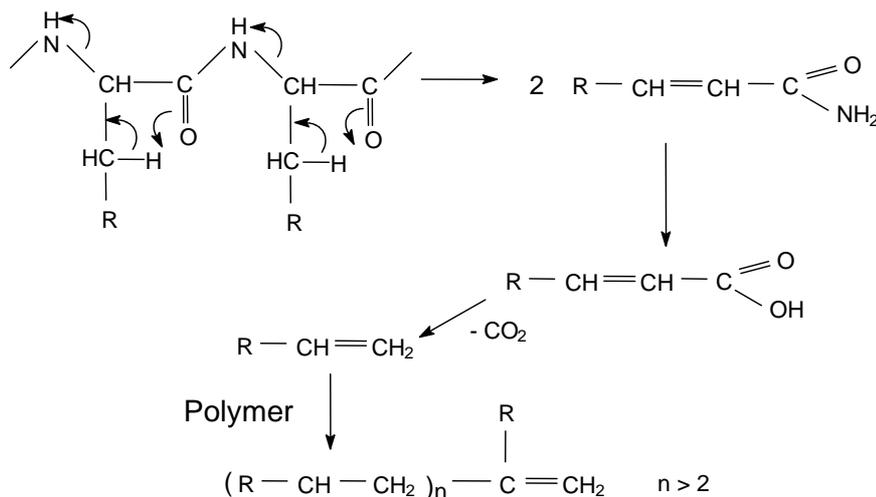
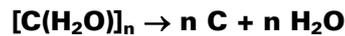


Abb. 5: Schematische Darstellung der Konversion von Proteinen im Laufe der Niedertemperaturkonvertierung

2.2.3.3 **Abbaumechanismus: Kohlenhydrate**

Kohlenhydrate (Zucker, Stärke, Cellulose) zählen zu den häufigsten Biomolekülen auf der Erde. Photosynthese fixiert jährlich ca. 100 Milliarden Tonnen Kohlendioxid und Wasser zu Cellulose and anderen Pflanzenprodukten. Man unterscheidet drei Hauptklassen von Kohlenhydraten: Monosaccharide, Oligosaccharide und Polysaccharide. Chemisch sind sie überwiegend Polyhydroxyaldehyde oder -ketone, die der Summenformel $C(H_2O)_n$ entsprechen oder ihr sehr nahe kommen. Zuckerpolymere entstehen durch H_2O -Abspaltung zwischen zwei Monosacchariden. Cellulose (Poly- β -D-Glucose, 1 \rightarrow 4), Stärke (Poly- α -D-Glucose, 1 \rightarrow 4).

Beim Abbau von Cellulose und Stärke findet eine weitgehende Entfunktionalisierung (Abspaltung von OH-Gruppen als „Reaktionswasser“) unter Bildung kondensierter Ringsysteme statt, die überwiegend (85 %) zum Schichtgitter des Graphits führen [47], [48]:



Zu beachten ist: Im NTK-Temperaturbereich von 280 - 350° C haben die als Katalysatoren wirkenden Aluminiumsilikaten (Festkörpersäuren) die Säureeigenschaften konzentrierter Schwefelsäure [49]. Diese wirkt bekanntlich stark Wasser entziehend. Infolgedessen werden Kohlenhydrate $[C(H_2O)]_n$ bei der NTK lediglich in graphitischen Kohlenstoff (C) und Wasser (H_2O) zerlegt. Dies ist der wesentlichste Unterschied zum Fischer-Tropsch-Verfahren und definiert unterschiedliche Biomasseprioritäten zur Konversion.

2.2.4 **NTK-Zuordnung in Genehmigungsverfahren**

2.2.4.1 **Physikalisch-chemisches oder thermisches Verfahren**

Die NTK ist physikalisch-chemischen Verfahren zuzuordnen. Gründe: Physikalisch ist die Verflüchtigung und Wasserdampfdestillation der organischen Stoffe. Chemisch ist die Stoffumwandlung in Form der katalytischen Entfunktionalisierung organischer Verbindungen. Diese Reaktion läuft im NTK-Temperaturniveau nur in Gegenwart spezifisch wirkender Festkörpersäuren als Katalysatoren ab. *Nicht die Temperatur, sondern der Katalysator ist reaktionsbestimmend.*

Die Frage nach der Ursache für den Eintritt bestimmter chemischer Reaktionen hat auf molekularer Ebene ihre Ausprägung in der unterschiedlichen Temperaturempfindlichkeit der chemischen Bindung organischer Stoffe (Tab. 3). Dabei erniedrigen Katalysatoren die Aktivierungsenergie zum Bindungsbruch und zur Neuverknüpfung.

Tab. 3: Temperaturabhängige Prozesse bei der Behandlung organischer Stoffe (nach [50]). Die zugrunde liegenden Vorgänge sind im Thermogramm in Abbildung 6 gut zu erkennen.

Vorgang	Temperatur °C
Verdampfen von Wasser, Trocknung Dehydratisierung	100 - 200
Decarboxylierung, Desulfierung	250
Dealkylierung, Depolymerisation Spaltung von C-O- und C-N-Bindungen	340 - 400
Crackprozesse, Cyclisierung, Aromatisierung	> 600

Pyrolysen sind durch Crackprozesse, Zyklisierung und Aromatisierung bei $T > 600^\circ C$ gekennzeichnet.

2.2.4.1.1 **Triebkraft chemischer Reaktionen**

Gelegentlich werden chemische Verfahren ohne Beachtung der Reaktionsmechanismen formal den thermischen Verfahren zugeordnet, weil die chemische Reaktion bei einer bestimmten Temperatur (also quasi „thermisch“) abläuft. Zur Beantwortung der Frage, welche chemischen Reaktionen bei bestimmten Temperaturen spontan ablaufen, liefert die Thermodynamik [51] eine mächtige Vorschrift in Form der freien Energie: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. Eine bestimmte chemische Reaktion ist um so mehr begünstigt, desto stärker negativ die freie Gibbsche Energie ΔG ist. Dies kann auf zwei Wegen geschehen: (a) Entweder durch ein negatives ΔH (Reaktionsenthalpie), d. h. eine exotherme Reaktion oder (b) durch ein positives ΔS , d. h. eine starke Zunahme der Entropie [51].

Am absoluten Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$) wird das Reaktionsgeschehen allein von ΔH bestimmt. Das Prinzip vom Energieminimum ist reaktionsprägend. *Der Gesetzgeber sagt nicht, nur diese Reaktionen am absoluten Nullpunkt, d. h. bei $T = 0 \text{ K}$ sind den chemischen Verfahren zuzuordnen.* Mit steigender Temperatur gewinnt der zweite Term ($T \times \Delta S$) mit $\Delta S \neq 0$ zunehmend an Gewicht. Schließlich verlaufen bei hinreichend hohen Temperaturen alle Reaktionen im Sinne einer Entropiezunahme, d. h. Vergrößerung der Unordnung, z. B. der Teilchenzahl etc. Daher wird bei abfalltechnischen Verfahren mit steigender Temperatur der Übergang aller Materie in die Gasform, der Zerfall großer Moleküle in immer kleinere Bruchstücke und schließlich in Elemente bzw. Atome begünstigt. Letztere dissoziieren in mehr oder minder nackte Atomrümpfe und freie Elektronen bei noch höheren Temperaturen, z. B. unter Plasmabedingungen.

Vor diesem thermodynamischen Hintergrund lassen sich viele Besonderheiten chemischer Prozesse inkl. NTK und Pyrolysen gut verstehen und einordnen. Die Induktion der Bindungsspaltung – *durch Katalysator oder Temperatur allein* – ist ein geeignetes Einordnungs- und Differenzierungsinstrumentarium. Beispiel: Bei der Schlammstabilisierung entspricht die biokatalytische Bildung von brennbarem Methangas (CH_4) im Faulturm bei 33° C oder 55° C einem physikalisch-chemischen Verfahren. Die analoge Bildung von brennbaren Methanhomologen ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) mit technischen Katalysatoren bei der NTK von Klärschlamm bei $280 - 400^\circ \text{ C}$ ist ebenfalls physikalisch-chemischen Verfahren zuzuordnen.

2.2.4.2 **IVU-Richtlinie: Abfallverbrennungs- und Abfallbehandlungsanlagen**

In diesem Zusammenhang ist die Differenzierung zwischen Abfallverbrennungsanlagen und Abfallbehandlungsanlagen in der Europäischen Normung zu verstehen. Die auf europäischem Gebiet maßgebliche IVU-Richtlinie [52] unterscheidet in ihrem Anhang Nr. 5 („Kategorien von industriellen Tätigkeiten“) unter anderem zwischen Müllverbrennungsanlagen (5.2) und Anlagen zur Beseitigung oder Verwertung ungefährlicher Abfälle (5.3).

Die zugeordneten Merkblätter (BREFs) unterscheiden sogar lediglich zwischen den Kategorien „Abfallverbrennung“ und „Abfallbehandlung“. In diesem Kontext ist die NTK den Abfallbehandlungsanlagen zuzuordnen, da sie definitiv nicht als Abfallverbrennung gelten kann.

3 **Ergebnisse und Betriebserfahrungen**

Nachfolgend wird in Auszügen über Ergebnisse bei der Durchführung des DBU-Projektes auf der Kläranlage des Abwasserzweckverbandes Füssen (Az. 18153, [13]) und dem AiF-Projekt zur NTK von Tierfett bzw. Kunststoffen [53] berichtet.

3.1 **Charakterisierung von Substraten**

Unterschiedliche Substrate organischen Ursprungs wurden bei diskontinuierlichen Laborbedingungen thermokatalytisch umgesetzt. Zu diesen zählen Klärschlämme, tierische Reststoffe, pflanzliche Einsatzstoffe sowie Kunststoffabfälle. Die wichtigsten Kenndaten sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tab. 4: Charakteristika ausgewählter Substrate wie kommunaler Klärschlämme (KS), Tiermehl, Tierfett, PE- und PP-Kunststoff. Die Angaben der Elementaranalysen und der Heizwerte beziehen sich auf den Trockenrückstand (TR) der Substrate (wf = wasserfrei).

Substrat	TR [%]	oTR [%]	Schüttdichte [kg/m ³]	H _{u,wf} [MJ/kg]	C _{wf} [%]	H _{wf} [%]	N _{wf} [%]	S _{wf} [%]
Anaerober KS	79,6	59,3	730	11,1	28,9	2,7	4,2	1,3
Aerob stabilisierter KS	98,8	59,2	487	12,3	32,2	5,4	5,1	0,7
Tiermehl	94,3	81,0	580	18,5	45,0	5,9	8,8	0,5
Fleischknochenmehl	96,6	38,0	810	13,9	31,6	4,4	7,8	0,3
Tierfett	99,4	100	-	37,0	76,2	12,2	n.n.	n.n.
Rapspresskuchen	93,3	93,5	954	19,8	50,9	9,1	5,1	0,55
Polyethylen	100	99,3	343	42,2	84,7	15,3	n.n.	n.n.
Polypropylen	100	99,1	400	42,4	85,4	15,2	n.n.	n.n.
ABS/PP	100	97,4	559	37,5	84,1	10,3	4,1	n.n.

3.2 Visualisierung der Reaktionsabläufe bei der NTK durch Thermogravimetrie

Thermogravimetrische Untersuchungen der Substrate erfolgten unter anaeroben Bedingungen, welche einer Niedertemperaturkonvertierung im Mikromaßstab entsprechen. Über die primäre Verfolgung der Gewichtsänderung einer Probe und zugeordneten Kurvenableitungen ergibt sich ein anschauliches Bild des NTK-Prozesses. Abbildung 6 zeigt exemplarisch das thermogravimetrische Profil von anaerobem Klärschlamm.

Das Diagramm teilt sich in vier Stufen. Unter Stickstoffbegasung mit einem Durchfluss von 100 ml/min laufen Stufe 1 (35° C bis 210° C), Stufe 2 (210° C bis 380° C) und Stufe 3 (380° C bis 600° C) ab, während im Bereich von Stufe 4 eine Begasung mit Sauerstoff (100 ml/min) erfolgt. Die Massenabnahme der ersten Stufe wird vorwiegend durch thermische Trocknung bewirkt. Deutlich ist aber ein Bereich am Ende der ersten Stufe in Form einer Schulter zu erkennen. Dies deutet auf einen der Wasserverdampfung überlagerten, thermokatalytischen Prozess hin. Die Massenabnahme von 28,6 % in der ersten Stufe bestätigt diese Vermutung, da der Wassergehalt der Originalprobe lediglich 20 % beträgt, die Differenz zu 28,6 % muss also aus einem anderen Vorgang stammen.

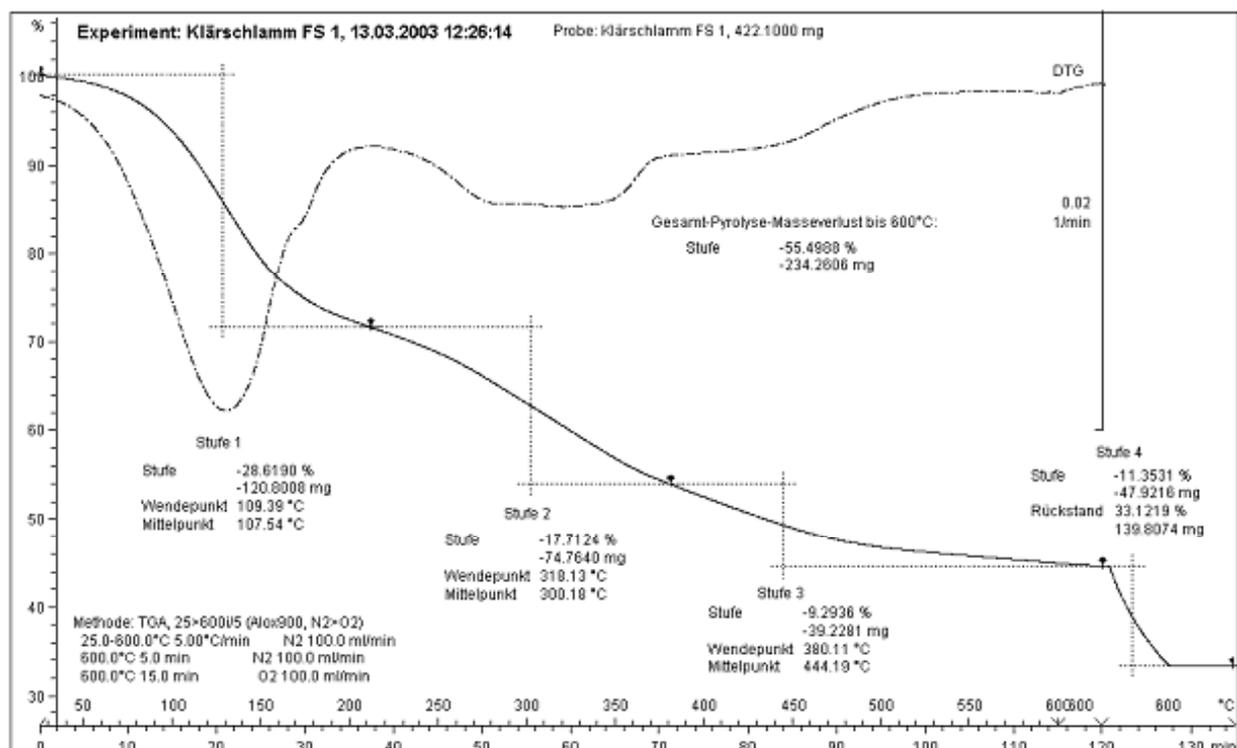


Abb. 6: Thermogramm von solar getrocknetem anaerobem Klärschlamm

Stufe 2 zeigt verschiedene, sich überlagernde Vorgänge. Dies sind Depolymerisationsvorgänge, Abspaltung von Konstitutionswasser, CO_2 und Elimination von H_2S .

In Stufe 3 verringert sich die Geschwindigkeit der Massenabnahme. Aliphatische Bindungen beginnen in diesem Bereich aufzubrechen, Methan und andere aliphatische Kohlenwasserstoffe können entweichen. Eine Bildung von polyzyklischen Verbindungen ist noch nicht zu erwarten, da dies erst bei Temperaturen oberhalb 600°C stattfindet [50], [54].

In der 4. Stufe des Diagramms zeigt sich durch den anwesenden Sauerstoff eine schnell ablaufende Massenabnahme aufgrund von Verbrennungsvorgängen. Im Ergebnis der Kurvenverläufe von TG- und DTG-Kurve folgt, dass Reaktionstemperaturen über 380°C zu keiner nennenswerten Erhöhung der Ölausbeuten führen. Daher wurden nachfolgend alle thermokatalytischen Umsetzungen im Temperaturbereich von 400°C durchgeführt.

3.3 NTK im Labormaßstab

Die Konzeption der DBU-Pilotanlage gründet sich auf Untersuchungen im Labormaßstab im Labor für Entsorgungstechnik der Fachhochschule Gießen-Friedberg, Bereich Gießen. Diese waren ursprünglich in Zusammenarbeit mit dem am 31.01.2002 verstorbenen Prof. E. Bayer, Universität Tübingen, dem geistigen Vater der Niedertemperaturkonvertierung (NTK) begonnen worden.

3.3.1 Laboranordnung

Für thermokatalytische Laborumsetzungen wurde ein elektrisch beheizbarer Rohrofen (10 kW) verwendet. Darin liegt ein Rohr aus Borsilikatglas (Länge 1400 mm; Durchmesser 70 mm). Der Ofen wird auf 400°C aufgeheizt und für 3 Stunden auf dieser Temperatur gehalten. Die Hauptphase der thermokatalytischen Umsetzung ist - abhängig von der Substrateinwaage (300 - 1000 g) - etwa 90 Minuten nach Erreichen der Maximaltemperatur beendet. Eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung zeigt Abbildung 7.

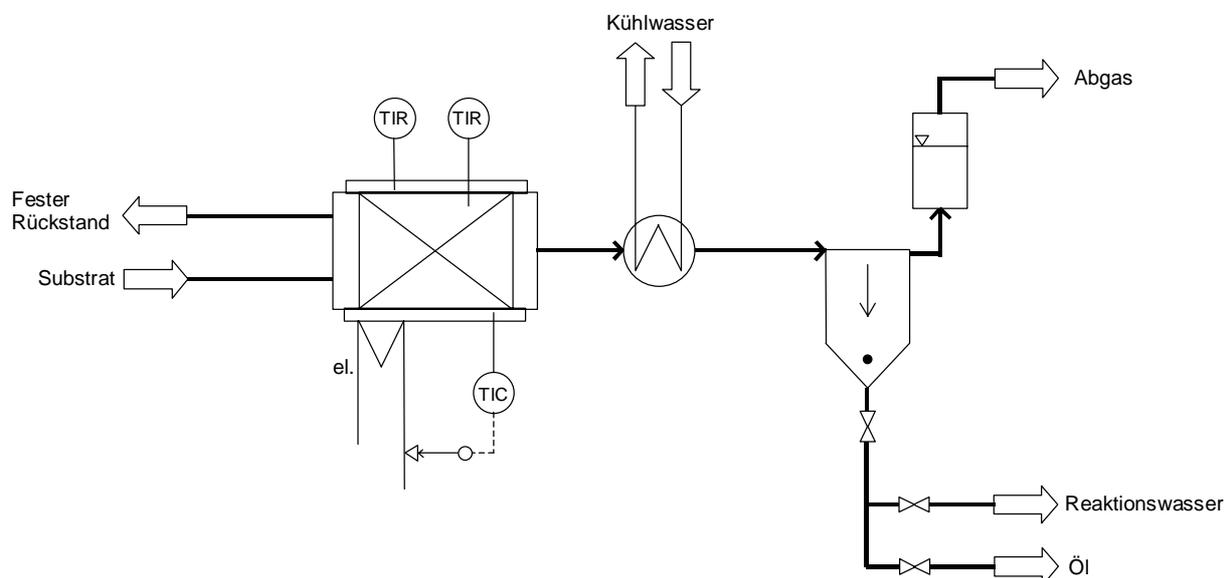


Abb. 7: Schema der NTK-Umsetzungen im Labormaßstab

3.3.2 NTK- Massenausbeuten umgesetzter Substrate

Bei der thermokatalytischen Umsetzung von organischen Substraten (Abb. 8) mit der in Abbildung 7 beschriebenen Laboranordnung entstehen als Produkte flüssige Kohlenwasserstoffe (Rohöl), eine wässrige Phase (Reaktionswasser, inkl. der Restfeuchte des Ausgangssubstrats), eine gasförmige Phase (Abgas) und Salze. Im Reaktionsrohr verbleibt ein fester, graphithaltiger Rück-

stand, der auch nichtflüchtige Salze wie z. B. Sulfate und Carbonate enthält. Die in der Laboranlage erzielten Massenausbeuten sind bezogen auf das trockene Ausgangssubstrat (TR = 100 %).

Die Ölausbeute schwankt in weiten Grenzen von kleiner 10 % bei anaerob behandeltem Klärschlamm bis 80 % bei Tierfett und PE- bzw. PP-Kunststoffen. Faulschlämme ergeben aufgrund des bereits anteilig entfernten Kohlenstoffs in Form von Methan und Kohlendioxid (Faulgas) eine geringere Ölausbeute als die Belebtschlämme. Die Ölausbeute ist dem Gehalt an Fetten und Proteinen proportional. Fette und PE-PP-Kunststoffe haben das Gerüst der Kohlenstoffketten aliphatischer Kohlenwasserstoffe bereits vorgebildet. Die gezielt katalytische Spaltung führt zu hohen Ölausbeuten. Durch Vermischen von Klärschlamm mit Altvetten oder nicht rezyklierbaren Altkunststoffen kann die Ölausbeute im Einzelfall gezielt gesteuert werden.

Die Ausbeute des kohlenstoffhaltigen Feststoffprodukts steht zum einen in Relation zu dem Gehalt an Kohlenhydraten. Diese spalten sich unter NTK-Bedingungen in elementaren Kohlenstoff und Wasser auf. Zum anderen wird die Ausbeute der Feststoffe durch zelluläre Haupt- und Spurenelemente (einschließlich der mineralischen Gerüststoffe) sowie durch anorganische Begleitstoffe des Abwassers (Schwemmstoffe) geprägt.

Der Salzgehalt (NH_4HCO_3 , NH_4Cl) resultiert im Wesentlichen aus Proteinen (NH_3), Fettsäuren (CO_2) und Elektrolyten (Cl^-) sowie deren Interaktion mit dem Reaktionswasser:

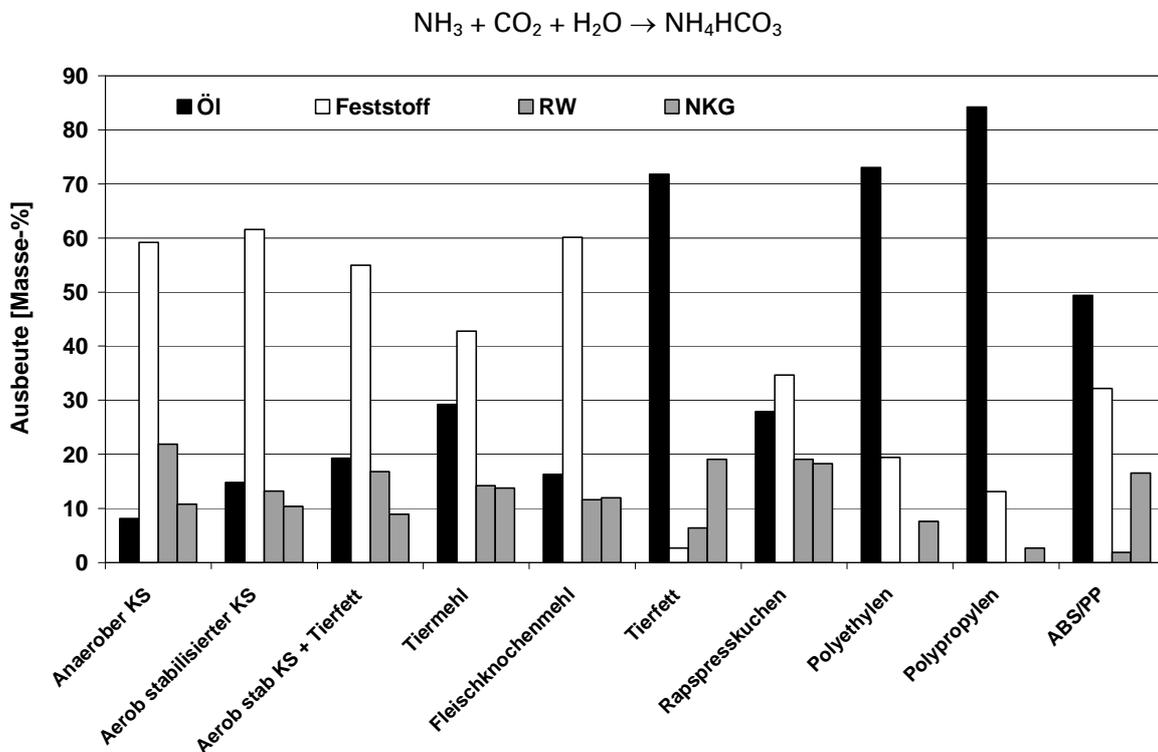


Abb. 8: Massenausbeuten an Kohlenwasserstoffen (Öl), kohlenstoffhaltigen Feststoff, Reaktionswasser und nichtkondensierbaren Gasen bei der NTK von anaerob und aerob stabilisierten Klärschlämmen, aerob stabilisierter KS : Tierfett im Massenverhältnis 90:10, Tiermehl, Fleischknochenmehl, Tierfett sowie Kunststoffen PE, PP, ABS/PP in einem stationären Laborreaktor

3.3.3 Verringerung der Ölviskosität durch Rückvermischung

Die Viskosität der erzeugten Rohöle kann durch partielle Rückvermischung mit kohlenstoffhaltigen Feststoff verringert werden. Der experimentelle Befund ist in Abbildung 9 dargestellt.

Zur Verallgemeinerung dieser experimentellen Befunde wurde für jede Umsetzung die Raumgeschwindigkeit dieser katalytischen Gas/Feststoffreaktion berechnet:

$\text{WHSV} = \Delta m(\text{Gas}) / [m(\text{Kat}) \times t(\text{Reaktion})]$. Dabei resultiert die Gasmasse $\Delta m(\text{Gas})$ angenähert aus dem Massenverlust $m(\text{Substrat} + \text{Zumischung}) - m(\text{Feststoffprodukt nach NTK-Umsetzung})$. Für

die Masse des Katalysators $m(\text{Kat})$ ist der gesamte Feststoff einzusetzen. Als Reaktionszeit wurde angenähert der Zeitraum der Ölbildung eingesetzt. Diese steigt beim Erreichen einer Temperatur des Reaktors von 300° C relativ schnell an und klingt dann in einem Zeitraum von ca. zwei Stunden ab. Der Zeitmessfehler ist mit $\pm 10\%$ abzuschätzen. Die tatsächliche Reaktionszeit am Kontakt ist sehr viel geringer. Die Masse des Reaktionsansatzes betrug ein Kilogramm. Das Ergebnis zeigt Abbildung 10.

Als Fazit aus Abbildung 9 und Abbildung 10 ergibt sich, dass mit zunehmender Rückvermischung bzw. abnehmender Raumgeschwindigkeit die Viskosität des Öls gezielt verringert werden kann.

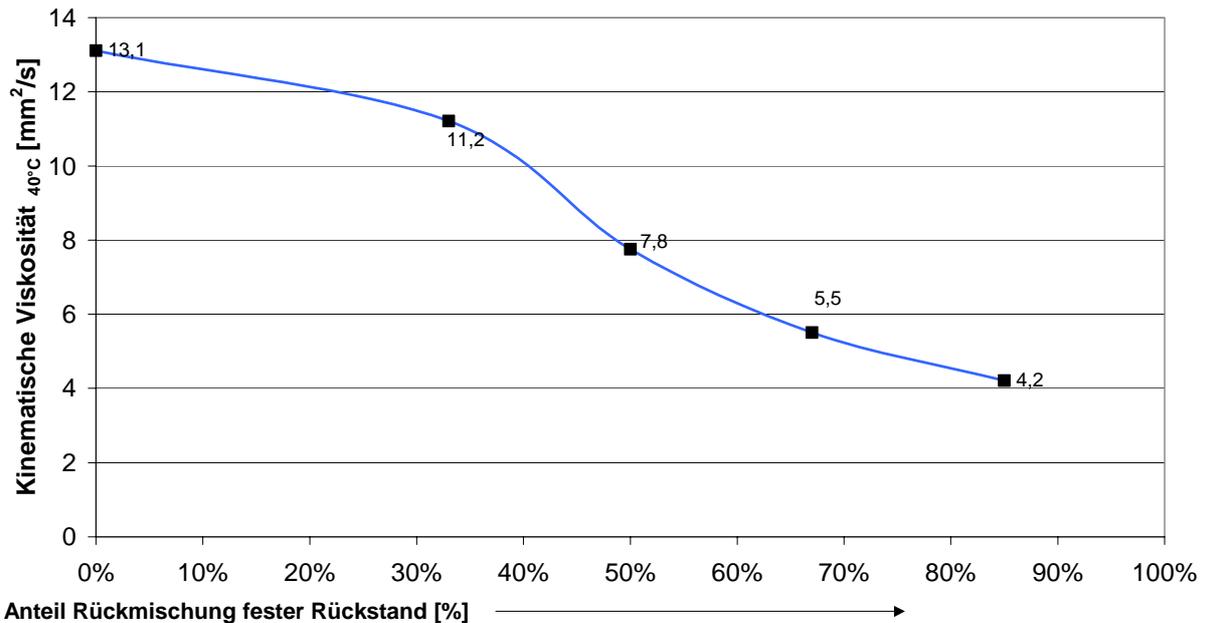


Abb. 9: Einfluss zusätzlicher Menge Feststoffprodukt (Rückmischung) auf die Viskosität von Öl bei der NTK von solar getrocknetem, anaerobem Klärschlamm

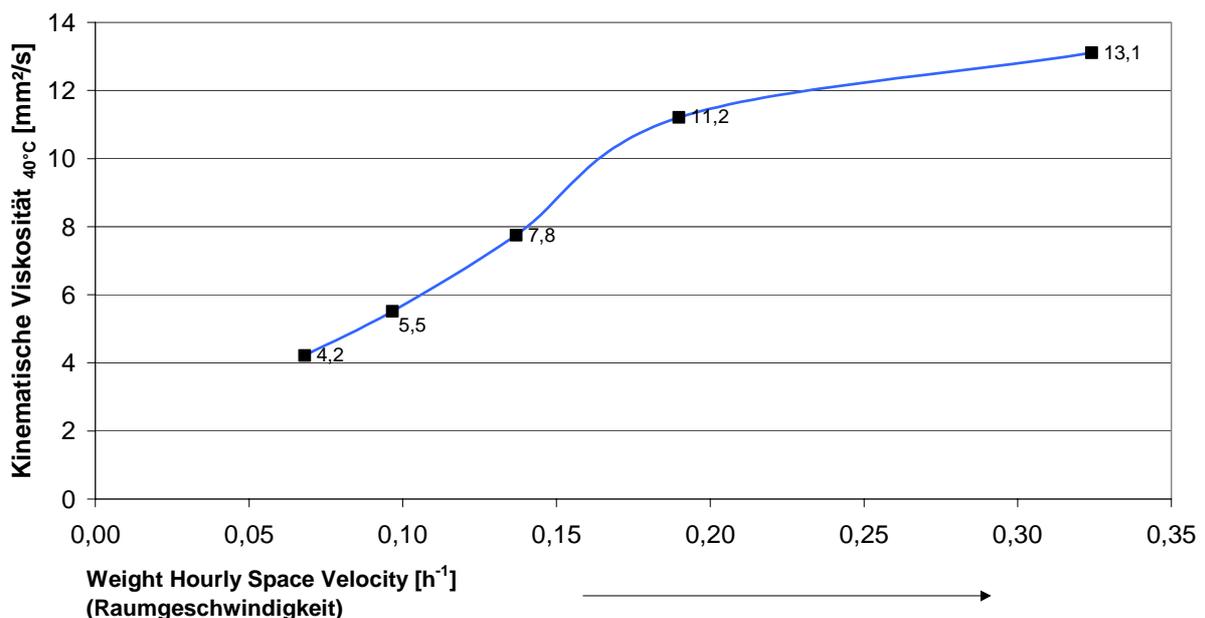


Abb. 10: Abhängigkeit der kinematischen Viskosität des entstehenden Öls von der Raumgeschwindigkeit (WHSV) der heterogenen Gas/Feststoffreaktion bei der NTK von solar getrocknetem, anaerobem Klärschlamm

3.4 Pilotreaktor-Konzept: Festbett-Schlaufenreaktor

Auf der Basis dieser Laborergebnisse wurde der NTK-Pilotreaktor konzipiert. Das Reaktorkonzept gründet sich auf das NTK-Modell einer heterogen katalysierten Reaktion zwischen den der Biomasse entweichenden gasförmigen, organischen Stoffen und dem katalytischen System. Letzteres besteht aus dem gesamten kohlehaltigen Feststoffprodukt. Grundvoraussetzung für den Ablauf des katalytischen Prozesses ist, dass die Gasphase in einen innigen Kontakt mit den katalytisch aktiven Feststoffen kommt. Diffusions-, Adsorptions- und Desorptionsvorgänge haben für den Ablauf der Gesamtreaktion eine entscheidende Bedeutung. Ausgehend von den experimentellen Befunden in Abbildung 9 und Abbildung 10 wurde der kontinuierliche Betrieb als Festbett-Schlaufenreaktor ausgeführt (Abbildung 11).

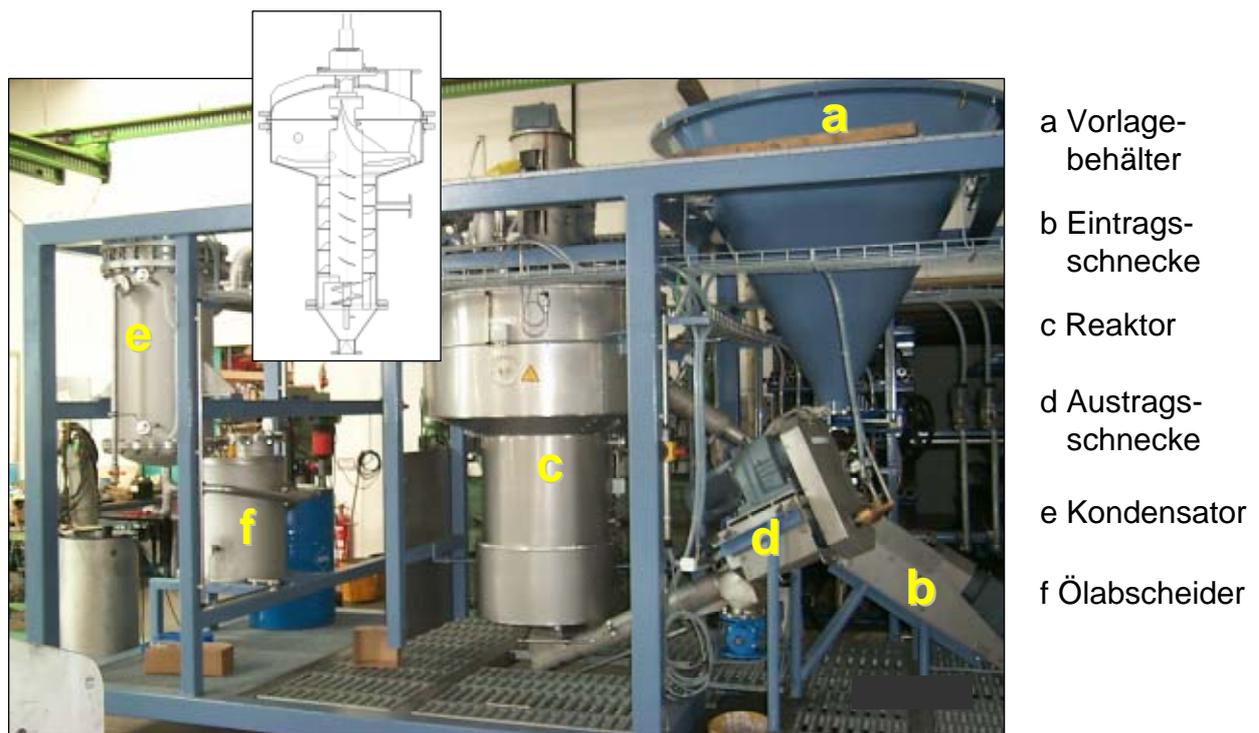


Abb. 11: Schema des Festbett-Schlaufenreaktors (kleines Bild) zur Realisierung eines innigen Kontaktes zwischen der Gasphase und dem katalytisch aktiven System, integriert in die gesamte Pilotanlage zur thermokatalytischen Niedertemperaturkonvertierung (großes Bild)

Über die innere Schaufel ist der im Zuge der äußeren Passage des organischen Substrates von oben nach unten erzeugte kohlehaltige Feststoff durch Variation der Umdrehungszahl gezielt rückführbar. Diese partielle Rückvermischung entspricht den Verfahrensbedingungen bei der anaeroben Industrieabwasserreinigung. Das System ist patentiert [55].

Neben den kohlenstoffhaltigen Feststoffen aus der NTK von Klärschlamm zeigen auch Flugaschen aus der Klärschlamm- und Tiermehlverbrennung katalytische Aktivität zur Gewinnungen von Ölen aus organischen Substraten [56].

Abbildung 12 veranschaulicht die Einbindung der NTK in Stoffstrommanagement und Ressourcenschutz. Dabei ist Dematerialisierung nur eine von vielen Werkzeugen der Verwertungspfadsteuerung [57].

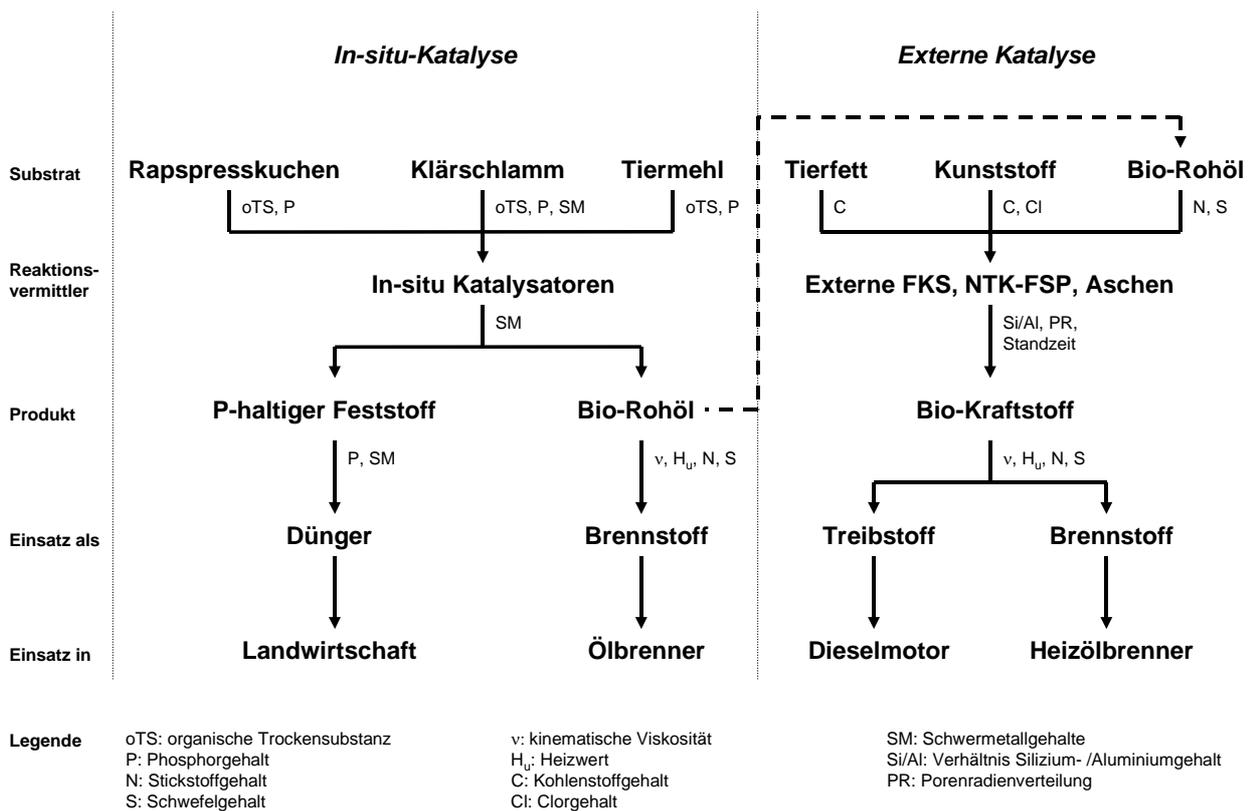


Abb. 12: Elemente eines Verwertungskonzepts für die Produkte der Thermokatalyse verschiedener organischer Reststoffe

3.4.1 Charakterisierung der NTK-Produkte

Struktur und Eigenschaften der Produkte definieren ihre Verwertung. Zielsetzung ist es, zu Produkten zu kommen, für die ein Markt vorhanden ist.

3.4.1.1 NTK-Öl

3.4.1.1.1 Kernresonanzspektren (¹H- und ¹³C-NMR-Spektren)

Das Kernresonanzspektrum von Öl aus anaerobem Klärschlamm (Abb. 13) zeigt anhand der Intensitäten der Resonanzsignale bei chemischen Verschiebungen im Bereich von $\delta \sim 0,5 - 2,4$ ppm (Aliphatenbereich) zu jenen bei $\delta \sim 7$ ppm (Aromaten) das Vorliegen von ca. 95 % aliphatischer Kohlenwasserstoffe und etwa 5 % Verbindungen mit aromatischer Bindung (sp²-Hybridisierung).

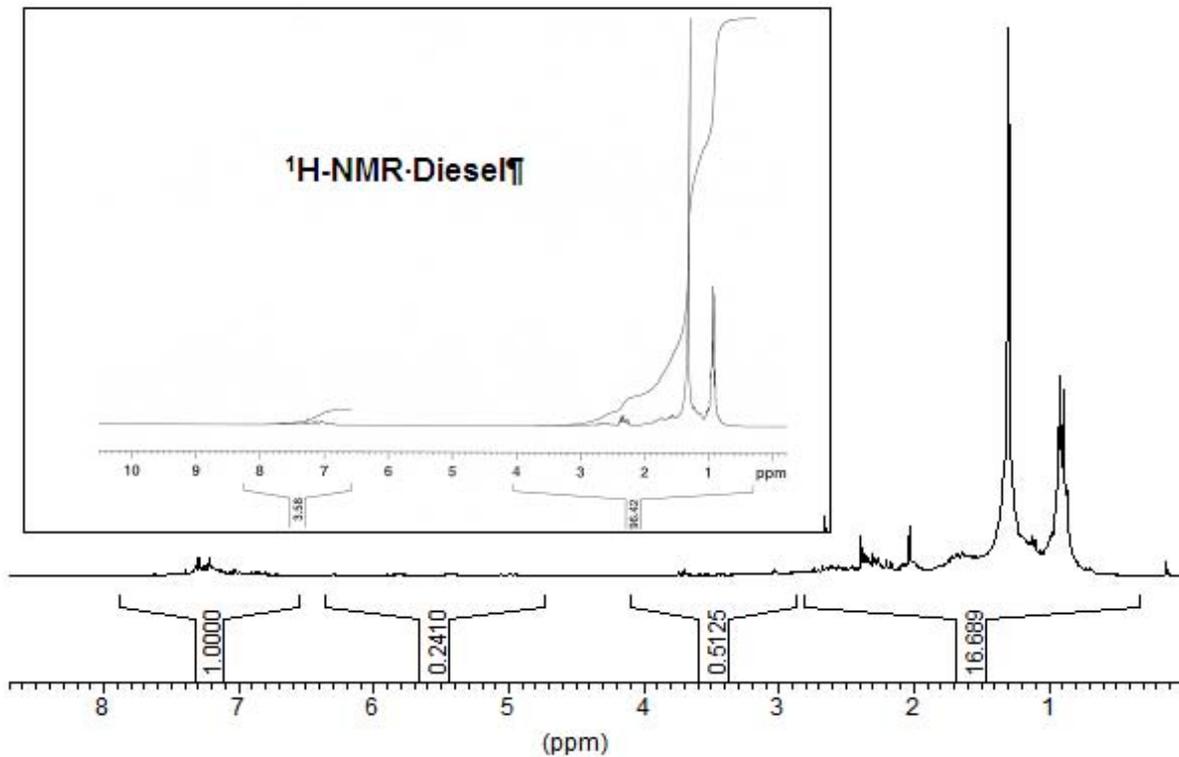


Abb. 13: ^1H -Kernresonanzspektrum des Konvertierungöls aus solar getrocknetem, anaerobem Klärschlamm (großes Bild). Zum Vergleich ist das ^1H -NMR von kommerziellem Diesel darüber stehend verkleinert eingeblendet. Unterschiede sind praktisch nicht festzustellen.

Das ^{13}C -NMR (Abb. 14) festigt über die Signalintegrale bei 10 - 40 ppm sowie 120 - 140 ppm die Aussagen über die Anteile aliphatischer und aromatischer Kohlenstoffe.

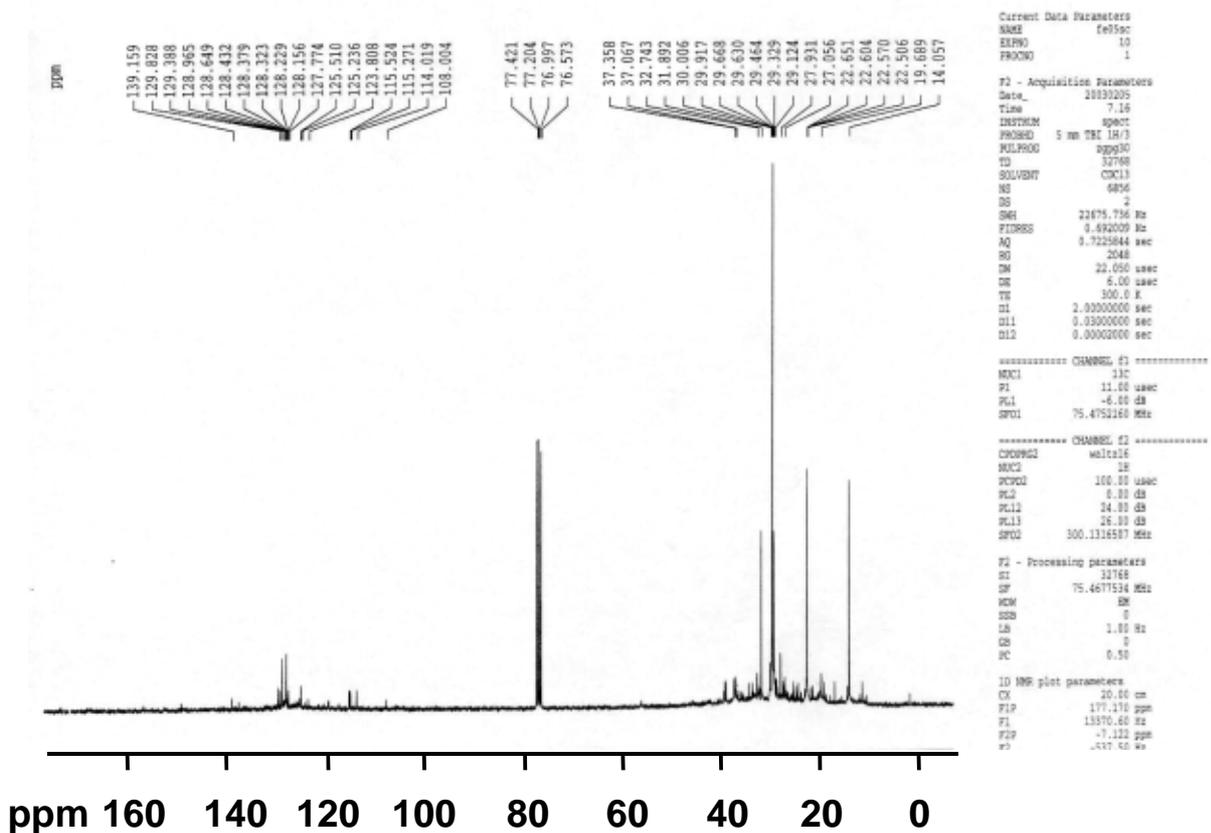


Abb. 14: ^{13}C -NMR des Konvertierungöls aus solar getrocknetem, anaerobem Klärschlamm

Offen ist zunächst die Frage der Kettenlängen der Aliphaten, da die CH₂-Gruppen und CH₃-Gruppen undifferenziert bei Resonanzfrequenzen von $\delta \sim 0,7 - 1$ ppm absorbieren. Um Aussagen über die Kettenlänge zu machen, wurde ein ¹³C-NMR-Spektrum nach der Methode des Driven Equilibrium Polarisation Transfers (DEPT 135-NMR-Spektrum) aufgenommen (Abb. 15).

Im DEPT 135 Modus werden nur ¹³C-Kerne angeregt, die Protonen tragen. Mit dieser Art von Spektren kann eindeutig zwischen CH₂- (negative Signale) und CH- bzw. CH₃-Gruppen (positive Signale) unterschieden werden. Im entsprechenden ¹³C-Spektrum der Konvertierungsöle überwiegen die negativen Signale, d. h. CH₂-Gruppen. Dies zeigt, dass sich die vorgefundenen Aliphaten zum größten Teil aus Fetten bzw. den darin befindlichen aliphatischen Carbonsäuren gebildet haben.

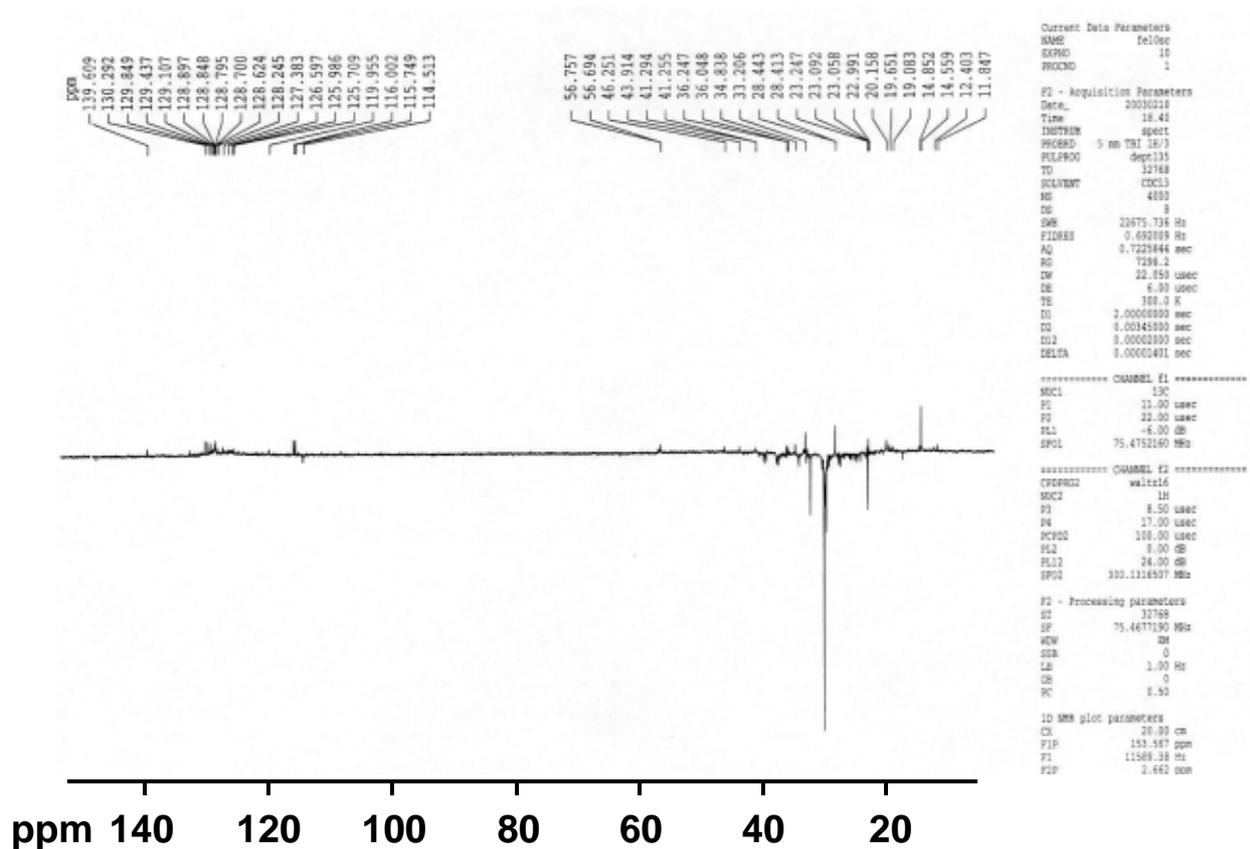


Abb. 15: Dept 135-NMR von Konvertierungsöl aus Klärschlamm. Die negativen Peaks zeigen CH₂-Gruppen an, die positiven Ausschläge weisen auf CH- und CH₃-Gruppen hin. Entsprechend der Intensitäten sind letztere nur in geringer Anzahl im Vergleich zu CH₂-Gruppen vorhanden.

Analoge Ergebnisse finden sich bei Ölen aus der Konvertierung von Tiermehl bzw. Fleischknochenmehl und Kunststoffen auf der Basis von PE und PP.

3.4.1.1.2 Infrarotspektren

Die Infrarotspektroskopie der produzierten Öle ergänzt die Charakterisierung in Bezug auf funktionelle Gruppen. Beispielsweise absorbieren Carbonylgruppen ($=C=O$) um 1700 cm^{-1} . Breite Absorptionsbanden um 3300 cm^{-1} weisen auf das Vorhandensein von NH- bzw. OH-Gruppen hin, die über Wasserstoffbrücken verschiedene Assoziate bilden.

Abbildung 16 zeigt vergleichend die Infrarotspektren von Öl aus anaerobem Klärschlamm im Vergleich zu kommerziellem Diesel. In den Hauptabsorptionsbanden sind die Spektren gleich. Jedoch befindet sich beim NTK-Rohöl im Bereich von 1700 cm^{-1} eine Carbonyl ($=CO$)-Bande geringer Intensität. Bei 3200 cm^{-1} ist ein kleines Tal zu erkennen. Dieses ist charakteristisch für Wasserstoff-

brückenbindungen, die anteilig aus Wasser (H-O-H) und Spuren noch vorhandener Carbonsäure (RCOO-H) bzw. Carbonsäureamiden (R-CON-H₂) stammen. Bei kommerziellem Diesel fehlen sowohl Carbonylabsorptionen als auch die Banden der Wasserstoffbrückenbindung aufgrund der Aufbereitung und Entwässerung in einer Raffinerie. Die geringen Beimengen beeinträchtigen die Verwertung von NTK-Rohöl nicht.

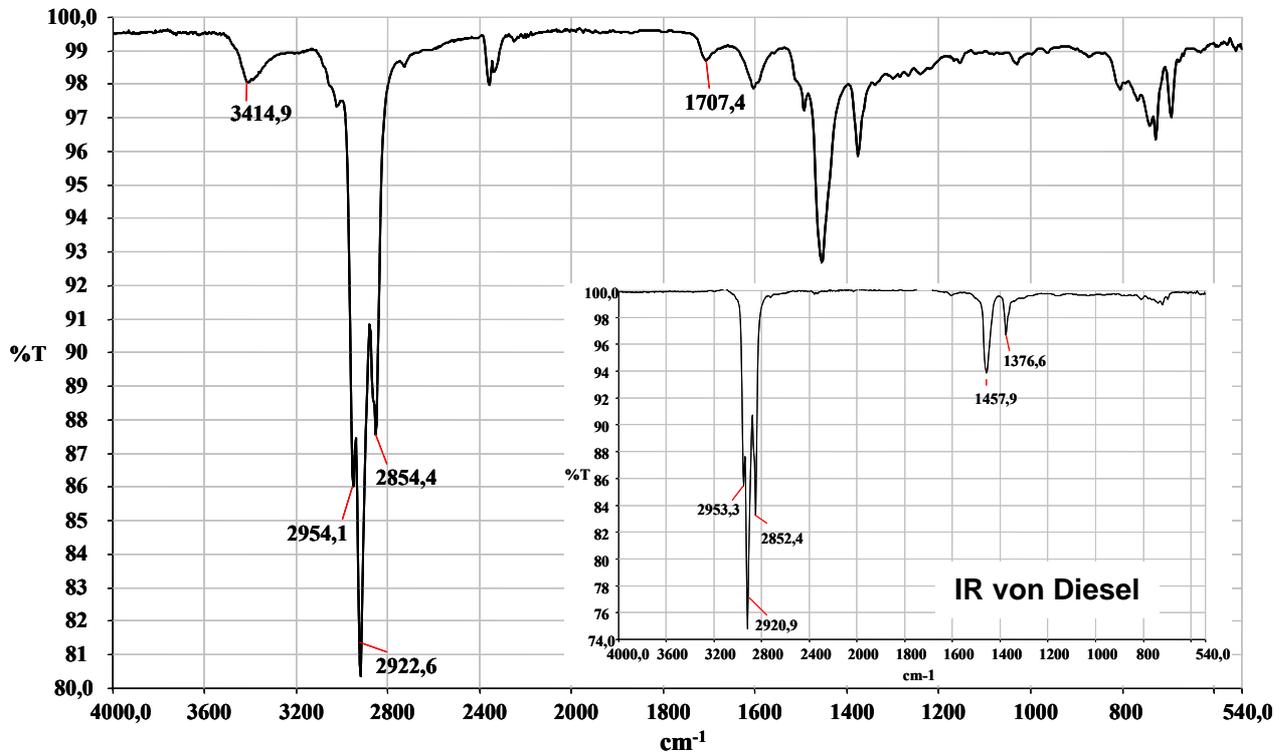


Abb. 16: Infrarotspektren (IR) von Öl aus Klärschlamm (großes Bild) und von Diesel (kleines Bild)

In Tabelle 5 sind Ergebnisse der Elementaranalysen (C, H, N, S, N) von Ölprodukten aus NTK-Umsetzungen zusammen mit Werten der Viskosität (ν), Dichte (ρ) Heizwert (H_u) sowie Emissionswerten (NO_x , SO_2 und Rußzahl) bei der Verbrennung in einem Heizkessel. Zum Vergleich sind die Werte von Heizöl in der letzten Zeile angegeben.

Tab. 5: Analysenwerte der Ölprodukte aus verschiedenen NTK-Umsetzungen

Öl aus Substrat	ν [mm ² /s]	ρ [kg/m ³]	H_u [MJ/kg]	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	NO_x ¹ [mg/m ³]	SO_x ¹ [mg/m ³]	Rußzahl ¹ [%]
Anaerober KS	14,5	917	36,3	74,3	10,2	6,4	1,0	885	0	3
Aerob stabilisierter KS	25,2	957	29,9	67,8	16,9	7,3	0,7			
Aerob stab KS + Tierfett	20,2	884								
Tiermehl	45,2	937	32,3	70,2	10,7	8,7	0,3			
Fleischknochenmehl	29,8	902	19,5	69,8	10,2	11,3	0,2			
Tierfett	0,88	873	41,9	90,8	10,1	n.n.	n.n.	200	0	0,4
Rapspresskuchen	35,3	958	29,4	68,4	15,6	5,9	0,4			
Polyethylen	1,14	756	43,1	84,9	15,0	n.n.	n.n.			
Polypropylen	1,31	760	42,5	85,3	14,8	n.n.	n.n.			
ABS/PP	0,74	832	38,4	87,2	10,2	3,2	n.n.			
Heizöl	< 6,0	< 860	> 42	86,5	14,0	n.n.	n.n.	140	87	0

¹ Emissionswerte nach Verbrennung mit Heizölbrenner

Grenzwerte: NO_x : 350 mg/m³
 SO_x : 350 mg/m³
 Rußzahl: 1 %

Öle aus Klärschlamm oder Tiermehlen weisen aufgrund des Eiweißgehaltes in den Ausgangsstoffen entsprechende Gehalte an Stickstoff und Schwefel auf. Dabei liegt Stickstoff im Öl in reduzierter Form (Oxidationsstufe N = -3) vor. Dadurch ergeben sich für die Entstickung verschiedene technische Möglichkeiten zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte.

3.4.1.1.3 Verwertung der Rohöle

Das dezentral gewonnene Rohöl aus Klärschlamm und Tiermehl ist zur Substitution von Heizöl geeignet. Untersuchungen zum „upgrading“ sind im Gange. Im Falle des Einsatzes von Tierfett sowie Kunststoffen resultiert ein heizölähnliches Ölprodukt. Dieses kann in herkömmlichen Heizöl EL-Brennern verwendet werden [9], [58].

3.4.1.2 NTK-Feststoffprodukt

Das Feststoffprodukt bei der NTK organischer Stoffe besteht aus überwiegend anorganischen Bestandteilen. Hauptkomponenten sind „Aschen“ in Form von nichtflüchtigen Metallsalzen (MeX) und Metalloxiden (MeO_x) sowie von Kohlenstoff in Form von 85 % Graphit. Dies zeigten ¹³C-Festkörperuntersuchungen [59]. Tabelle 6 informiert über ausgewählte Kenngrößen für das Feststoffprodukt aus der NTK verschiedener Substrate. Der Feststoff aus Tiermehl ist nachweislich prionenfrei [59].

Tab. 6. Analytische Charakteristika des NTK-Feststoffprodukts

Substrat	oTR [%]	Schüttdichte [kg/m ³]	H _u [MJ/kg]	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]
Anaerober KS	37,3	740	9,3	25,4	1,8	2,9	1,4
Aerob stabilisierter KS	34,8	487	9,5	24,3	0,8	3,4	0,5
Tiermehl	48,2	630	13,9	34,9	2,5	5,8	n.n.
Fleischknochenmehl	32,8	680	8,2	22,8	1,9	4,4	n.n.
Tierfett	99,9	-	38,4	85,2	14,5	n.n.	0,7
Rapspresskuchen	83,9	345	27,2	64,5	3,8	6,6	0,4

Abbildung 17 zeigt eine Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM). Untersucht wurde das Feststoffprodukt aus der NTK von aerob stabilisiertem Klärschlamm.

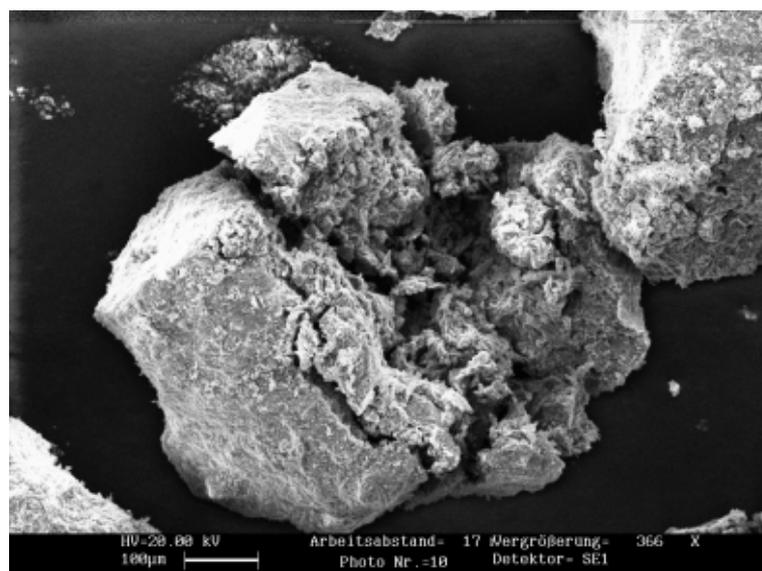


Abb. 17: REM-Aufnahme von festem Rückstand aus aerob stabilisiertem Klärschlamm (Vergrößerung 1:366); REM Stereoscan 440 der Fa. Leo Elektronenmikroskopie

Vorteilhafterweise kann die bildliche Darstellung mit der lokalen Röntgenspektroanalyse verknüpft werden. Das zugeordnete Spektrum zeigt Abbildung 18. Das Ergebnis der Quantifizierung für die Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Silizium (Si), Phosphor (P), Schwefel (S), Kalium (K) und Eisen (Fe) ist Tabelle 7 zu entnehmen. Neben dem großen Anteil an Kohlenstoff von 26,07 % fallen die mit 42,56 % relativ hohen Sauerstoffgehalte und eine hohe Siliziumkonzentration (7,51 %) auf. Aluminium (4,32 %) und Eisen (8,69 %) sind ebenso nachweisbar wie Kalium (1,08 %).

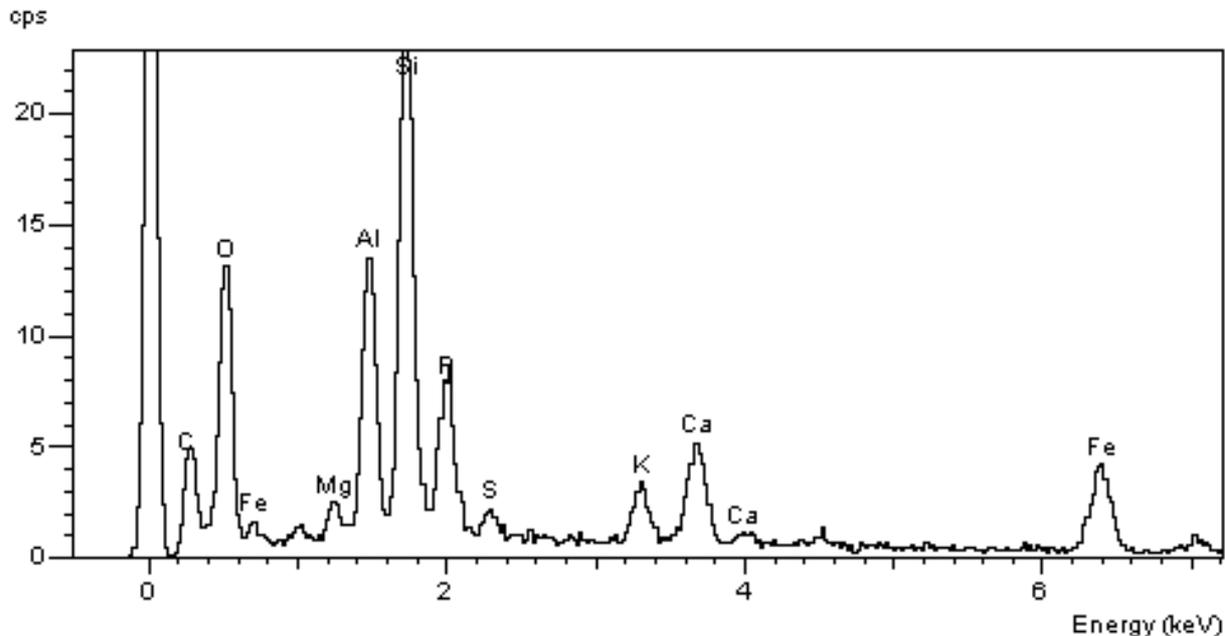


Abb. 18: Röntgenspektrum (EDX) des festen Rückstands aus aerob stabilisiertem Klärschlamm, Lithiumdetektor der Fa. Oxford Instruments

Die Gehalte an Phosphor (5,73 %), Kalium (1,08 %) und Magnesium (0,53 %) und Calcium (2,80) sind im Zusammenhang mit der Diskussion über die Rückgewinnung von Düngemitteln (inkl. Phosphat) aus Klärschlamm interessant. Primäre und sekundäre Phosphate sind in Wasser besser löslich als tertiäre Phosphate. Die Abweichungen bei Kohlenstoff und Schwefel im Vergleich zu Tabelle 6 sind im Wesentlichen durch die Normierung auf 100 % zu erklären. Spurenelementgehalte werden bei den Massenbilanzen gesondert diskutiert.

Tab. 7: Quantifizierung der Elementverteilung aus der Röntgenspektroanalyse

Element	C	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
Gew. %	26,1	42,6	0,53	4,32	7,51	5,73	0,70	1,08	2,80	8,69

3.4.1.2.1 Verwertungsmöglichkeiten

Bei der Realisierung technischer NTK-Anlagen ist eine dezentrale Verwertung der Feststoffprodukte anzustreben. Zielführend sind neben interner Verwertung insbesondere der Einsatz in Ziegeleien und Fabriken der Zementherstellung. Bei Ziegeleien ist der Kohlenstoffgehalt zur Förderung der Porosität von Bedeutung. Energetisch ist jedoch auch die Mitverbrennung des NTK-Feststoffs mit ca. 10 - 12 MJ/kg interessant. Bei einer Standardbildungsenthalpie für Kohlendioxid $\Delta H_f^{\circ}(\text{CO}_2) = -393,5 \text{ kJ/mol}$ ist einer Tonne des Feststoffprodukts rechnerisch ein CO_2 -Einsparpotential von 1,1 t zuzuordnen.

Der NTK-Feststoff ist potentiell eine interessante Ressource zur Rückgewinnung von Phosphor. In Abbildung 19 ist der Gehalt an Phosphat pro Gramm Feststoffprodukt verschiedener NTK-Substrate im Vergleich zu Gehalten beim Aufschluss mit Königswasser aufgetragen. Zur Zeit werden gemeinsam mit der Landwirtschaftlichen Landesanstalt Hessen Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors in Form von Gefäßversuchen durchgeführt.

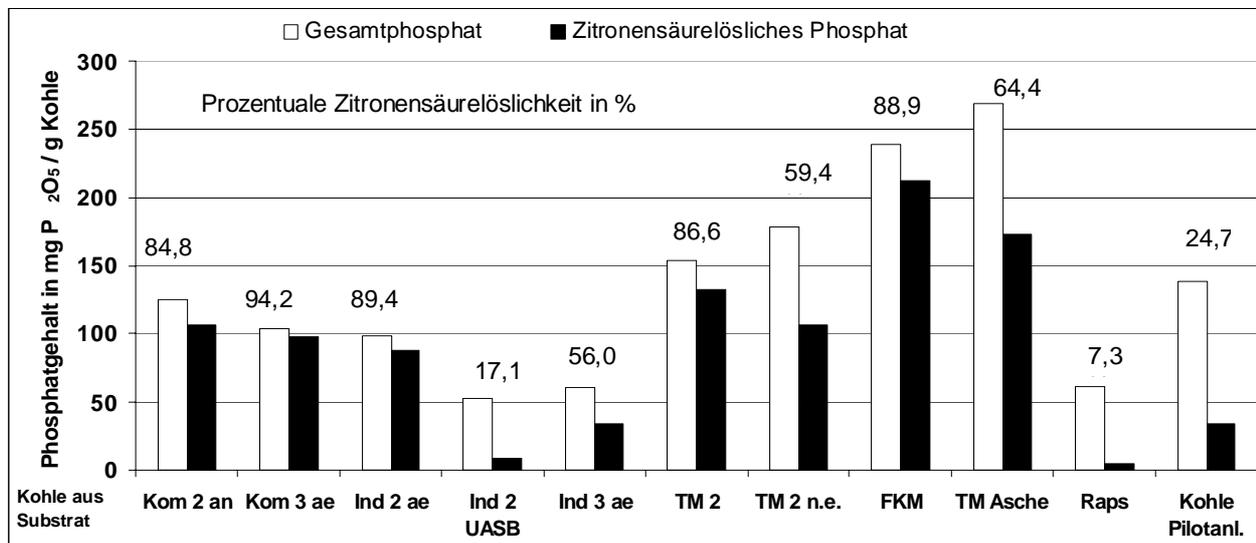


Abb. 19: Gewinnung von Phosphat aus dem NTK-Feststoff der Konvertierung von kommunalem (Kom) und industriellem (Ind) Klärschlamm, Tiermehl (TM), Fleischknochenmehl (FKM), Raps und Kohle aus der Pilotanlage durch Aufschluss mit Königswasser bzw. Extraktion mit 2%iger Zitronensäure (n.e.= nicht entfettet); Vergleichswert: Tiermehlasche

3.4.1.3 Reaktionswasser und Kläranlagenrückbelastung

In Tabelle 8 sind analytische Kenndaten von wässrigen Abläufen der NTK zusammengestellt. Dabei wird zwischen Röhrenkondensation und Sprühkondensation untergliedert. Bei erster besteht der wässrige Ablauf überwiegend aus dem Reaktionswasser, das aus der Dehydratisierung von Kohlenhydraten resultiert. Ionenchromatographische Untersuchungen zeigen organische Säuren und Ammoniumverbindungen in Form von Chloriden und Sulfiden als die wesentlichsten Inhaltsstoffe. Dies bedingt hohe CSB-Belastung. Bei Sprühkondensation vermischt sich das bei der Entfunktionalisierung der Kohlenhydrate entstehende, eigentliche Reaktionswasser mit dem zur Kondensation eingesetzten Fremdwasser.

Tab. 8: Charakteristika wässrige Abläufe der NTK von Klärschlamm bei Röhren- und Sprühkondensation

Parameter/Produkt	Röhrenkondensator	Sprühkondensator
C [%]	5,0	0,3
H [%]	12,2	13,4
N [%]	2,5	0,3
S [%]	0,1	0,3
TR [%]		0,4
pH [-]	9,1	9,4
LF [mS/cm]	-	-
CSB [mg/l]	104.000	6.600
BSB ₅ [mg/l]	50.000	2.200
NO ₂ -N [mg/l]	-	41
NO ₃ -N [mg/l]	-	31,5
NH ₄ -N [mg/l]	26.000	91,9
Gesamt-N [mg/l]	-	155
PO ₄ -P [mg/l]	-	3

Im DBU-Projekt an der Kläranlage des AZV Füssen kam es bei Direkteinleitung in das Belebungsbecken mittels einer geschlossenen Leitung zu keiner Beeinträchtigung der Ablaufwerte. Bei der betriebsinternen thermokatalytischen Klärschlammbehandlung wird die Kläranlage mit ca. 1 % zusätzlicher CSB-Fracht belastet. Dies liegt innerhalb der Schwankungsbreite. Darüber hinaus kann zeitgesteuerte Zufuhr der Abwasserfracht aus der NTK zur Vergleichmäßigung der Belastung einer Kläranlage zu Schwachlastzeiten beitragen.

3.4.2 Schicksal von Schwermetallen und persistenten Chemikalien im Zuge der NTK

Als mikrobielle Biomasse enthält Klärschlamm neben den biologischen Riesenmolekülen auch Metallionen als Bestandteile der Elektrolyte bzw. Spurenelemente. Darüber hinaus kommt es zu Belastungen durch anthropogene Stoffe. Einerseits können durch industrielle, häusliche und diffuse Quellen über Rohrleitungssysteme verschiedene Metalle, Dioxine, Furane und endokrine Stoffe in die Kläranlage eingetragen werden. Sie reichern sich aufgrund der sorptiven Wirkung mikrobieller Oberflächen im Klärschlamm an. Andererseits tragen schwerabbaubare organische Stoffe, die z.B. als Desinfektions- oder Krebsbekämpfungsmittel über Abläufe von Krankenhäusern zu praktisch unvermeidbaren Klärschlammbelastungen bei. Die spurenanalytische Verfolgung dieser Kontaminationsprofile führte in Deutschland und der EU zu einer Verringerung der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Profile von Transfer und Abbau natürlicher oder anthropogener Klärschlammkontaminationen im Zuge der NTK sind für Verwertung der NTK-Produkte und Bewertung der NTK von entscheidender Bedeutung.

3.4.2.1 Bilanzierung von Schwermetallen

Abbildung 20 zeigt die Wiederfindungsraten ausgewählter Schwermetalle nach der Umsetzung im Laborreaktor. Die Untersuchung im Laborsystem lässt eine eindeutige Zuordnung von Gehalten in Substrat, Öl, Wasser, Gasphase und kohlehaltigem Feststoff zu. Die Berechnung erfolgte gemäß der Beziehung:

$$\text{Wiederfindungsrate} = \frac{\text{Metallgehalt Konvertierungsprodukt} \times \text{Produktausbeute}}{\text{Metallgehalt Substrat}} [\%]$$

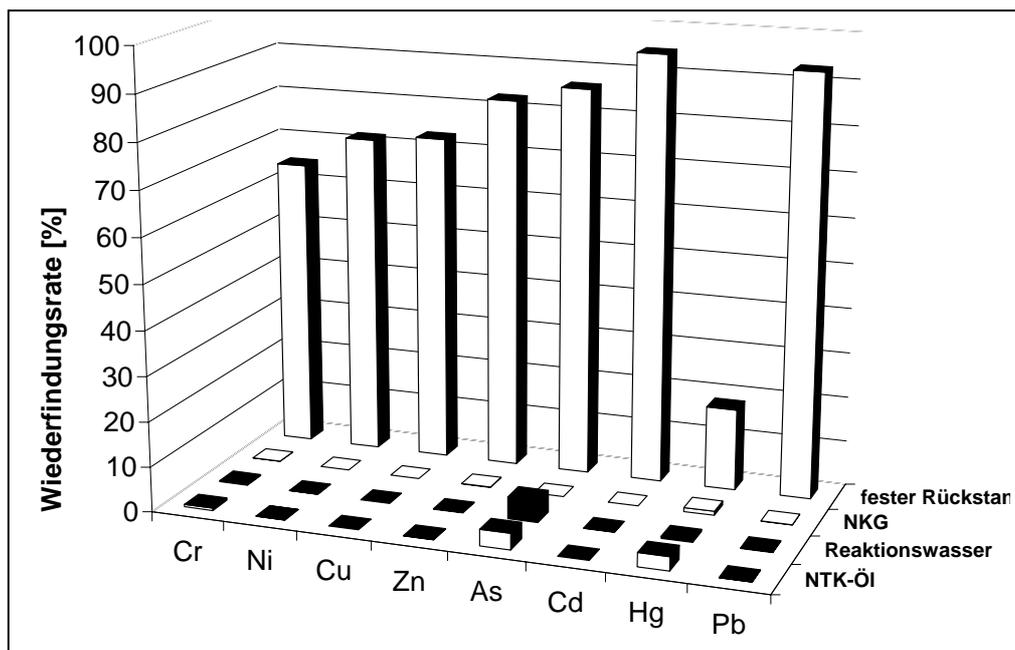


Abb. 20: Wiederfindungsraten von Schwermetallen aus Füssener Klärschlamm Kom2an in den Konvertierungsprodukten aus der Umsetzung im Laborreaktor. Metallgehalte wurden nach Königwasseraufschluss mit ICP-MS entsprechender Schwermetallisotope bestimmt [13]

Augenfällig ist, dass sich die Schwermetalle überwiegend, d. h. zu 64 – 90 % im festen, kohlehaltigen Rückstand wiederfinden. Dies wird primär durch den relativ geringen Dampfdruck bei 400° C geprägt. Hingegen ist für flüchtige Bestandteile wie zum Beispiel Quecksilber die Wiederfindungsrate gering. In diesem Falle konnten auch zusätzliche Waschflaschen mit sulfidhaltigen Lösungen zu keiner signifikanten Erhöhung der Wiederfindungsraten in den verschiedenen Produktphasen beitragen. Der Anteil von Quecksilber in der Gasphase betrug 0,9 %. NTK-Öl ist weitgehend frei von Schwermetallen. Im Öl wurden bei Arsen und Quecksilber mit 3,6 % bzw. 3,1 % die höchste Transfer gefunden.

Inzwischen ist klar, dass für die unbefriedigenden Massenbilanzen insbesondere für Quecksilber überwiegend analytische Fehler zugrunde liegen [60]. Zum einen wurden die Proben durch Königswasser nicht vollständig aufgeschlossen. Abhilfe schafft ein Mikrowellenaufschluss. Zum anderen wird ionisches Quecksilber durch TMT 15® (Trimercapto-s-triazin, Trinatriumsalz [C₃N₃S₃Na₃]) bei der Rauchgasreinigung erfolgreich fixiert [61]. Diese neuen Erfahrungen werden bei den Massenbilanzen im Rahmen des EU-Projektes Berücksichtigung finden.

3.4.2.2 Dioxine und Furane

Es war interessant zu klären, inwieweit neben der Entfunktionalisierung auch eine Dechlorierung stattfindet. Solche Reaktionen sind beispielsweise in Bezug auf diffuse Kontaminationen von Biomassen mit polychlorierten Dibenzodioxinen und -Furanen (PCDD/F) denkbar und im Sinne der Dekontamination wünschenswert. Darüber wurde, mit Klärschlamm und Fleischknochenmehl als Substrate, ausführlich unter Einschluss der Kongenerenanalyse berichtet [13]. Abbildung 21 zeigt eine Zusammenfassung in Bezug auf Klärschlamm. Die Anwendung des NTK-Verfahrens auf anaerob stabilisierten Klärschlamm des Abwasserzweckverbandes Füssen bewirkte, bezogen auf den Ausgangsgehalt, einen Abbau, das heißt eine Reduzierung der chlororganischen Verbindungen (polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane) um etwa 76 %.

Bei den Dioxin- und Furankonzentrationen der NTK-Produkte bestehen keine Probleme, da sie weit unter den Grenzwerten der Chemikalien-Verbotsverordnung liegen.

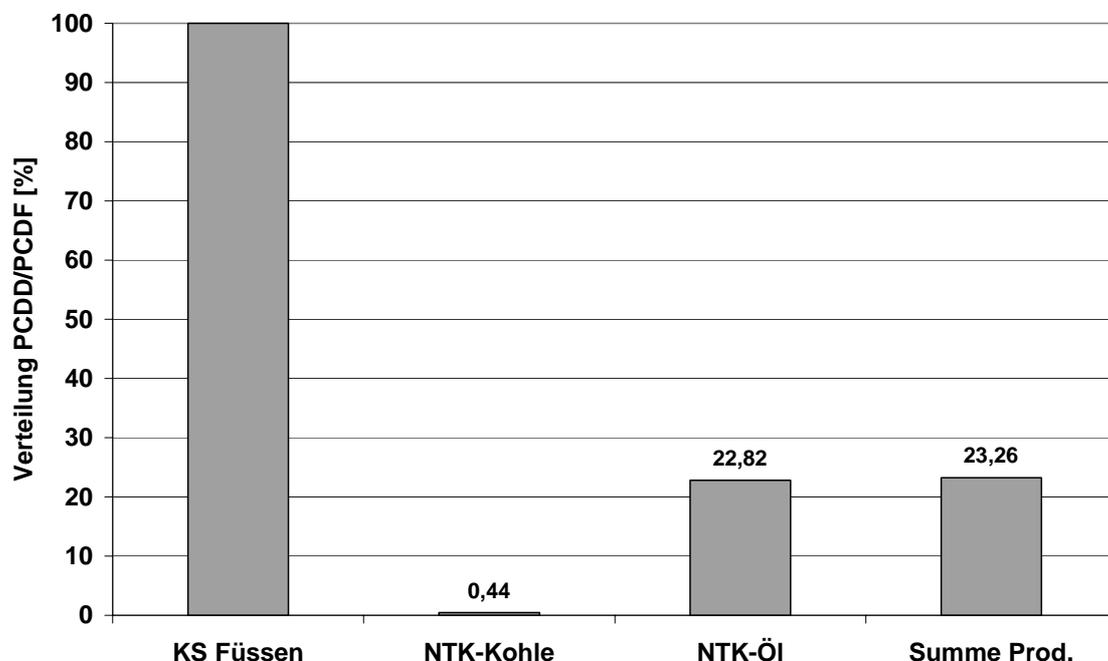


Abb. 21: Abbauverhalten von im Klärschlamm vorhandenen PCDD und PCDF im Zuge der Niedertemperaturkonvertierung. Gehalte im Reaktionswasser lagen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,03 ng/L

3.4.2.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB)

Die Konzentration polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) von 4,6 mg/kg TR, die in der NTK-Kohle gemessen wurde, liegt unter dem im Ausgangssubstrat Klärschlamm aus Füssen gefundenen Wert von 10 mg/kg. Es ist somit für die Kohle nicht von einer kritischen PAK-Konzentration auszugehen. Das Reaktionswasser weist mit 14,6 µg/l lediglich einen Bruchteil der im Klärschlamm vorhandenen Konzentration auf. Für die nach der NTK-Laborumsetzung von Klärschlamm im Öl zu findenden PAK-Konzentrationen, wurde ein Summenwert nach EPA von $PAK_{EPA} = 608$ mg/kg OS ermittelt. Die PCB-Konzentration des Öls aus dem Betrieb der Pilotanlage in Füssen liegt unter der Nachweisgrenze von 100 µg/kg. Im festen Rückstand wurden 10 µg/kg gefunden. Der untersuchte Ölschlamm weist einen Gehalt von 135 µg/kg auf. Im Ergebnis bereiten PAK und PCB-Profile bei der NTK keine Probleme.

3.4.2.4 Benzalkoniumchlorid als Modellsubstanz persistenter Desinfektionsmittel

Die Untersuchungen zur Adsorption bzw. zum Abbau von Arzneimitteln und Desinfektionsmitteln im Zuge der NTK wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene des Universitätsklinikums Freiburg durchgeführt. Zum Einsatz kamen:

- Benzalkoniumchlorid (BC, Desinfektionsmittel),
- Ciprofloxacin (CF, Antibiotikum),
- Mitoxantron (MX, Zytostatikum).

Detaillierte Ergebnisse sind in [62], [13] beschrieben. Die chromatographische Analyse in Abbildung 22 zeigt, dass Benzalkoniumchlorid im Zuge der katalytischen Abbaureaktionen der NTK quantitativ zerstört wird.

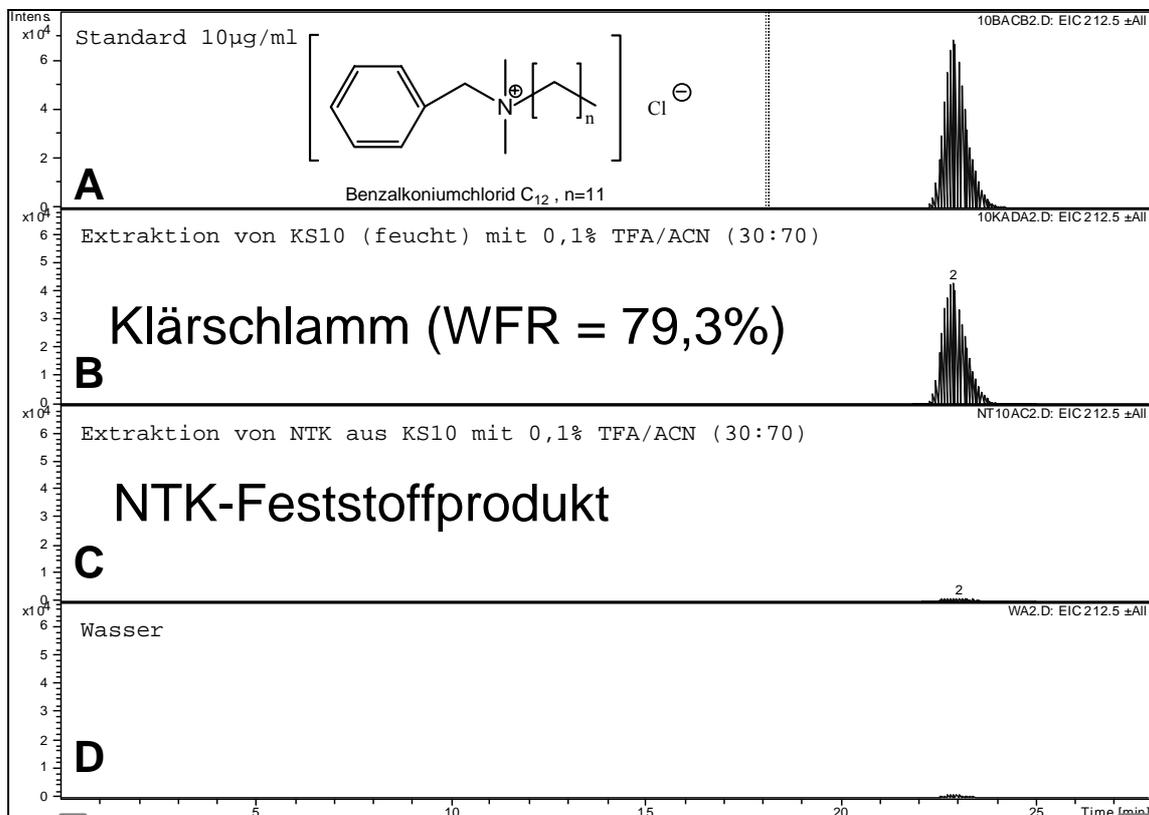


Abb. 22: HPLC-Chromatogramme von anaerob stabilisiertem Klärschlamm, dotiert mit Benzalkoniumchlorid (A), zugehörige Wiederfindungsrate (B), Chromatogramm von NTK-Feststoff (C) sowie Wasser zum Vergleich (D)

3.4.3 Wärmebilanz

Die Wärmebilanz im Verbund mit solar getrocknetem Klärschlamm veranschaulicht Abbildung 23.

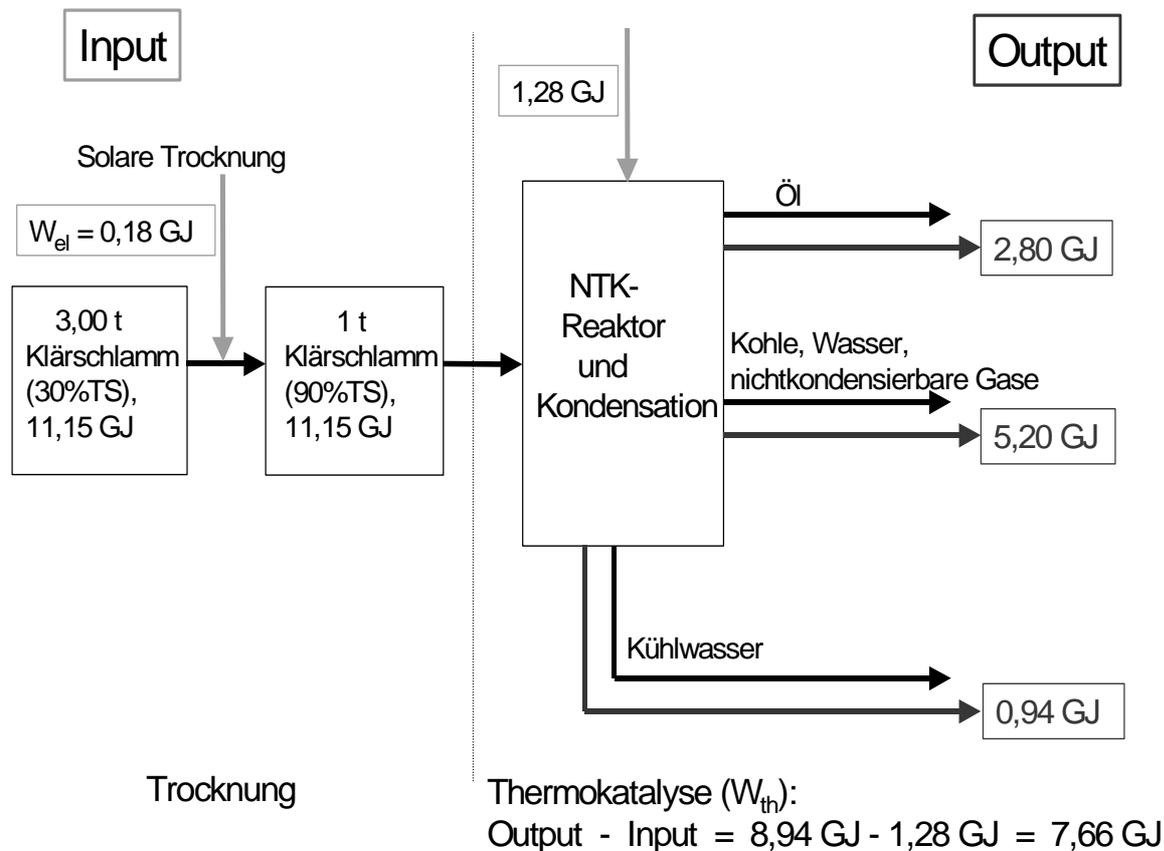
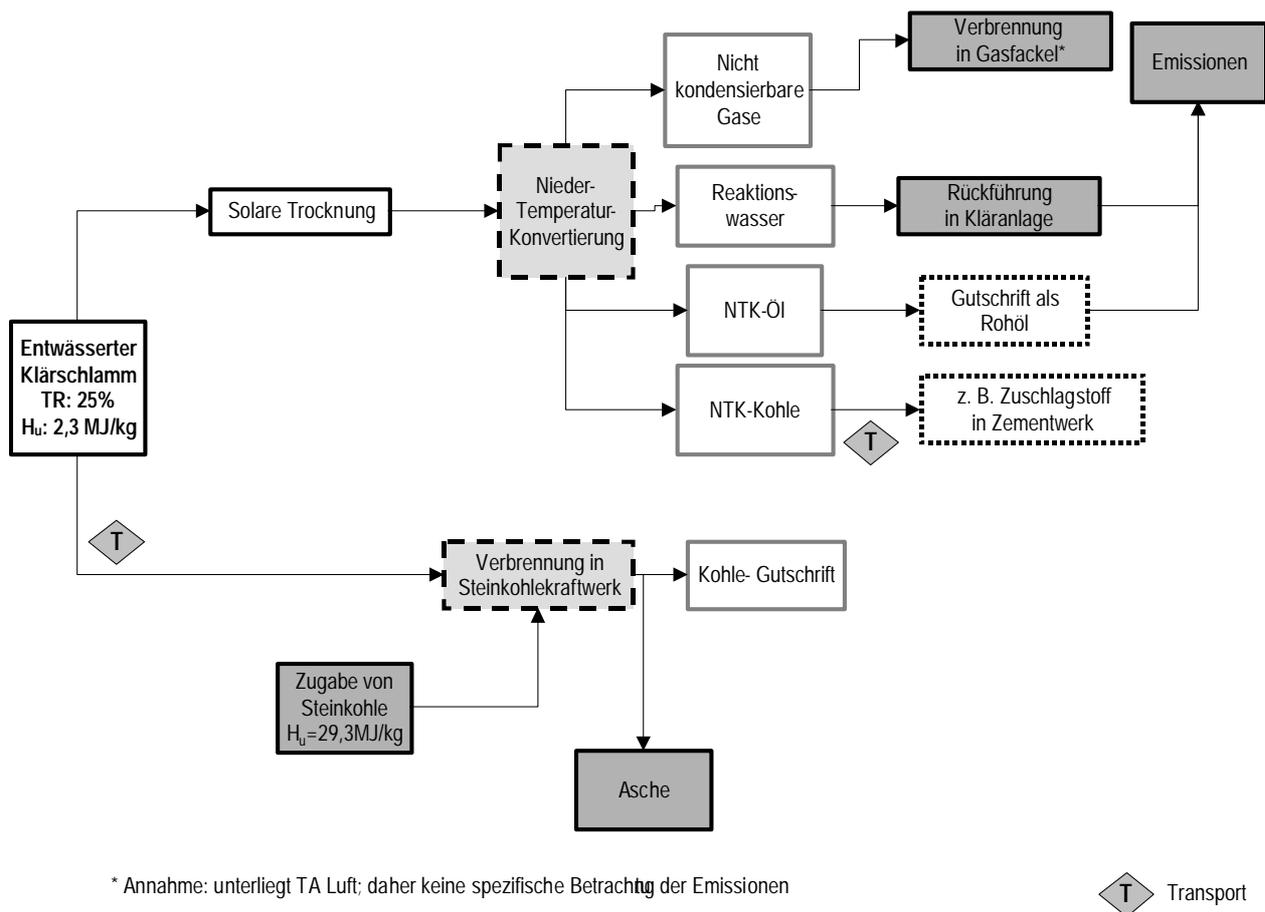


Abb. 23: Wärmebilanz bei der Thermokatalyse von solar getrocknetem Klärschlamm – bezogen auf 1 Tonne mit einer Restfeuchte von 10 %

Es wird deutlich, dass aus der NTK von Klärschlamm bei energetischer Nutzung der Produkte ein Energiegewinn erzielt werden kann. Bei 20% Feuchte beträgt er 6,8 GJ/t.

3.5 Ökoeffizienzanalyse

Die Ökoeffizienzanalyse ist ein von der BASF entwickeltes Bewertungsinstrument, das auf einer Ökobilanz nach der ISO Norm 14040ff. und einer Kostenrechnung basiert. Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgt in einem so genannten Ökoeffizienz-Portfolio. Auf diese Weise wird der wirtschaftliche und umweltrelevante Stand eines Verfahrens im Vergleich mit anderen augenfällig dokumentiert. Darüber hinaus ermöglicht die Ökoeffizienzanalyse, verfahrenseigene Schwächen und Stärken ausfindig zu machen. Abbildung 24 veranschaulicht die definierten Systemgrenzen.



* Annahme: unterliegt TA Luft; daher keine spezifische Betrachtung der Emissionen

T Transport

Abb. 24: Systemgrenzen für NTK und Referenzverfahren „Mitverbrennung von Klärschlamm im Steinkohlekraftwerk“

Die Ergebnisse der ökobilanziellen und wirtschaftlichen Betrachtung sind in Abbildung 25 dargestellt. In einer Ökoeffizienzanalyse wurde die NTK (elektrische Beheizung und Abgasheizung) von anaerob ausgefaultem, solar getrocknetem Klärschlamm bei 8 % Ölausbeute mit der Mitverbrennung im Steinkohlekraftwerk unter definierten Systemgrenzen (Abb. 24) verglichen [63]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt. Dabei ist der senkrechte Abstand der Position des jeweiligen Verfahrens von der 0,5/0,5 Diagonalen in Richtung des rechten oberen Quadranten der Indikator der Ökoeffizienz. Entsprechend dem Ausgangszenario Abbildung 24 liegt die Klärschlamm-Mitverbrennung im oberen rechten Quadranten. Sie ist weniger umweltbelastend und kostengünstiger als die NTK unter den Bedingungen an der Kläranlage des AZV in Füssen im Rahmen des DBU-Projektes [13]. Mit steigender Ölausbeute und abnehmenden Entsorgungskosten für den festen kohlehaltigen Rückstand steigt die Ökoeffizienz der NTK. Dies kann u.a. durch die gemeinsame Umsetzung von Klärschlamm und Alt- bzw. Tierfett (vgl. Abb. 8) und Verwertung der Rückstände in der Tonindustrie erfolgen [64].

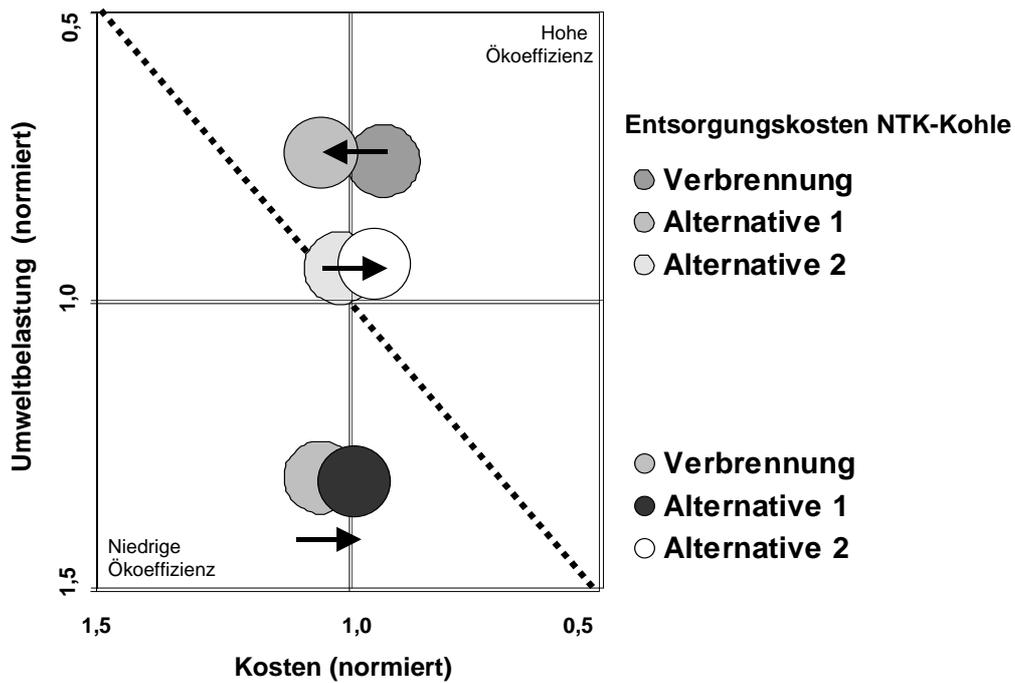


Abb. 25: Ökoeffizienzportfolio

Danksagung

Das NTK-Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück unter dem Kennzeichen Az 18 153 sowie AiF PRO INNO finanziell gefördert. Frau Dipl.-Ing. G. Donnevert und Frau Dipl.-Ing. E. Landrock-Bill, FH Gießen-Friedberg und Herrn Dr. G. Schilling, Universität Heidelberg sei für FTIR-, REM- und NMR-Untersuchungen gedankt. Frau C. Steller, Frau L. Beermann und Frau R. Sauer gebührt Dank für experimentelle Unterstützung.

4 Literaturverzeichnis

- [1] B. Kamm: Biorefineries- Industrial Processes and Products, Wiley-VCH 2005, ISBN 3527310274
- [2] Azapagic, A.: Sustainable Development in Practice, Wiley 2004, ISBN 0470856092
- [3] K. Wiemer, M. Kern: Bio- und Sekundärrohstoffverwertung, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2006
- [4] Vorlop, K.-D.: Nachwachsende Rohstoffe- Potenziale und Konversionswege zu Biokraftstoffen, in Kraftstoffe der Zukunft 2005, ufop & BBW (Hrsg.), 3. Internationaler Fachkongress 14/15. 11. 2005, ICC Berlin
- [5] Zellner, R. : Die +2-Grad-Gesellschaft: Wieviel Klimaschutz ist nötig? Vortrag ACHEMA 2006, 15.- 19. Mai , Frankfurt
- [6] H. Römpf. Chemielexikon, 6. Auflage Francksche Verlagshandlung, Stuttgart, 1966, I, A-E, S. 631ff
- [7] Bayer, Ernst, G. Becker, M. Faubel, M. Kutubuddin, A. Maurer: Wertstoffgewinnung aus Automobilkunststoffen. UWSF – Z. Umweltchem Ökotox. 7 (4) 221-225 (1995)
- [8] Becker, Gerhard: Niedertemperaturkonvertierung von Automobilkunststoffen und kunststoffhaltigen Abfällen. Dissertation Universität Tübingen, Tübingen 1993
- [9] Stadlbauer, E. A., S. Bojanowski, S. Hossain, A. Fiedler: Synthetische Kraftstoffe aus organischen Reststoffen durch Thermokatalyse (Niedertemperaturkonvertierung – NTK). Beitrag ACHEMA-Broschüre
- [10] Heinrich , H.: Bioethanol und ETBE- die Position der Fahrzeugindustrie im Kontext der internationalen Entwicklung in [3]
- [11] Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor
- [12] Hollemann, A.F. : Lehrbuch der Anorganischen Chemie für Studierende an Universitäten und Technischen Hochschulen, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 4. Auflage 1906, S. 179
- [13] Stadlbauer, E. A.: Thermokatalytische Niedertemperaturkonvertierung (NTK) von tierischer und mikrobieller Biomasse unter Gewinnung von Wertstoffen und Energieträgern im Pilotmaßstab. Abschlussbericht DBU-Projekt Az.18153, Gießen, Juli 2005
- [14] Bayer, E.: European Patent Application No. 81109604.9, Nov. 10th, 1981, published May 26th 1982, Pub. No. AZ 0052 334
- [15] Bayer, E., Kutubuddin, M.: Öl aus Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser 29 (1982), 377-381
- [16] Maier, K.-H: Klärschlammkonvertierung durch anaerobe Eliminierung der Heterofunktion, Dissertation, Universität Tübingen, 1981
- [17] Kutubuddin, M.: Niedertemperaturkonvertierung von Biomasse zu Öl und Kohle, Dissertation Universität Tübingen, 1982
- [18] Bayer, E.: Biomasse als Energie- und Chemierohstoff, Der math. u. naturwiss. Unterricht 36 (1983), 267-270
- [19] Campell, H.W., Bridle, T.R.: Conversion of sludge to oil: a novel approach to sludge management, presentation at the Specialist Group on Design and Operation of Large Waste-water Treatment Plants, seminar at the 14th IAWPRC Conf., Brighton, UK, 1988
- [20] Stadlbauer, E. A., S. Bojanowski; A. Frank.; R. Lausmann; W. Grimmel (2003): *Untersuchungen zur thermokatalytischen Umwandlung von Klärschlamm und Tiermehl*. KA – Abwasser, Abfall 2003 (50) 12, 1558 – 1562

- [21] [] Stadlbauer, E. A., Wechs, F., Petz, F., Bojanowski, S., Fiedler, A., Rossmannith, J., Frank A., Rünigel, E. (2004): „*Trockene Destillation*“ von Klärschlamm. Wasser, Luft und Boden 9 (2004), 14-17
- [22] Stadlbauer, E.A.; Niedertemperaturkonvertierung (NTK) (2003): *Stand und Entwicklungspotential einer thermokatalytischen Verfahrenstechnik*. Info Mappe VDI Wissensforum, Dortmund, Seminar 433624, 13.-14. Februar 2003
- [23] Gangl, Ch., E. A. Stadlbauer, F. Wechs (2003): *Klärschlamm zu Rohöl – Pilotanlage im Klärwerk Füssen geht in Betrieb*. Bayerischer Bürgermeister, Thema des Monats, August 2003, S. 276-279
- [24] Faubel, M.: Niedertemperaturkonvertierung von Hausmüll, Dissertation Universität Tübingen, 1992
- [25] Becker, G.: Niedertemperaturkonvertierung von Automobilkunststoffen und kunststoffhaltigen Abfällen, Dissertation Universität Tübingen, 1993
- [26] Deyle, C-J.: Verwertung und Recycling von Altfarben und Kunststoffmüll mittels Niedertemperaturkonvertierung, Dissertation, Universität Tübingen, 1997
- [27] Oberdörfer, M.: Niedertemperaturkonvertierung von Ölsaaten, Dissertation, Universität Tübingen, 1990
- [28] Ligong, T.: Untersuchungen zur Verwertung von Teesamenölkuchen, Dissertation, Universität Tübingen, 1993
- [29] Steger, M. Th. und W. Meißner: Drying and Low Temperature Conversion- a Process Combination to Treat Sewage Sludge Obtained from Oil Refineries, Water Science and Technology Vol.34 No10pp 133-139, IWA Publishing, 1996
- [30] Aicher, M.: Korrigierte Europäische Patenschrift EP 0807 461 B 9 vom 19.11. 1997, Patentblatt 1997/47; Patentinhaber: Max Aicher Umwelttechnik GmbH, 83395 Freilassing; Erfinder: Meissner, W.; Steger, M.
- [31] Aicher, M.: United States Patent, Patent number 5,246,599, Sept. 21, 1993
- [32] Stadlbauer, E.A.; Bojanowski, S.; Frank, A.; Skrypski-Mäntele, S.; Zettel, C.: Treatment of Bovine Carcasses from Veterinary Clinics in Times of BSE, in: Book of Abstracts, 1st International Symposium on residue management in Universities, Universidade Federal de Santa Maria, November 6-8th, 33-34
- [33] Stadlbauer, E. A., R. Altensen, S. Bojanowski, G. Donnevert, A. Fiedler, S. Hossain, J. Rossmannith, G. Schilling (2006): *Herstellung von Kohlenwasserstoffen aus Tierfett durch thermokatalytisches Spalten*. Erdöl Erdgas Kohle 2006 (122) 2, 64 – 69
- [34] Bojanowski S., A. Fiedler, A. Frank, J. Rossmannith, G. Schilling, E. A. Stadlbauer (2005): Catalytic Production of Liquid Fuels from Organic Residues of Rendering Plants. In: Proceedings of Environmental Science and Technology, Vol. (II), 106-107, American Science Press, ISBN: 0-9868853-5-2, New Orleans, 2005
- [35] Bojanowski, S.: Thermokatalytische Synthese flüssiger Kraftstoffe und phosphathaltiger Düngemittel aus tierischen, mikrobiellen und pflanzlichen Reststoffen. Promotion Universität Kassel, in Arbeit
- [36] Campbell, H.W.; Martinoli, D.: Canada's oil from sludge technology, Water Env. Tech-nol. **3**, 7 (1991), 64
- [37] Bridle, T.R.; Hertle, C.K.: Oil from sludge: a cost effective sludge management system, Water (J. of Australian Water and Wastewater Assoc.) **15**, 3 (1988), 32-36
- [38] Bridle, T.R., Skrypski Mäntele, S.: Process and Apparatus for the conversion of sludges, United States Patent 5,865,956, February 2, 1999

- [39] Skrypski-Mäntele, S.; Bridle, T.R. (2001): Management of Industrial and Municipal Sludges Using the ENERSLUDGETM process. Proceedings of the IBC Sewage Sludge – Treatment and Disposal Options Conference, Birmingham, 26.-27.04.2001, UK
- [40] Buswell, A., M.; Mueller, H.F.: Mechanism of methane fermentation, *Ind. Eng. Chem.* **44** (1952), 550-552
- [41] Stadlbauer, E. A, Sixt, H., Konstandt, H.G.: Biogasanlagen, Energieerzeugung und Umweltschutz durch Biogastechnologie – Industrieabwässer, Landwirtschaft, Deponien. Band 103 Kontakt & Studium Expert Verlag, Grafenau, 1982...
- [42] Hagen, J.: Technische Katalyse, VCH, Weinheim, 1996, ISBN 2-527-28723-X
- [43] Rupp, L.: Mechanismus des thermischen Abbaus von Fetten und Fettsäuren. Dissertation, Universität Tübingen, 1986
- [44] Ettel, S.: Untersuchungen zum Mechanismus der Niedertemperaturkonvertierung von Biomasse. Beeinflussung der thermischen Abbaureaktionen und ihrer Abbauprodukte durch Metalloxide, Dissertation, Universität Tübingen, 1991
- [45] J. Welt, *Chem.: Ber.* 30, (1897), 1495
- [46] Bayer, E.; Kutubuddin, M.: Niedertemperaturkonvertierung von Klärschlamm zu Öl, Preprints GVC-Konf. „Verfahrenstechnik der Klärschlammverwertung“, Baden-Baden (1984), 141-156
- [47] Brunner, P.H.: Beitrag zur Pyrolyse von Cellulose für die Herstellung von Aktivkohle aus cellulosehaltigen Abfällen, Dissertation, ETH Zürich, 1976
- [48] Maurer, A.: Gewinnung von Aktivkohle und Rohöl aus Abfällen via Niedertemperaturkonvertierung, Dissertation Universität Tübingen, 1994
- [49] Hagen, J.: *Industrial Catalysis*, Wiley-VCH, 2006
- [50] Rosemann, R.: Substanzielle Charakterisierung von Produkten einer Abfallpyrolyseanlage, Dissertation TU Braunschweig, 1998
- [51] Ulrich-Jost: Kurzes Lehrbuch der physikalischen Chemie, D. Steinkopff Verlag Darmstadt, 16. Auflage, 1966
- [52] Richtlinie 96/61/EG des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung vom 24. September 1996 (ABl. EG L 257/S. 26), geändert durch die Richtlinie 2003/87/EG vom 13. Oktober 2003 (ABl. EU L 275/S. 32).
- [53] Stadlbauer, E. A.: Entwicklung, Betrieb und analytische Begleitung eines Prototyps zur katalytischen Gewinnung kohlenwasserstoffbasierter Biotreibstoffe aus Tierfett. AiF-Projekt ProInno II, Förderkennzeichen KF0059102ST5, 2006.
- [54] Thome-Kozmiensky, K. J., Pahl, U. (1994): Anwendung des Thermoselect-Verfahrens zur KS-Entsorgung und Altlastensanierung. In: Thermoselect-Verfahren zur Ent- und Vergasung von Abfällen, EF-Verlag, Berlin, S.139-191
- [55] Grimmel, W., Stadlbauer, E A.: Deutsche Patentanmeldung Nr. 103 07 438.4, Deutsches Patentamt München, 2003
- [56] Banholzer, T.: Thermokatalytische Umsetzung organischer Reststoffe mit Flugaschen. BPS-Arbeit in Vorbereitung, FH Gießen-Friedberg, Gießen 2006
- [57] Michaelis, P: Stoffstrommanagement und Ressourcenschutz - Herausforderungen für die Abfallwirtschaft aus Sicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen, in [3]
- [58] Stadlbauer, E. A., Richarts, F.: Benzin aus Tierfett: Verbrennungs- und motor- sowie emissionstechnische Produktprüfung. Abschlussbericht Verbundprojekt FH-Innovationsfonds 2004
- [59] Stadlbauer, E. A., u.a. (2003): Thermokatalytische Niedertemperaturkonvertierung (NTK) von tierischer und mikrobieller Biomasse unter Gewinnung von Wertstoffen & Energieträgern im Pilotmaßstab. Zwischenbericht DBU, Förderkennzeichen 18153, Gießen, November 2003

- [60] Dieckmann, H,-J.: Probenahmetechnik und Messverfahren für die Bilanzierung von Schwermetallen in steinkohlebefeuerter Kraftwerksanlagen, in: Rauchgasreinigung - Ab-scheidung von Quecksilber und sonstigen Schwermetallen, Aerosolen, Dioxinen und Furanen, Fortbildungsveranstaltung, Haus der Technik, Essen, 09.02- 10.02.2008
- [61] Vehlow, J.: Verhalten von Schwermetallen bei der Hausmüllverbrennung, in [60]
- [62] Sütterlin, H., S. Bojanowski, E. A. Stadlbauer, K. Kümmerer (2005): Fate of Selected Pharmaceuticals in the Low Temperature Conversion of Sewage Sludge. 2. Deutsch-Brasilianisches Symposium, Santa Maria, RS, Brasilien, 12. – 15. September 2005
- [63] Stadlbauer E. A., A. Fiedler, S. Bojanowski, S. Hossain, A. Frank, F. Petz (2006): Ökoeffizienzanalyse als Entscheidungskriterium bei der Klärschlamm-Entsorgung. KA – Abwasser, Abfall 2006 (53) 4, 381 - 386
- [64] Stodolka, J., Stadlbauer, E.A.;; Projektantrag EU LIFE-Environment Demonstration Pro-jects. Efficient recycling and disposal of sewage sludge with thermocatalytic low temperature conversion technique; 30. November 2005

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Katrin Gethke*, Christina Schwarz, Johannes Pinnekamp*, Frank Wolfgang Günthert****

* Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, 52056 Aachen

** Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

1 Einleitung

Phosphor zählt neben Stickstoff zu den wichtigsten Nährstoffen im Ökosystem. Allerdings ist er nur begrenzt verfügbar. Phosphor ist von essentieller Bedeutung für alle biologischen Organismen und dient beispielsweise als Bauelement von RNA- und DNA-Strukturen. In Form von Adenosintriphosphat (ATP) besitzt er eine entscheidende Rolle beim Energiestoffwechsel. Für den Menschen und alle Säugetiere ist Phosphor in Form von Hydroxiapatit beim Aufbau der Knochen und der Zähne bedeutsam. (EMSLEY, 2001) Für das Wachstum der Pflanzen ist Phosphor ein limitierender Faktor und daher ein Hauptbestandteil jedes Pflanzendüngers. In dieser Funktion kann auf den Einsatz von Phosphaten nicht verzichtet werden, da keine Substitute existieren.

Phosphorverbrauch und -ressourcen gerieten in den vergangenen fünf Jahren zunehmend in den Blickpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Die bislang bekannten und erschlossenen Phosphaterzlagerstätten sind bereits zu einem erheblichen Teil erschöpft (WAGNER, 2005). Zudem steigen bei fortschreitendem Lagerstättenabbau die Schadstoffgehalte in den abgebauten Erzen sukzessive an. Daher kann Phosphor mittlerweile als Mangelressource eingestuft werden. In den Industrienationen stagniert der Phosphorbedarf, doch in den Schwellen- und Entwicklungsländern steigt er mit der stetigen Zunahme der Bevölkerung. Vor allem China, Brasilien und Indien treten mit einer deutlich höheren Nachfrage am Weltmarkt hervor.

Weltweit benötigt den Hauptteil des produzierten Phosphors die Düngemittelindustrie. Im Wirtschaftsjahr 2003/2004 hielt die in den Vorjahren beobachtete Zunahme des weltweiten Düngemittelabsatzes an (INDUSTRIEVERBAND AGRAR, 2005).

Der Kreislaufführung des Phosphors kommt damit eine wachsende Bedeutung zu. Eine gezielte Rückgewinnung des in verschiedenen Stoffströmen enthaltenen Phosphors kann einen wichtigen Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit dieser Ressource leisten.

In Zusammenarbeit des Institutes für Wasserwesen, Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (SWA) der Universität der Bundeswehr München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert und des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp wurde eine Studie zum Thema „Untersuchung zum Einsatz von Phosphorrückgewinnungssystemen aus Abwasser, Klärschlamm bzw. Klärschlammmasche auf Bayerischen Kläranlagen“ gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen durchgeführt. Ziel dieser Studie war die Beschreibung und Gegenüberstellung der derzeit bekannten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen, sowie die Bewertung der Einsatzmöglichkeit der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung auf bayerischen Kläranlagen. Die Gegenüberstellung der Verfahren erfolgte in Form einer Matrix. Im Zuge dessen wurde auch dargestellt, welche Voraussetzungen auf bayerischen Kläranlagen für den Einsatz dieser Verfahren zur Phosphorrückgewinnung nötig sind, und das Potenzial zur Phosphorrückgewinnung in Bayern wurde erhoben.

2 Phosphorangebot und -bedarf in Deutschland

Deutschland besitzt keine Phosphaterzlagerstätten und ist auf den Import von Phosphaten angewiesen. In Deutschland werden ca. 85 % der Phosphate als Düngemittel genutzt. Bei der langzeitlichen Betrachtung des Absatzes von mineralischen Düngemitteln (Abb. 2.1) ergibt sich für die Nährstoffe Phosphat und Kali ein Absatzrückgang, jedoch für Kalk und Stickstoff eine Zunahme.

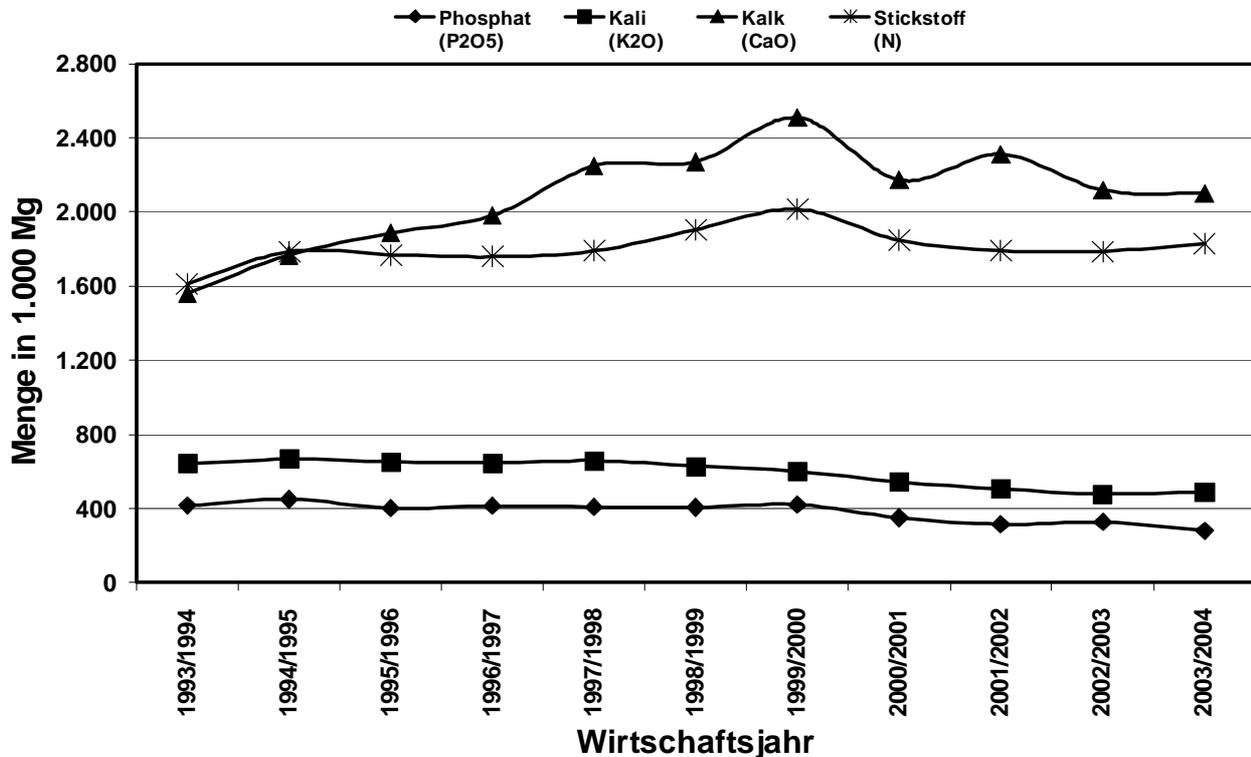


Abb. 2.1: Inlandsabsatz von mineralischen Düngemitteln in Deutschland (Daten aus (BMVEL, 2003) und (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004))

Der Inlandsabsatz an phosphathaltigen Düngemitteln betrug im Wirtschaftsjahr 1993/1994 0,18 Mio. Mg P (BMVEL, 2003) und reduzierte sich bis zum Wirtschaftsjahr 2003/2004 um 33 % auf 0,12 Mio. Mg P (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004). Dabei wurden zu ca. 90 % Mehrnährstoffdünger bestehend aus Stickstoff und/ oder Kalium sowie Phosphor gehandelt. Das Aufkommen an Phosphor aus Wirtschaftsdüngern für das Wirtschaftsjahr 2003/2004 belief sich auf 0,28 Mio. Mg P (KTBL, 2006). Diesen Phosphorquellen steht ein jährlicher Phosphorentzug durch die landwirtschaftliche Produktion von ca. 0,57 Mio. Mg P gegenüber (SCHNUG et al., 2003).

3 Potenziale zur Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung in Deutschland und Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, Prozesswässern der Schlammbehandlung und Klärschlammmasche

Die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Nutzung von Abwasser bzw. Klärschlamm als Phosphorressource betrachten hierbei die Stoffströme Abwasser, Klärschlamm, Prozesswässer der Schlammbehandlung und Klärschlammmasche. Für Deutschland errechnet sich eine Gesamtphosphatfracht im kommunalen Abwasser von 54.750 Mg P/a unter Annahme von 75 Mio. angeschlossenen Einwohnern und einer spezifischen Fracht von 2 g P/(E*d). Durch indirekt einleitende Indust-

riebetriebe gelangen etwa 18.250 Mg P/a (Annahme: 1 g P/(EGW*d) und 50 Mio. EGW) in kommunale Kläranlagen, so dass sich die Gesamtposphorfracht auf 73.000 Mg P/a erhöht (PINNEKAMP, 2003).

Je nach Verfahren der Phosphorelimination stehen im Abwasser ca. 33 % bis 67 % der Phosphorzuladung einem Recycling zur Verfügung (BUER und MONTAG, 2003). Mit dem Verfahren der Nachfällung können maximal 0,8 g P/(E*d) oder 42 % der Phosphorzuladung einem Recycling zugeführt werden (DWA AK-1.1, 2003). Dabei ist verfahrenstechnisch zu berücksichtigen, dass auf eine Metallsalzfällung bei der Abwasserbehandlung gänzlich verzichtet werden muss. Einsetzbare Fällmittel für die Phosphorrückgewinnungseinheit, die eine landwirtschaftliche Nutzung des Fällproduktes ermöglichen, sind Natriumaluminat und Magnesiumoxid (HERBST et al., 2005).

Bezogen auf eine für die Anlagentechnik zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser erforderliche Ausbaugröße von > 50.000 E ergibt sich auf Basis der Angaben des statistischen Bundesamtes eine Gesamtanschlussgröße für Deutschland von ca. 85 Mio. E und mit einer spezifischen Phosphorfracht von 1,6 g P/(E*d) die in Tabelle 3.1 aufgeführte Recyclingmenge (PINNEKAMP et al., 2004) (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2003).

Die Phosphorfracht, die durch den Aufbau von Biomasse inkorporiert wird, kann nur durch Behandlungsstufen im Schlammbereich zurückgewonnen werden. Im Klärschlamm findet sich das größte Phosphorrückgewinnungspotenzial. Zwischen 30 % und 90 % der Phosphorzuladung einer Kläranlage sind in Abhängigkeit vom behandelten Stoffstrom und Rückgewinnungsverfahren recycelbar.

Verfahren, die die Rücklösung von Phosphaten aus den Faulschlämmen ermöglichen, wiesen eine theoretische Rücklöserate von ca. 90 % der Phosphorzuladung auf (DWA AK-1.1, 2003). Wie Versuche im Labormaßstab gezeigt haben, können aber nur ca. 30 % bis 50 % des im Schlamm enthaltenen Phosphors als Sekundärrohstoff zurückgeführt werden (GETHKE et al., 2005). Zur Abschätzung der Faulschlammengen und zur Ermittlung des Phosphorrecycling-Potenzials aus Faulschlamm in Deutschland (Tab. 3.1) kann auf Basis der Angaben des statistischen Bundesamtes angenommen werden, dass jede Kläranlage mit einer Anschlussgröße von > 20.000 E eine Faulung besitzt, da die Anzahl der Faulungsanlagen um einen Faktor von > 2 über der Anzahl der Kläranlagen der Größenklasse > 20.000 E liegt (¹) (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2003).

Ein am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen entwickeltes Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung eröffnet unter Einsatz sehr geringer technischer Aufwendungen ein Rückgewinnungspotenzial von ca. 35 % bis 45 % der der Kläranlage zufließenden Phosphorfracht (PINNEKAMP et al., 2004) (PINNEKAMP et al., 2005a). Unter den zuvor genannten Annahmen zur Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm ergibt sich das in Tabelle 3.1 dargestellte Potenzial. Die hierfür erforderliche Verfahrenstechnik ist dezentral auf den Anlagen zu installieren.

Bei der Verbrennung von Klärschlamm verbleibt Phosphor vollständig als Rückstand in der Asche. Der Phosphoranteil in der Asche liegt zwischen 1,5 und 10 % Phosphor, der Median untersuchter Klärschlammaschen beträgt 6 % Phosphor (WIEBUSCH und SEYFRIED, 1998). Die Aschen von Klärschlämmen, die aus Kläranlagen mit Eisen- oder Aluminiumsalzfällung stammen, müssen zur Rücklösung der Phosphorverbindungen mit Säure behandelt werden. Dieser Prozess ist verfahrenstechnisch sehr aufwändig.

¹ ca. 3.351 Kläranlagen mit Anaerobanlagen in Deutschland und ca. 1.397 Kläranlagen > 20.000 E mit einer Gesamtanschlussgröße von ca. 61 Mio. Einwohnern (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2003)

Ein bedeutender Vorteil der Klärschlammverbrennung ist die vollständige Elimination organischer Schadstoffe, von Keimen und geruchsverursachenden Stoffen. Das in der Verbrennung entstehende Produkt ist gut transportierbar und lagerfähig.

Zu beachten ist, dass unter dem Aspekt einer späteren Phosphorrückgewinnung aus der Asche nur die Mono-Verbrennung von Klärschlamm einen technisch umsetzbaren Ansatz darstellt. Wird der Klärschlamm in bestehenden Müllverbrennungsanlagen oder Kohlekraftwerken mitverbrannt, ist der Phosphorgehalt in der Asche so niedrig, dass eine Rückgewinnung nicht durchgeführt werden kann. (BUER und MONTAG, 2001)

Bei der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche sind die größten Potenziale vorhanden. Untersuchungen am Institut WAR der Technischen Universität Darmstadt (SCHAUM und CORNEL, 2005) und am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (PINNEKAMP et al., 2005b) zeigen, dass mit hohem verfahrenstechnischen Aufwand die Phosphormengen in Klärschlammaschen aus Monoverbrennungsanlagen zurückgewonnen werden können.

Im Mittel fallen jährlich ca. 2,2 Mio. Mg TS Klärschlamm an, von denen im Jahr 2002 ca. 380.000 Mg TS in 17 kommunalen Monoverbrennungsanlagen entsorgt wurden (HANßEN, 2005). Diese Anlagen haben derzeit eine genehmigte Kapazität von ca. 550.000 Mg TS (HANßEN, 2005). Die Anlagenauslastung liegt somit bei ca. 69 %. Eine Abschätzung der recycelfähigen Phosphormengen aus Klärschlammaschen (Tab. 3.1) ergibt eine Menge von 49.000 Mg P/a (Annahmen: 85 % des Klärschlammes werden in Monoverbrennungsanlagen behandelt, Phosphorgehalt des Schlammes 6,5 %, Glührückstand der Asche 45 %, maximale Recyclingquote 90 %).

Tab. 3.1: Phosphorreyclingpotenziale in Abwasser und Klärschlamm für Deutschland

Stoffstrom	einzusetzende Verfahren	Recyclingpotenzial		Bemerkungen
		[Mg P/a]	[% P _{zu}]	
Abwasser	Nachfällung (NaAl, MgO, MgCl)	14.000	42	keine P-Elimination im vorgelagerten Prozess
Faulschlamm	Laugung + Fällung	18.000	40	derzeit nur Laborerkenntnisse; komplexe Verfahrenstechnik; keine Anforderungen an die vorgelagerte Abwasserreinigung
Prozesswässer der Schlammbehandlung	Fällung	19.000	40	Biologische P-Elimination; Metallsalzfällung nur als Sicherheitsfällung
Klärschlammasche	Laugung + Fällung	49.000	90	Anwendung für wenige zentrale große Anlagen; aufwendige Verfahrenstechnik

Derzeit stehen mehrere Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung und aus Klärschlammasche zur Verfügung, jedoch sind nur wenige bislang großtechnisch umgesetzt worden. Eine Übersicht über die Verfahren wird in Tabelle 3.2 bis Tabelle 3.4 gegeben. Die Bezeichnung „Bio-P“ in den Tabellen bedeutet, dass die Kläranlagen eine vermehrte biologische Phosphorelimination betreiben.

Tab. 3.2: Übersicht der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm		Bemerkung	Großtechnik
Seaborne-Verfahren ²	Anaerobe Schlammbehandlung, Laugung des Faulschlammes, sulfidische Schwermetallfällung, Phosphatfällung mit Magnesium	komplexe Verfahrenstechnik	Gifhorn, Niedersachsen
Phosphorrückgewinnung aus ausgefaultem Schlamm ³	Aufschluss des Schlammes mit Säure, Komplexbildung der in der Aufschlüsselung enthaltenen Kationen sowie MAP-Kristallisation	komplexe Verfahrenstechnik	-
Phosphorrückgewinnung aus ausgefaultem Schlamm der Berliner Wasserbetriebe ⁴	MAP-Fällung im Faulschlamm, Abtrennung des MAP durch Hydrozyklon	Bio-P im Hauptstrom	Waßmannsdorf, Berlin
Aqua Reci Prozess ⁵	überkritische Oxidation des Klärschlammes (60 s, > 375° C, 220 bar), Aufschluss des anorganischen Rückstands mit Lauge bei 90°C, Phosphatfällung mit Kalk, Abtrennung des Calciumphosphats	komplexe Verfahrenstechnik	-
Thermische Hydrolyse von Klärschlamm (KREPRO-Prozess) ⁶	Entwässerung des Schlammes, Aufschluss mit Säure, thermische Behandlung (45 min, 140° C, 4 bar), Fest-Flüssig-Trennung, Phosphatfällung mit Eisen in der flüssigen Phase	komplexe Verfahrenstechnik	Helsingborg, Schweden; Malmö, Schweden
CAMBI-Prozess mit basischer Phosphorextraktion ⁷	Entwässerung des Schlammes, dreistufige Hydrolyse (max. 165° C, 12 bar), Extraktion des Phosphors mit Ammoniak-Starkwasser, MAP-Fällung	komplexe Verfahrenstechnik, Bio-P im Hauptstrom	-
LOPROX-Prozess mit Phosphorrückgewinnung durch Nanofiltration ⁸	katalytischen Niederdruck-Nassoxidation des Schlammes, Fest-Flüssig-Trennung, Abtrennung des Phosphors aus der flüssigen Phase durch Nanofiltration	komplexe Verfahrenstechnik	-
Klärschlammbehandlung im Eisenbad mit Phosphorrückgewinnung ⁹	Zugabe des Schlammes zum Eisenbad, Reduzierung der Phosphorverbindungen, Bindung des gelösten Phosphors an die Schlacke durch Eintrag von Sauerstoff, Abzug der Schlacke	nur in Verbindung mit Eisen produzierender Industrie sinnvoll	-

² Vestera_{ger}, 2003; MÜLLER, 2004

³ WEIDELNER et al., 2005

⁴ HEINZMANN und ENGEL, 2005

⁵ STENDAHL und JÄFVERSTRÖM, 2002; CORNEL und SCHAUM, 2003

⁶ Hahn, 1997; KREPRO, 2002

⁷ SIEVERS et al., 2005; POLLUTION CONTROL SERVICE, 2005

⁸ BLÖCHER, 2005; BLÖCHER et al., 2005

⁹ MOCKER und FAULSTICH, 2005

Tab. 3.3: Übersicht der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung, aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung		Bemerkung	Großtechnik
Kristallisationsverfahren (Crystalactor®) ¹⁰	Wirbelschichtreaktor mit Aufwuchsmaterial für Kristalle, Phosphatfällung mit Magnesium oder Calcium; Absinken und Abtrennung der Kristalle	Bio-P im Hauptstrom	Geestmerambacht, Niederlande
PRISA-Verfahren ¹¹	erhöhte Rücklösung von Phosphatphosphor ins Überstandswasser (geänderte Betriebsweise des Voreindickers), Tuchfiltration, MAP-Fällung	Bio-P im Hauptstrom	-
Phostrip-Verfahren ¹²	Mischung Rücklaufschlamm (Teilstrom) mit vorgeklärtem Abwasser, erhöhte Rücklösung von Phosphatphosphor, Fest-Flüssig-Trennung, Phosphatfällung mit Kalkmilch aus der flüssigen Phase	Bio-P im Nebenstrom	5 Anlagen in den USA
P-RoC-Verfahren ¹³	Flotation, Kristallisationsreaktor mit tobermorit-reichem Calcium-Silikat-Hydrat als Kristallisationsmaterial für flüssige Phase, Absetzbecken zur Abtrennung des Calciumphosphats	-	-

Tab. 3.4: Übersicht der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche

Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche		Bemerkung	Großtechnik
BioCon-Verfahren ¹⁴	Aufschluss durch Säure, Einsatz mehrerer Ionentauscher, Gewinnung von Phosphorsäure	komplexe Verfahrenstechnik	-
SEPHOS-Verfahren ¹⁵	Aufschluss durch Säure, Abtrennung der flüssigen Phase, Phosphatfällung als Aluminiumphosphat durch pH-Wert-Anhebung, Abtrennung des Aluminiumphosphats und Aufschluss mit Lauge, Fest-Flüssig-Trennung, Phosphatfällung durch Calcium; Abtrennung des Calciumphosphats	komplexe Verfahrenstechnik	-
RüPA-Verfahren ¹⁶	Aufschluss durch Säure, Fest-Flüssig-Trennung, Einsatz von Ionentauschern und Flüssig-Flüssig-Extraktion zur Schwermetallentfernung, Phosphatfällung als Aluminiumphosphat durch pH-Wert-Anhebung, Abtrennung des Aluminiumphosphats	komplexe Verfahrenstechnik	-

¹⁰ GIESEN, 2005; GIESEN et al., 2005¹¹ PINNEKAMP et al., 2006¹² BARTL und ELSTER, 1992; FOCON®, 1991¹³ BERG, 2005¹⁴ CORNEL, 2002; DWA-ARBEITSGRUPPE AK-1.1, 2003¹⁵ Cornel und Schaum, 2005¹⁶ PINNEKAMP et al., 2006

4 Stand der Abwasserreinigung in Bayern und Möglichkeiten des Einsatzes von Phosphorrückgewinnungsverfahren auf bayerischen Kläranlagen

Im Jahr 2004 waren in Bayern laut Bayerischem Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung von den 12,44 Mio. Einwohnern des Landes 95,5 % an die öffentliche Kanalisation angeschlossen und 2.860 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von 27,1 Mio. Einwohnerwerten in Betrieb. Neben den kommunalen Kläranlagen werden noch ca. 150.000 private Kleinkläranlagen betrieben. Kennzeichnend für die bayerische Abwasserentsorgung ist, dass sehr viele kleine Kläranlagen (1.421 Anlagen mit einer Ausbaugröße < 1.000 E) und nur wenige große Anlagen (36 Anlagen mit einer Ausbaugröße > 100.000 E) existieren (Abb. 4.1). (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005)

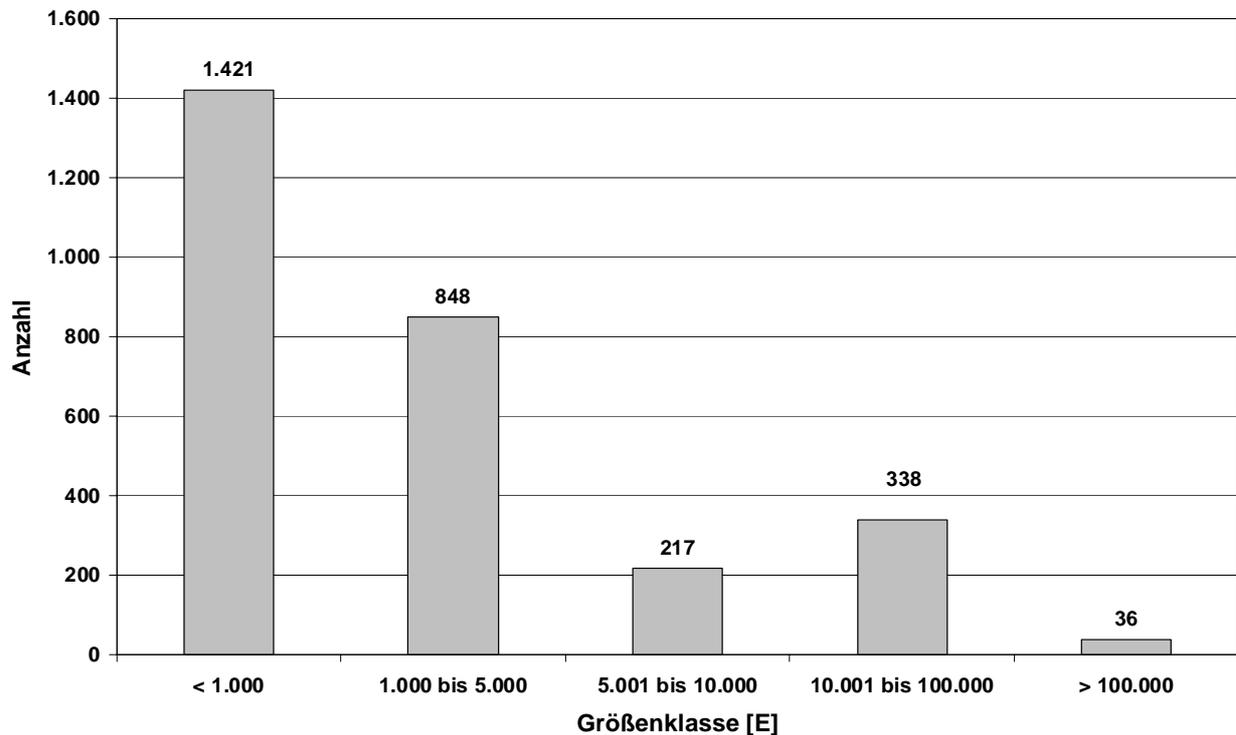


Abb. 4.1: Anzahl der bayerischen Kläranlagen sortiert nach Größenklassen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005)

Bezogen auf die Gesamtausbaugröße aller bayerischen Kläranlagen haben die 1.421 kleinen Anlagen (Ausbaugröße < 1.000 E) mit weniger als 2 % nur einen geringen Anteil, jedoch die 36 großen Anlagen (Ausbaugröße > 100.000 E) mit fast 84 % einen großen Anteil (Abb. 4.2) (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005).

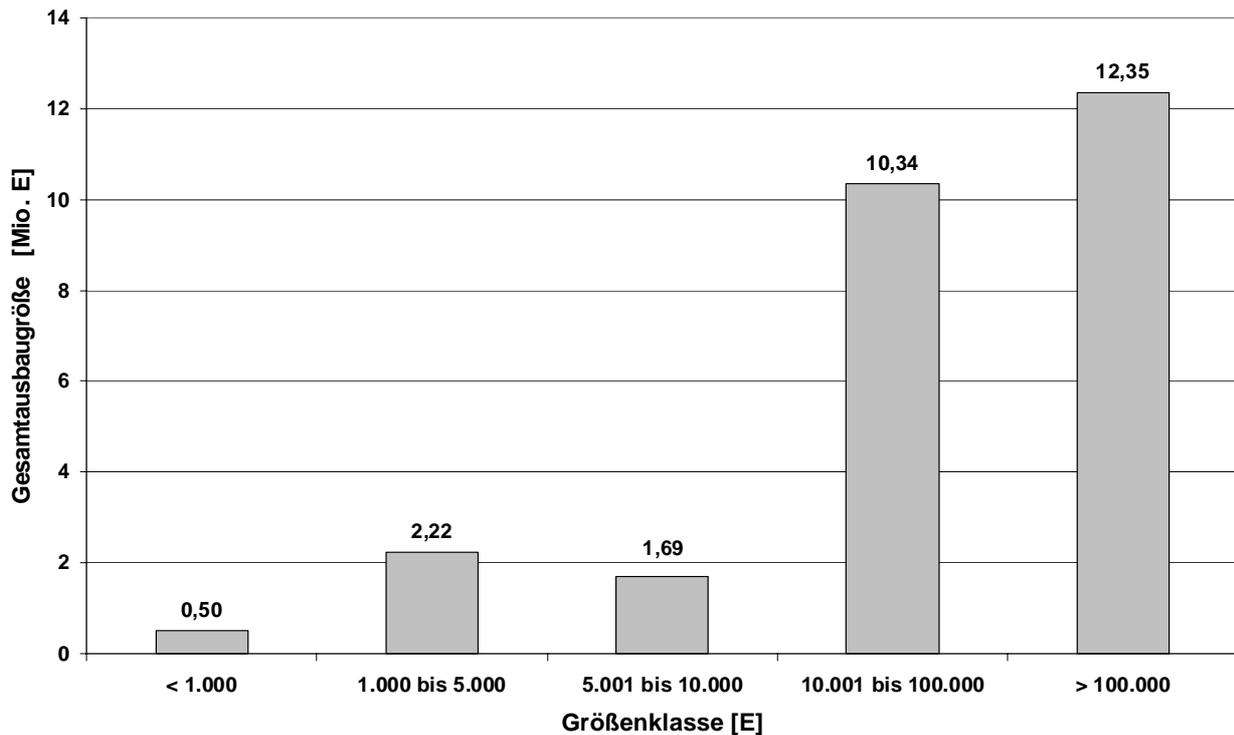


Abb. 4.2: Gesamtausbaugröße der bayerischen Kläranlagen sortiert nach Größenklassen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005)

Bezogen auf die Ausbaugröße wird das Abwasser zu 98 % in biologisch arbeitenden Anlagen mit mindestens Kohlenstoffelimination gereinigt. Hierbei nehmen die Abwasserteichanlagen eine besondere Stellung ein, da sie ca. die Hälfte aller bayerischen Kläranlagen stellen, insbesondere bei Anlagen bis 5.000 E (Tab. 4.1) (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005).

Tab. 4.1: Anzahl und Gesamtausbaugröße der einzelnen Anlagensysteme (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005)

Anlagenbezeichnung	Anlagenanzahl in der jeweiligen Größenklasse					GESAMT
	< 1.000 E	1.000 bis 5.000 E	5.001 bis 10.000 E	10.001 bis 100.000 E	> 100.000 E	
Abwasserteichanlage (nach Stand der Technik)	952	319	6	3	-	1.280
Pflanzenkläranlage	37	-	-	-	-	37
Belebungsanlage mit getrennter Schlammstabilisation	62	30	33	174	20	319
Belebungsanlage mit gemeinsamer Schlammstabilisation	88	302	130	99	-	619
biologische Kläranlage im Parallelbetrieb	4	3	4	8	1	20
mehrstufige biologische Kläranlage	2	6	2	27	15	52
Rotationstauchkörperanlage	121	35	1	1	-	158
Tropfkörperanlage	46	146	41	26	-	259
mechanische Reinigungsanlage/ Behelfsanlage	2	1	-	-	-	3
Abwasserteichanlage (Behelfsanlage)	107	6	-	-	-	113
GESAMT	1.421	848	217	338	36	2.860

Eine Phosphorrückgewinnung ist erst ab einer Kläranlagengröße mit einer Ausbaugröße von > 10.000 E ökonomisch sinnvoll. Des Weiteren kann bei Kläranlagen, die als Abwasserteichanlage oder als Pflanzenkläranlage konzipiert sind, derzeit keine Phosphorrückgewinnung durchgeführt werden. Somit verbleiben in Bayern 371 Anlagen mit einer Gesamtausbaugröße von ca. 22,6 Mio. E für eine mögliche Phosphorrückgewinnung (Daten aus: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005). Somit steht für eine Phosphorrückgewinnung pro Jahr eine theoretisch rückgewinnbare Menge von ca. 14.800 Mg P zur Verfügung bei einer gemäß A 131 (2000) einwohner-spezifischen Phosphorfracht im Kläranlagenzulauf von 1,8 g P/(E*d).

Auf den bayerischen Kläranlagen fallen im Jahr ca. 6 Mio. m³ Klärschlamm (mittlerer Trockenrückstandsgehalt von 5 % TS) bzw. 297.000 Mg TS Klärschlamm an (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005). Für die Klärschlamm Entsorgung bzw. -verwertung bieten sich drei Hauptpfade an: die landwirtschaftliche Verwertung, die Deponierung und die thermische Verwertung (Verbrennung). Weitere Verwertungspfade finden z. B. der Einsatz des Schlammes bei Rekultivierungsmaßnahmen oder im Straßenbau. In Abbildung 4.3 wird die prozentuale Verteilung auf die genannten drei Hauptentsorgungs- bzw. -verwertungspfade dargestellt.

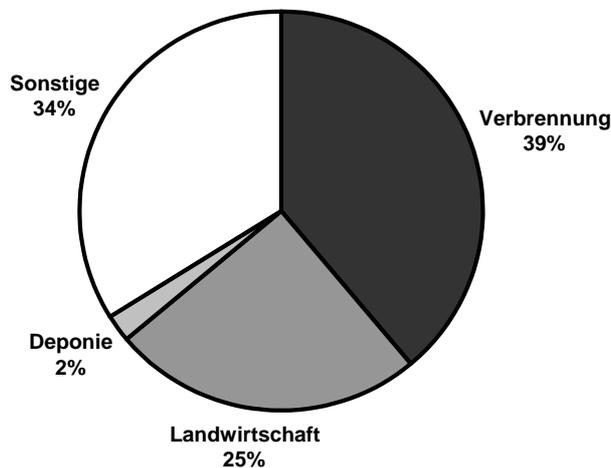


Abb. 4.3: Hauptentsorgungs- bzw. -verwertungspfade des bayerischen Klärschlammes (prozentuale Verteilung) (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2005)

Die thermische Verwertung hat mit 39 % den größten Anteil, gefolgt von der landwirtschaftlichen Verwertung mit 25 %. Der Entsorgungspfad Deponierung hat in Bayern mit 2 % so gut wie keine Bedeutung mehr.

Wird eine Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammaschen angestrebt, so ist eine Monoverbrennung Voraussetzung. In Bayern gibt es zwei Monoverbrennungsanlagen (UBA, 2004):

- München, Klärwerk Gut Großlappen (Jahresdurchsatz 22.100 Mg TS)
- Neu-Ulm, Klärwerk Steinhäule (Jahresdurchsatz 10.000 Mg TS)

Bei einem Gesamtjahresdurchsatz von 32.100 Mg TS können somit nur ca. 11 % des Gesamtschlammfalls in Monoverbrennungsanlagen verwertet werden.

Betrachtet man die in Bayern eingesetzten Verfahrenstechniken zur Abwasserreinigung, so ergeben sich unter dem Aspekt der Anwendbarkeit und einfachen Integration eines Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung unterschiedliche Möglichkeiten.

Setzt eine Kläranlage das Verfahren der vermehrten biologischen Phosphorelimination ein oder besitzt Becken für den Einsatz dieser Phosphorelimination, so bieten sich alle Phosphorrückgewinnungsverfahren für die Prozesswässer der Schlammbehandlung wie z. B. das Phostrip-Verfahren an, für die dieses Eliminationsverfahren Voraussetzung ist. Vorteil dieser Verfahren ist, dass diese ohne großen Aufwand in den bestehenden Reinigungsprozess integrierbar sind. Nachteil ist, dass nur ca. 40 % des im Zulauf enthaltenen Phosphors zurückgewonnen werden können (PINNEKAMP et al.; 2006). Als Alternative bietet sich bei solchen Anlagen an, den Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen zu verwerten. Bei einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche kann dann der Aufschluss der Asche mit Säure durch einen Aufschluss mit heißem Wasser oder Wasserdampf ersetzt werden, was zu einer erheblichen Erleichterung des Verfahrens führt. Die Rückgewinnungsrate bei einer Rückgewinnung aus Asche liegt bei ca. 90 % des Zulaufs (PINNEKAMP et al.; 2006).

Im Rahmen des Projekts „Untersuchung zum Einsatz von Phosphorrückgewinnungssystemen aus Abwasser, Klärschlamm bzw. Klärschlamm-Asche auf Bayerischen Kläranlagen“ (Zitat Bericht) wurden beispielhaft für die Kläranlage Geiselbullach des Amperverbands (Ausbaugröße von 250.000 E) und die Kläranlage Ammersee Ost des Landkreises Starnberg (Ausbaugröße von 90.000 E) mögliche Verfahrenskonzepte zur Rückgewinnung von Phosphor entwickelt. Diese Kläranlagen bieten sich an, da sie vermehrte biologische Phosphorelimination betreiben. Für beide Kläranlagen wurde unter anderem ein zentrales Monoverbrennungskonzept mit anschließender Rückgewinnung aus der Klärschlamm-Asche vorgeschlagen.

Betreibt eine Kläranlage eine chemische Fällung zur Phosphorelimination, so bietet sich eine Umstellung auf das Verfahren der vermehrten biologischen Phosphorelimination an. Die Rückgewinnungsverfahren sind dann analog.

5 Zusammenfassung

Im Jahr 2003/2004 betrug der Einsatz von Rohphosphaten in der Düngemittelindustrie ca. 122.000 Mg P in Deutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004). Der Phosphorbedarf stagniert in den Industrienationen, doch in den Schwellen- und Entwicklungsländern steigt er mit der stetigen Zunahme der Bevölkerung bzw. mit dem enormen wirtschaftlichen Wachstum. Wegen der befürchteten Ressourcenverknappung kommt der Kreislaufführung von Phosphor eine wachsende Bedeutung zu.

Bei der Abwasserreinigung unterscheidet man vier Einsatzstellen zur Phosphorrückgewinnung: aus dem Abwasser, aus dem Klärschlamm, aus den Prozesswässern der Schlammbehandlung und aus Klärschlamm-Asche (Monoverbrennung). Die Techniken zur Phosphorrückgewinnung befinden sich zum größten Teil noch im Entwicklungsstadium. Daher liegen bislang keine belastbaren Kostenansätze für die großtechnische Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung vor. Auf Basis heutiger Erkenntnisse liegen die Kosten des Phosphorrecyclings noch über den derzeitigen Weltmarktpreisen für Rohphosphat.

In Bayern gibt es derzeit 2.860 kommunale Kläranlagen, von denen jedoch aufgrund der Ausbaugröße und des Abwasserreinigungssystems nur 371 Anlagen für die Integration eines Phosphorrückgewinnungsverfahrens in Frage kommen.

Um ein Rückgewinnungsverfahren ohne großen Aufwand in die bestehende Technik der Kläranlage integrieren zu können, wird eine Umstellung des Abwasserreinigungsprozesses auf eine rein vermehrte biologische Phosphorelimination empfohlen. Wird die Rückgewinnung aus der Klär-

schlammmasche angestrebt, so muss der Klärschlamm in einer Monoverbrennung verwertet werden. Derzeit existieren in Bayern nur zwei Monoverbrennungsanlagen, deren Jahresdurchsatz nur für ca. 11 % des in Bayern insgesamt anfallenden Klärschlammes ausreicht.

6 Literaturverzeichnis

A 131 (ATV-DVWK Arbeitsblatt-A-131), 2000: *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Mai 2000.

BARTL, J., ELSTER, B. (1992): *Phostrip-Verfahren zur Phosphatelimination in Darmstadt-Eberstadt*. awt – Abwassertechnik, Heft 1/ 1992.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2005): *Gewässerschutz in Bayern – Abwasseranlagen (Lagebericht 2004)*. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Oktober 2005

BERG, U. (2005): *P-ROC – Ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwässern durch Abscheidung von Calciumphosphat-Mineralphasen an Tobermorit*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.

BLÖCHER, C.; CHEN NING KOH, MEIER, J.; MELIN, T. (2005): *Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm über Nassoxydation und Nanofiltration*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.

BLÖCHER, C. (2005): *Niederdruck-Nassoxydation zur Klärschlammbehandlung*. URL: www.wasser.nrw.de/fileadmin/Dateien/Veranstaltungen/Rueckblick/2005/20050315/4-KF_Blicher_BTS_Vortrag_150305.pdf (Zugriff 22.05.2006)

BMVEL Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2003): *Statistisches Jahrbuch 2003*

BUER, T.; MONTAG, D. (2003): *Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung im Abwasserbereich*. ISA der RWTH Aachen; veröffentlicht: Tagungsband zum Symposium am 06.02-07.02.2003 in Berlin „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“ Berlin 2003.

BUER, T.; MONTAG, D. (2001): *Gewinnung von Phosphat und anderen Nährstoffen aus Klärschlamm: Techniken und Wirtschaftlichkeit*. In: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes. KTBL-Schrift 404. Darmstadt 2002.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. (2005): *Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm*. In: Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm und Reduzierung der Rückbelastung - Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 184. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005. München: Oldenbrough Industrieverlag GmbH

CORNEL, P.; SCHAUM, C. (2003): *Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm und Klärschlammmasche*. In: Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Tagungsband. Symposium vom 6. – 7.2.2003 in Berlin.

DWA-ARBEITSGRUPPE AK-1.1: *Phosphorrückgewinnung*. KA – Abwasser, Abfall 2003 (50) Nr. 6

EMSLEY, J. (2001): *Phosphor - ein Element auf Leben und Tod*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2001

FOCONÒ -Ingenieurgesellschaft für Umwelttechnologie- und Forschungskonsulting mbH- , (1991): *Neue Technologien der Phosphatentfernung aus Abwässern*. Aachen

GETHKE, K; HERBST, H.; MONTAG, D. KÖSTER, J. (2005): *Abwasserbehandlung – Phosphorressource von Morgen?* Workshop der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.1 „Phosphorrückgewinnung“ am 28.10.2004 in Weimar; erschienen in : KA Abwasser, Abfall 2005(52) Nr. 5, S.500 – 505

- GIESEN, A. (2005): *Crystallisation Process Enables Environmental Friendly Phosphate Removal at Low Costs*. URL: www.nhm.ac.uk (Zugriff 28.7.05).
- GIESEN, A.; DE BOER, R.; GAILLARD, A. (2005): *Practical experience with recovery of phosphates from wastewater using crystallisation technology*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.
- HAHN, H. H. (1997): *Klärschlammverwertung - Gestern, Heute und Morgen*. In: Neue Trends bei der Behandlung und Entsorgung kommunaler und industrieller Klärschlämme, Schriftenreihe WAR Bd. 101, S. 31-54, ISBN 3 - 923419 - 96 – 1. Darmstadt.
- HANßEN, H (2005): *Techniken und Perspektiven der (Mit-)Verbrennung von Klärschlamm*; Vortrag auf den DWA-Klärschlammtagen, 04.-06. April 2005 in Würzburg
- HEINZMANN, B.; ENGEL, G. (2005): *Stand der Phosphorrückgewinnung bei Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination der Berliner Wasserbetrieb*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.
- HERBST, H.; MONTAG, D.; PINNEKAMP, J. (2005): *Möglichkeiten der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm*. 17. Kolloquium zur Abwasserwirtschaft am 08.09.2005, TU Hamburg-Harburg
- INDUSTRIEVERBAND AGRAR e.V. (2005): *Jahresbericht 2004/2005*
- KREPRO (2002): KEMIRA KEMWATER „KREPRO Kemwater recycling process“. Firmenprospekt.
- KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2006): Mündliche Mitteilung im April 2006
- MOCKER, M.; FAULSTICH, M. (2005): *P-Dünger aus Klärschlamm, Schlammaschen und Tiermehl durch Behandlung im Eisenbad*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.
- MÜLLER, J. (2004): *Anpassung der Seaborne Verfahrenstechnik an die Bedingungen einer kommunalen Kläranlage*. Workshop im Rahmen des DWA AK 1.1 „Phosphor-Rückgewinnung“. Weimar, 28. Oktober 2004.
- PINNEKAMP, J.; GETHKE, K; GOEBEL, S.; HERBST, H.; MONTAG, D. (2006): *Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers „Magnesiumammoniumphosphat – MAP“ aus Abwasser und Klärschlamm*. Ergebnisse aus dem UFO-Plan-Projekt gefördert durch das Umweltbundesamt, FKZ 202 33 308, unveröffentlicht
- PINNEKAMP, J.; GETHKE, K.; MONTAG, D. (2005a): *Stand der Phosphorrückgewinnung*. In: Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 198, 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 9.3.-11.3.2005 in Aachen, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Aachen 2005.
- PINNEKAMP, J.; GETHKE, K; HERBST, H.; MONTAG, D. (2005b): *Phosphorrecycling – Rückgewinnung von industriell bzw. landwirtschaftlich verwertbaren Phosphorverbindungen aus Abwasser und Klärschlamm*. Ergebnisse aus dem FuE-Projekt gefördert durch das MUNLV NRW, AZ IV-9-042 423, unveröffentlicht
- PINNEKAMP, J.; HERBST, H.; GEHTKE, K.; MONTAG, D. (2004): *Potentiale zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm in NRW*. Studie zum Abschlussbericht „Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Machbarkeit in NRW und Untersuchungen zu zentralen und dezentralen Verfahren“ für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen.
- PINNEKAMP, J. (2003): *Phosphor und Siedlungswasserwirtschaft*. In: Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Band 190, 36. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 2003 in Aachen, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Dohmann, Aachen 2003

- POLLUTION CONTROL SERVICE (2005): *Hydrolyse von organischen Schlämmen – Technologie zur Umsetzung der anaeroben Umsetzung nach dem CAMBI-Verfahren*. Firmenprospekt
- SCHAUM, C.; CORNEL, P. (2005): *Möglichkeiten und Grenzen einer Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammasche – Untersuchungen aus Deutschland*. In: Schriftenreihe WAR, Band 167, 75. Darmstädter Seminar im Dezember 2005 in Darmstadt, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Darmstadt, 2005
- SCHNUG, E.; ROGASIK, J.; HANEKLAUS, S. (2003): *Quantitative und qualitative Anforderungen der deutschen Landwirtschaft and Phosphor für die Düngung*. Tagungsband zum Symposium am 06.02-07.02.2003 in Berlin „Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall“ Berlin 2003.
- SIEVERS, M.; BORMANN, H.; EWERT, W. (2005): *Klärschlammhydrolyse (CAMBI) mit anschließender Stickstoffstrippung und basischer Phosphorextraktion*. In: Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm – Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2003): *Umwelt, Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung (Stand 2001)*. In: Fachserie 19, Reihe 2.1; Wiesbaden 2003
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2004): *Absatz von Phosphatdüngern stark rückläufig*. Pressemitteilung vom 14. Oktober 2004
- STENDAHL, K.; JÄFVERSTRÖM, S. (2002): *Phosphate recovery from sewage sludge in combination with supercritical water oxidation proceedings*. International conference „From Nutrient removal to recovery“. Amsterdam, 2.-4. Oktober 2002.
- UBA Umweltbundesamt (2004): *Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Umweltbundesamt, 3. überarbeitete Auflage, Berlin, August 2004
- VESTERAGER, N. O. (2003): *Erfahrungen zur Phosphorrückgewinnung mit dem Seaborne-Verfahren*. In: Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall. Tagungsband. Symposium vom 6. – 7.2.2003 in Berlin.
- WAGNER, M (2005): *Rohphosphat – Verfügbarkeit und Verbrauch*. 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 2005 in Aachen, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Nr. 198, Aachen 2005
- WEIDELNER, A.; BRECHTEL, K.; MAIER, W.; KRAMPE, J.; ROTT, U. (2005): *Phosphor-Rückgewinnung als MAP mittels saurer Rücklösung aus Faulschlämmen*. In: Rückgewinnung von Nährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm und Reduzierung der Rückbelastung. Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 184. 80. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium 13.10.2005. München: Oldenbourngh Industrieverlag GmbH
- WIEBUSCH, B.; SEYFRIED, C.F. (1998): *Klärschlammaschen als Produkt der Abwasserreinigung*. BMBF Statusseminar 1998 „Stoffliche Verwertung von Klärschlammaschen und Aschen aus der Klärschlammverbrennung als Baustoff“; Veröffentlichung ISAH, Heft 107, Hannover

Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Technik der Zukunft?

Dr. Doris Schieder, Dr.-Ing. Wolfgang Mayer, Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe, TU München, Straubing

Brennstoffzellen auf Kläranlagen

▷ *Inhaltsübersicht*



Brennstoffzellen – Stand der Technik



Projektbeispiele Kläranlage



Wirtschaftlichkeit



Perspektiven

Brennstoffzellen - Stand der Technik



► Brennstoffzellen auf Kläranlagen

Phosphorsaure Brennstoffzellensysteme PAFC

Vorteile

- Optimales Temperaturniveau des Abwärmestroms
- CO₂-Entfernung nicht notwendig

Nachteile

- Geringer Wirkungsgrad
- Ungünstiges Temperaturniveau bei Reformierung über 200 °C

Schmelzkarbonat-Brennstoffzellensysteme MCFC

Vorteile

- Hoher Wirkungsgrad bis zu 55 %
- Interne Reformierung möglich
- CO und CO₂-tolerant

Nachteile

- Ungünstiges Temperaturniveau des Abwärmestroms

Festoxid-Brennstoffzellensysteme SOFC

Vorteile

- Hoher Wirkungsgrad bis zu 50 %
- Internes Reformierung möglich
- CO und CO₂-tolerant

Nachteile

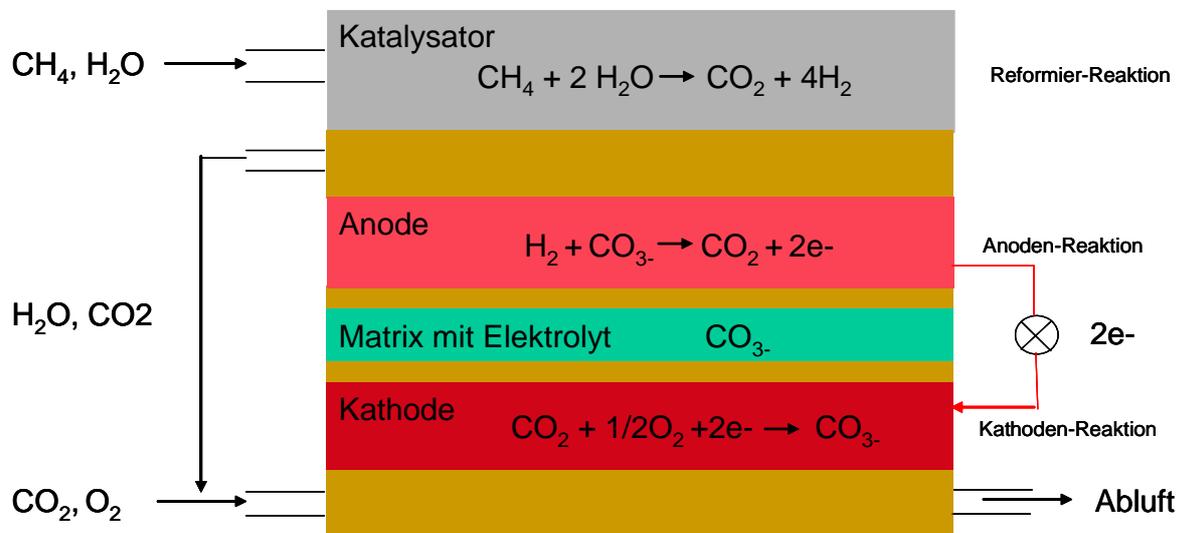
- Ungünstiges Temperaturniveau des Abwärmestroms

Brennstoffzellen - Stand der Technik



► Prinzip

Prinzip der MoltenCarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)

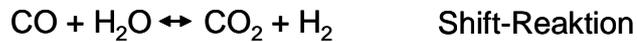


Brennstoffzellen - Stand der Technik



▷ MethanReformierung

Reaktionen



Externe Reformierung

- Räumliche und energetische Trennung der Reformierungs- und Brennstoffzellenreaktion
- Nutzung von Wasserstoffquellen mit Brennstoffzellenschädlichen Verunreinigungen möglich
- Nachteil: hoher apparativer Aufwand, geringere Effektivität, höhere Kosten

Interne Reformierung

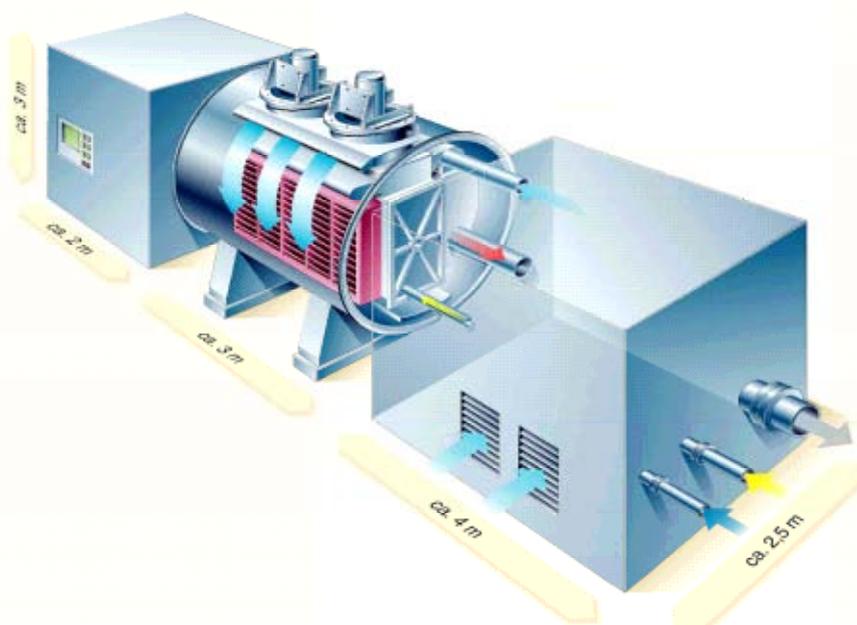
- Räumliche und energetische Kopplung der Reformierungs- und Brennstoffzellenreaktion
- Vorteil: höherer el. Wirkungsgrad (bis zu 5 %), geringere Kosten
- Stand der Technik bei MCFC und SOFC

Brennstoffzellen - Stand der Technik



▷ Beispiel MCFC - Brennstoffzellensystem

HOT Modul der MTU Friedrichshafen



Quelle: MTU Friedrichshafen GmbH

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Aktuelle Brennstoffzellen auf Kläranlagen



Standort	Klärwerk Köln-Rodenkirchen	Klärwerk Wuppertal-Kohlfurt	Klärwerk Ahlen
Brennstoffzellentyp	PAFC Typ PC25C(OSNI Corporation)	MCFC	MCFC
Leistung	200 kWel	1 kWel	225 kWel
Betreiber	GEW Köln AG	Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT	Stadt Ahlen
Ansprechpartner	Thomas Saure (GEW)	Dr.-Ing Ralf Hiller (UMSICHT)	Bernd Döding (Klärwerk Ahlen)
Projektbeginn	2000	2003	2004/2005
Beteiligte Firmen	ONSI Corporation, USA SILOXA Engineering AG T.B.E Technische Beratung Energie		RWE Fuel Cells GmbH MTU CFC Solutions GmbH Festo AG &Co.
Bisherige Laufzeit in h	30.000		

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Klärwerk Köln-Rodenkirchen



Brennstoffzellenanlage PC25C der RheinEnergie



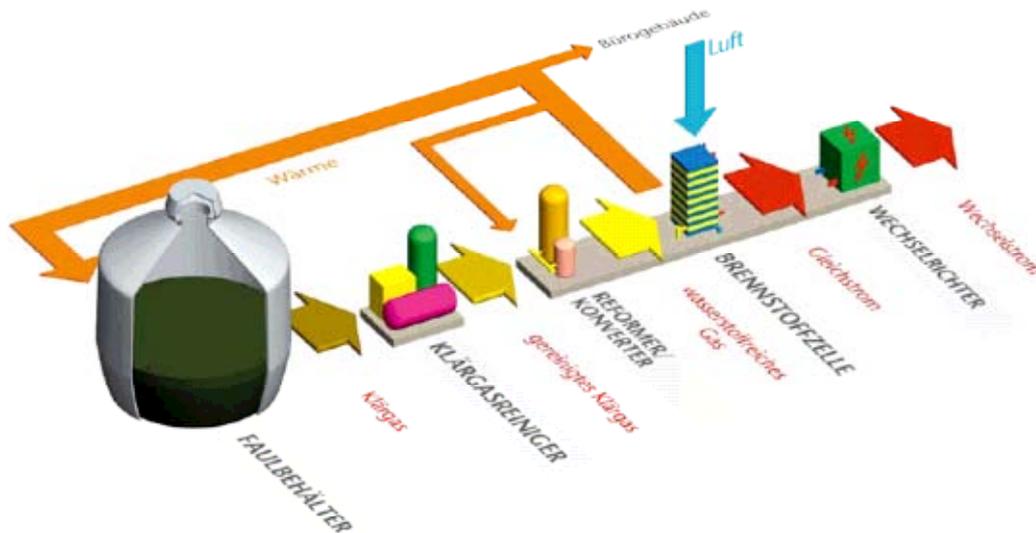
Quelle: Thomas Saure, RheinEnergie (2005)

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Klärwerk Köln-Rodenkirchen



Schema der Gesamtanlage



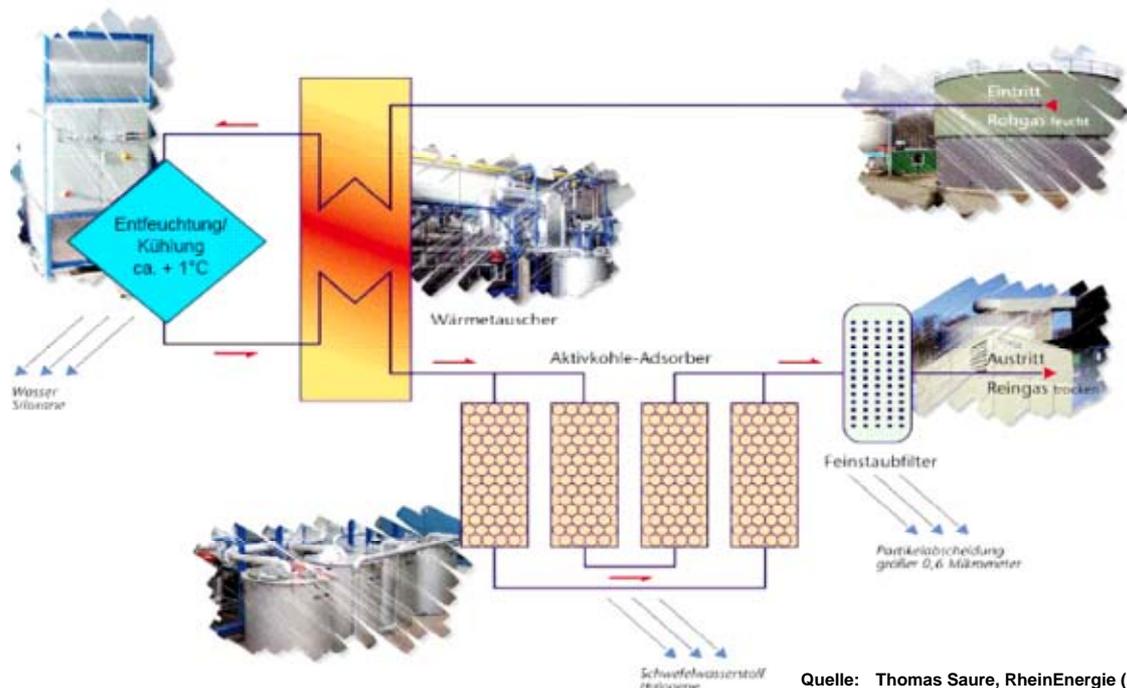
Quelle: Thomas Saure, RheinEnergie (2005)

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Klärwerk Köln-Rodenkirchen



Schema der Klärgasreinigungsanlage



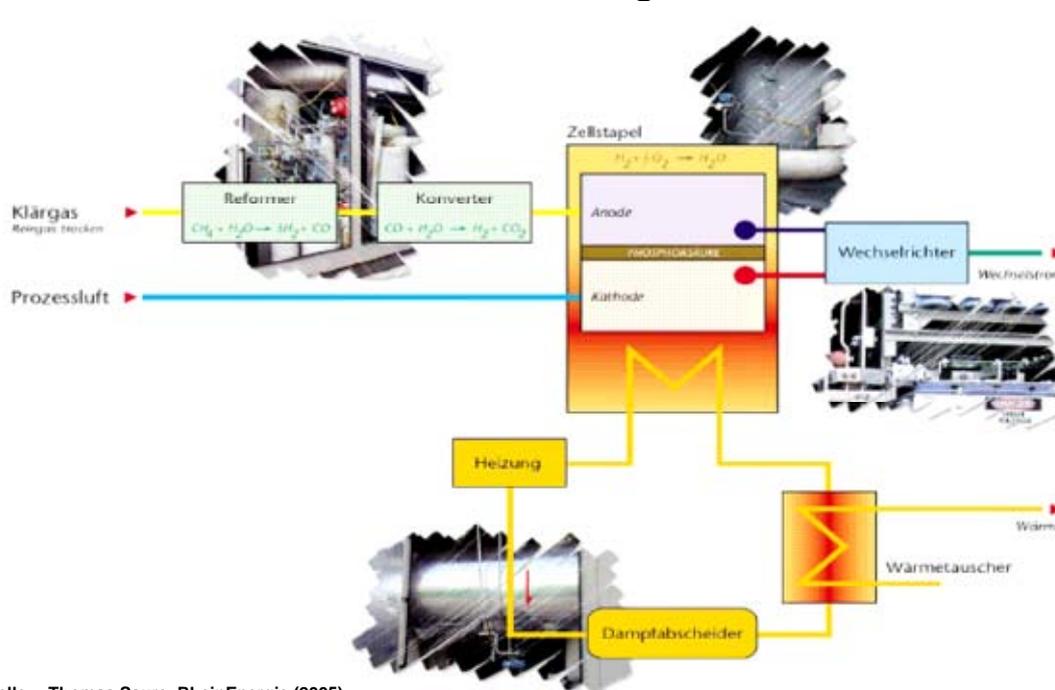
Quelle: Thomas Saure, RheinEnergie (2005)

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Klärwerk Köln-Rodenkirchen



Schema der Brennstoffzellenanlage



Quelle: Thomas Saure, RheinEnergie (2005)

Projektbeispiele Kläranlage

▷ Klärwerk Köln-Rodenkirchen



Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Anlage

- Investitionskosten rd. 1.200.000 €
- Förderung des Landes NRW rd. 50.000 €
- Förderung des DOE rd. 200.000 €

Kosten

- resultierende Annuität (6 Jahre) rd. 225.000 €/a
- Wartungs- und Betriebskosten rd. 35.000 €/a

Erlöse

- mittlere jährliche Einspeisevergütung rd. 65.000 €/a

Verluste

rd. 195.000 €/a

Quelle: Thomas Saure, RheinEnergie (2005)

Wirtschaftlichkeit

▷ Vergleich Brennstoffzelle und BHKW



BHKW

- Reduzierung der Vollkosten bei steigender Anlagengröße bei Vollast
- Anstieg der Vollkosten bis zu 20 % bei Teillast
- Investitionskosten von 500 bis 2.000 EUR/kW el in Abhängigkeit der Anlagengröße
- Investitionskosten von ca. 1.000 EUR/kW el in bei einer Anlagengröße von 250 kW
- Betriebskosten von ca. 1,5 bis 2,5 ct /kWh el

MCFC und SOFC Brennstoffzellensysteme

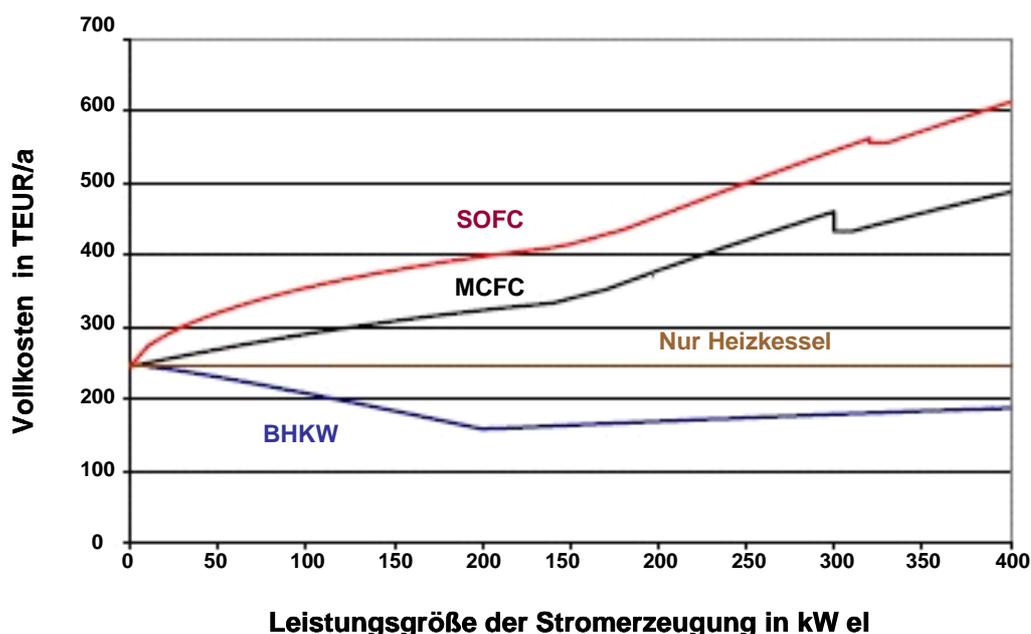
- Anstieg der Vollkosten mit steigender Anlagengröße
- Mit steigender Anlagengröße verringert sich die Vollkostensteigerung durch Reduzierung der Stackwechsel
- Investitionskosten von 6.000 bis 50.000 EUR/kW el in Abhängigkeit von der Anlagengröße
- Investitionskosten von ca. 8.000 EUR/kW el bei einer Anlagengröße von 250 kW
- Betriebskosten von ca. 30 bis 40 ct /kWh el

Wirtschaftlichkeit

▷ Vollkostenvergleich



Vollkostenvergleich verschiedener Systeme



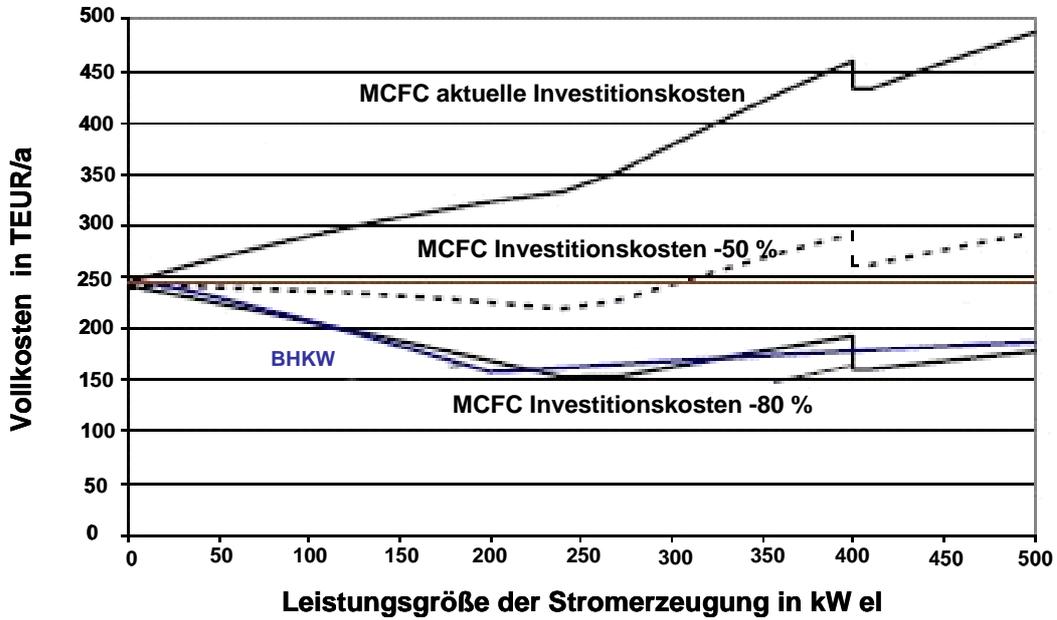
Quelle: Schlussbericht „Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen (2004)“

Wirtschaftlichkeit

▷ Vollkostenvergleich



Vollkostenvergleich bei aktuellen und variierten Investitionskosten für MCFC



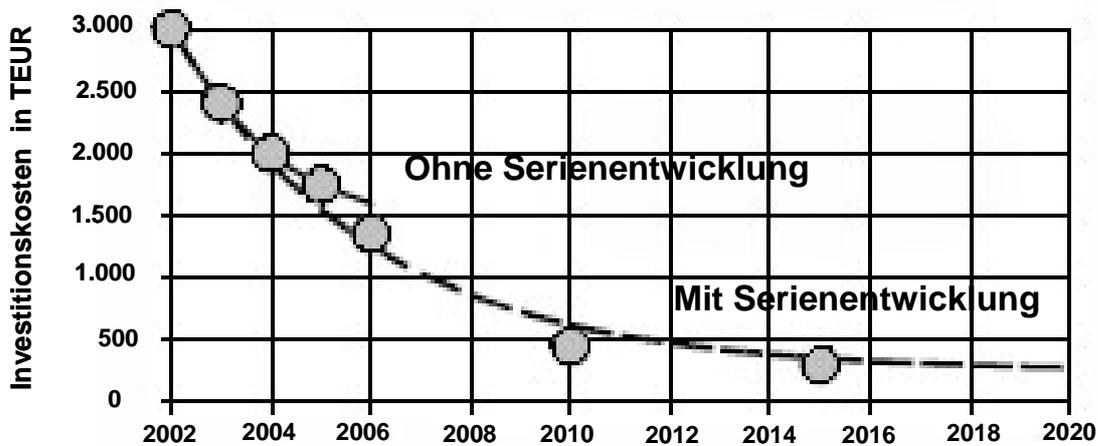
Quelle: Schlussbericht „Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen (2004)“

Wirtschaftlichkeit

▷ Perspektive MCFC



Investitionskostenentwicklung HOTModul MCFC 250 kW



Quelle: MTU Friedrichshafen GmbH aus: „Brennstoffzellen in der stationären Energieversorgung“ (2004)

Perspektiven

▷ **Fazit**



Aktuelle Situation

- BHKW derzeit noch die wirtschaftlichere Lösung
- ökonomischer Vorteil der Brennstoffzellensysteme bei Kostenreduzierung von 80 % zu erwarten
- Problem: Investitionskosten
- Hersteller: Zeitspanne von fünf bis zehn Jahren erforderlich

F&E - Bedarf

- Technologie Brennstoffzellen, v. a. technische Vereinfachung
- Technologie der Gasaufbereitung
- Neue effiziente Energiekonzepte für Kläranlagen

Perspektiven

▷ **Geplantes Vorhaben**



Konzeptstudie – Wasserstoffproduktion auf Kläranlagen

- **Integration einer Wasserstoffinfrastruktur auf Kläranlagen**
- **Klärschlammaufbereitung – Steigerung der Klärgasausbeuten**
- **Mitverwertung biogener Reststoffe**
- **Wasserstofferzeugung aus Klärgas bzw. durch Elektrolyse**
- **Integration von Brennstoffzellen**



SIEMENS



Literatur

Saure, T.: Betriebserfahrungen mit der klärgasbetriebenen Brennstoffzelle Köln-Rodenkirchen, BioBZ-Workshop, Potsdam 2005 -Originalbeitrag

Umweltbundesamt (Hrsg.): Brennstoffzellen in der stationären Energieversorgung, Dessau, 2005

Keicher, K.; Krampe, J.; Rott, U.: Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg, BWPLUS-Bericht BWI 22006, 2004, http://bwplus.fzk.de/inhalt_berichte_bwplusreihe.html

Trogisch, S., Baaske, W. E. (Hrsg.): Biogas Powered Fuel Cells - Case Studies and their Implementation, Trauner Verlag, Linz 2004, ISBN 3-85487-626-2

Pehnt, M., Traube, K.: Zwischen Euphorie und Ernüchterung - Stand und mittelfristige Perspektiven stationärer Brennstoffzellen, Publikation des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin 2004

Links

www.initiative-brennstoffzelle.de

www.forum-brennstoffzelle.de

www.bhkw-form.de

**Wissenschaftszentrum Straubing
Technische Universität München
Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe
Petersgasse 18
94315 Straubing
d.schieder@wz-straubing.de
www.wz-straubing.de**

Tagungsleitung / Referenten

Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle
Präsident
Bayer. Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 – 50 01
Fax: (0821) 90 71 – 50 09
E-Mail: albert.göttle@lfu.bayern.de

Christian Daehn
Bayer. Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 – 53 21
Fax: (0821) 90 71 – 55 53
E-Mail: christian.daehn@lfu.bayern.de

Rudolf Müller
Bayer. Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 – 53 52
Fax: (0821) 90 71 – 55 53
E-Mail: rudolf.mueller@lfu.bayern.de

Johann Buchmeier
Sachgebietsleiter Entwässerungsbetrieb
Imhoffstr. 97
94315 Straubing

Tel.: (09421) 7 02 03 – 0
Fax: (09421) 7 02 03 – 17
E-Mail: hans.buchmeier@straubing.de

Dipl.-Ing. Christian Burgbacher
Fa. Kopf AG Umwelt- und Energietechnik
Stützenstr. 6
72172 Sulz-Bergfelden

Tel.: (07454) 75 – 0
Fax: (07454) 75 – 1 59
E-Mail: c.burgbacher@kopf-ag.de

Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
ATZ Entwicklungszentrum
Kropfersrichterstr. 6 – 10
922376 Sulzbach-Rosenberg

Tel.: (09661) 9 08 – 4 00
Fax: (09661) 9 08 – 4 01
E-Mail: faulstich@atz.de

sowie

Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe
TU München
Petersgasse 18
94315 Straubing

Tel.: (09421) 1 87 – 1 00
Fax: (09421) 1 87 – 1 11
E-Mail: m.faulstich@wzw.tum.de

Dipl.-Ing. Katrin Gethke
Institut für Siedlungswasserwirtschaft der
RWTH Aachen
52056 Aachen

Tel.: (0241) 80 28 139
Fax: (0241) 80 22 522
E-Mail: gethke@isa.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und
Abfalltechnik, Institut für Wasserwesen der
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Tel.: (089) 60 04 – 21 56
Fax: (089) 60 04 – 38 58
E-Mail: wolfgang.guenther@unibw.muenchen.de

Dipl. Ing. (FH) Georg Hiller
Zweckverband "Kläwerk Steinhäule"
Reinzstr. 1
89233 Neu-Ulm

Tel.: (0731) 97 97 – 2 90
Fax: (0731) 97 97 – 2 47
E-Mail: georg-hiller@klaerwerk-steinhaeule.de

Dipl.-Ing. Werner Kröger
Bayer. Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 – 53 57
Fax: (0821) 90 71 – 55 53
E-Mail: werner.kroeger@lfu.bayern.de

Dr.-Ing. Wolfgang Mayer
Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe
TU München
Petersgasse 18
94315 Straubing

Tel.: (09421) 1 87 – 1 06
Fax: (09421) 1 87 – 1 11
E-Mail: wolfgang.mayer@wzw.tum.de

Dr.-Ing. Mario Mocker
ATZ Entwicklungszentrum
Kropfersrichterstr. 6 – 10
922376 Sulzbach-Rosenberg

Tel.: (09661) 9 08 – 4 17
Fax: (09661) 9 08 – 4 69
E-Mail: mocker@atz.de

Dr. Martin Oerter
Verein deutscher Zementwerke e.V.
Tannenstr. 2
40476 Düsseldorf

Tel.: (0211) 45 78 – 1
Fax: (0211) 45 78 – 2 96
E-Mail: Oe@VDZ-Online.De

Franz Petz
Abwasserzweckverband Füssen
Ehrwanger Str. 15
87629 Füssen

Tel.: (08362) 93 94 – 0
Fax: (08362) 93 94 – 20
E-Mail: info@klaerwerk-fuessen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp
Institut für Siedlungswasserwirtschaft der
RWTH Aachen
52056 Aachen

Tel.: (0241) 80 25 207
Fax: (0241) 80 22 285
E-Mail: sekretariat@isa.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Peter Quicker
ATZ Entwicklungszentrum
Kropfersrichterstr. 6 – 10
922376 Sulzbach-Rosenberg

Tel.: (09661) 9 08 – 4 10
Fax: (09661) 9 08 – 4 69
E-Mail: quicker@atz.de

Dipl.-Chem. Heinz-Uwe Riedel
Bayer. Landesamt für Umwelt
Dienstort Josef-Vogl-Technikum
Am Mittleren Moos 46A
86167 Augsburg

Tel.: (0821) 70 00 – 2 83
Fax: (0821) 70 00 – 2 99
E-Mail: heinz-uwe.riedel@lfu.bayern.de

Dr. Doris Schieder
Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe
TU München
Petersgasse 18
94315 Straubing

Tel.: (09421) 1 87 – 1 08
Fax: (09421) 1 87 – 1 11
E-Mail: doris.schieder@wzw.tum.de

Dipl.-Ing. Christina Schwarz
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und
Abfalltechnik, Institut für Wasserwesen der
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Tel.: (089) 60 04 – 26 16
Fax: (089) 60 04 – 38 58
E-Mail: christina.schwarz@unibw-muenchen.de

Prof. Dr. Ernst A. Stadlbauer
Fachhochschule Gießen-Friedberg, Fachbereich
Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik,
Labor für Entsorgungstechnik
Wiesenstr. 14
35390 Gießen

Tel.: (0641) 3 09 – 23 22
Fax: (0641) 3 09 – 23 77
E-Mail: ernst.a.stadlbauer@mni.fh-giessen.de

Dipl.-Ing. Dr. Klaus Steier
E.ON Kraftwerke GmbH
Denisstr. 2
80335 München

Tel.: (089) 12 54 – 32 43
Fax: (089) 12 54 – 32 78
E-Mail: klaus.steier@eon-energie.com

Anhang

Beitrag von

Herrn Dr. Martin Oerter
Verein deutscher Zementwerke e.V.

Dieser Beitrag ist in der Druckfassung des Tagungsbandes nicht enthalten.

Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken – aktuelle Situation und Perspektiven

M. Oerter, Düsseldorf

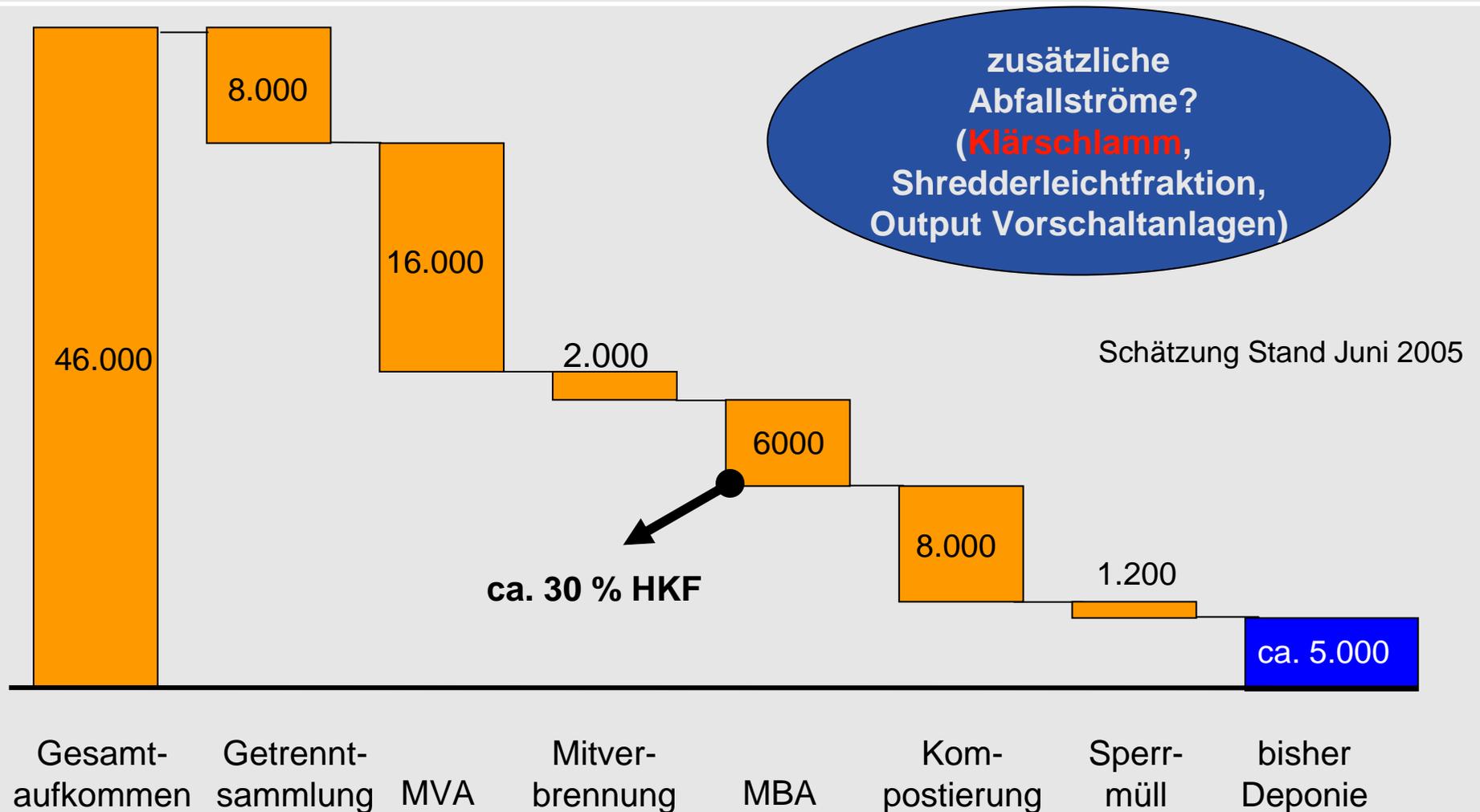
Fachtagung „Neue Entsorgungswege für den bayerischen Klärschlamm“

Augsburg, 11. Juli 2006

Abfallverwertung in der deutschen Zementindustrie

- Ersatzbrennstoffeinsatz in den deutschen Zementwerken
- Qualitätsanforderungen der Zementindustrie
- Spezifische Aspekte beim Einsatz von Klärschlamm
- Verhalten von Quecksilber
- Ausblick auf mögliche Entwicklungen

Siedlungsabfälle in Deutschland (in 1000 t)



Umweltdaten der deutschen Zementindustrie

Die in den deutschen Zementwerken eingesetzten Ersatzbrennstoffe werden jedes Jahr veröffentlicht.

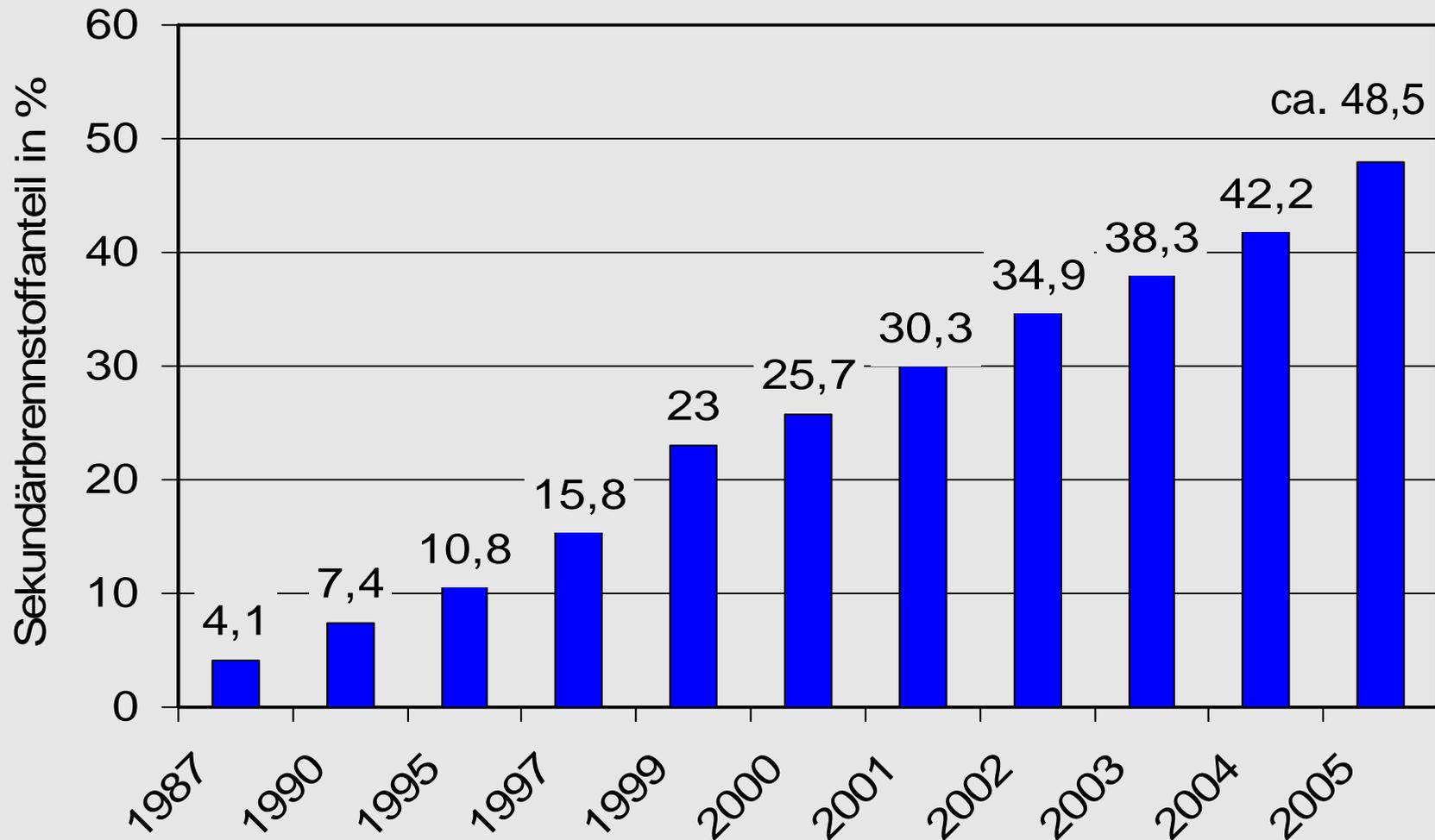
Die Daten stehen unter

www.vdz-online.de

der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung.



Die Entwicklung des Ersatzbrennstoffeinsatzes in der deutschen Zementindustrie



Einsatz von Ersatzbrennstoffen in der deutschen Zementindustrie

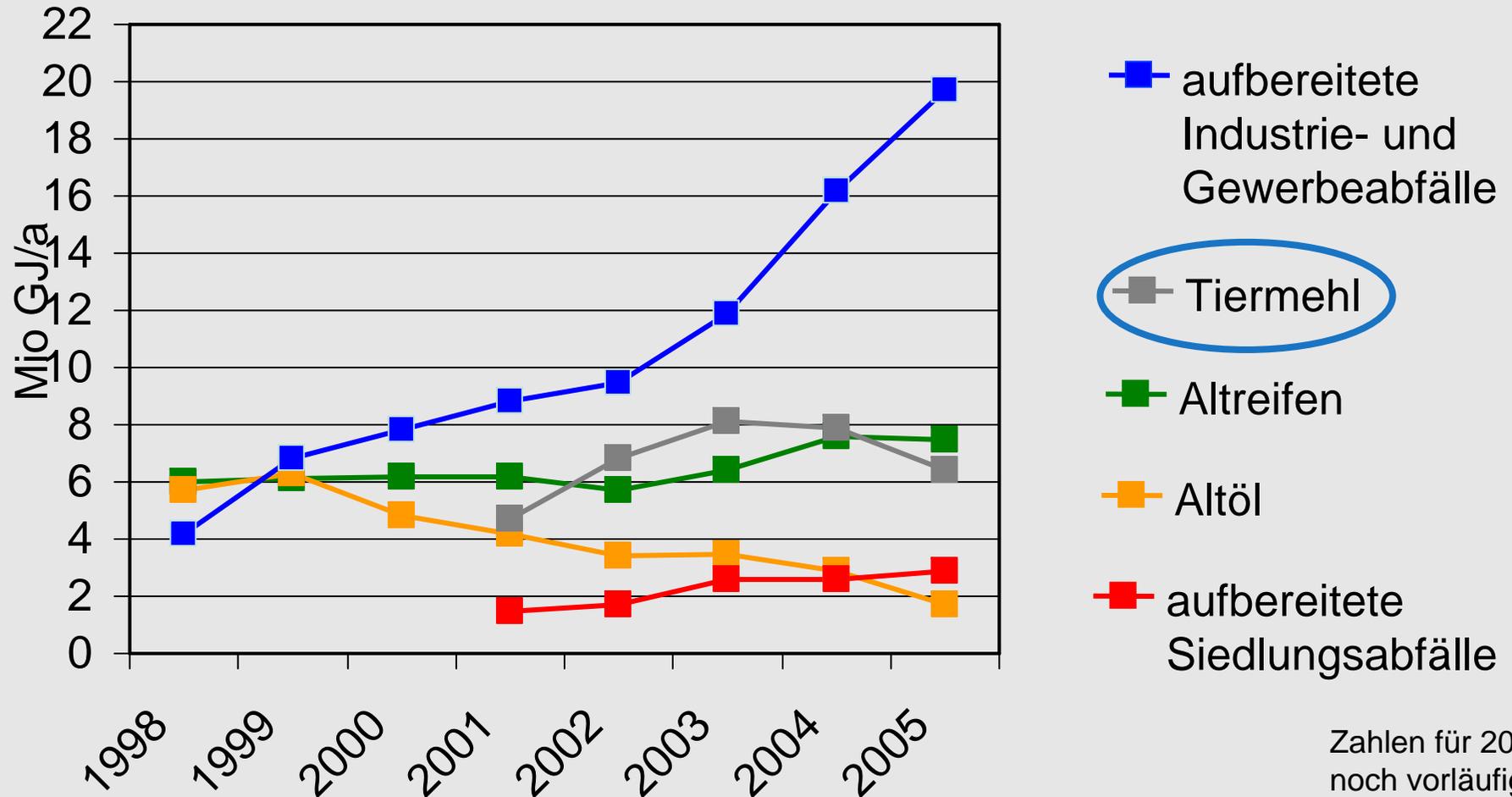
Ersatzbrennstoff

Menge in 2005 [1.000 t/a]

■ Reifen	288
■ Altöl	60
■ Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen (wie z. B. Kunststoffe, Papier, Textilien etc.)	1.116
■ Tiermehle und -fette	355
■ Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	198
■ Altholz	74
■ Lösungsmittel	101
■ Bleicherde	11
■ Klärschlamm	157
■ Sonstige, wie	28
– Ölschlamm	
– Organische Destillationsrückstände	

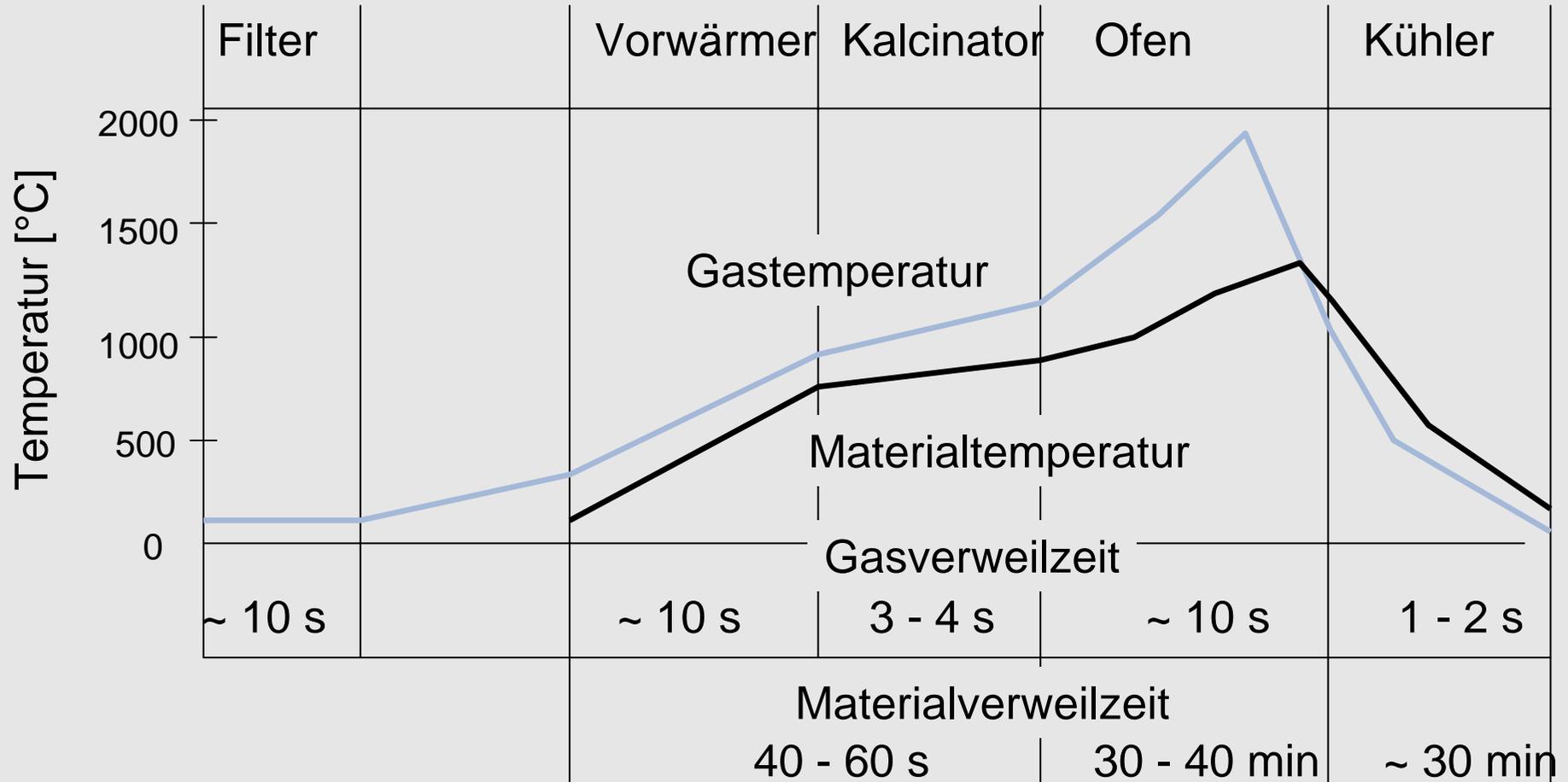
vorläufige Angaben

Entwicklung der Substitutionsraten für ausgewählte Stoffe

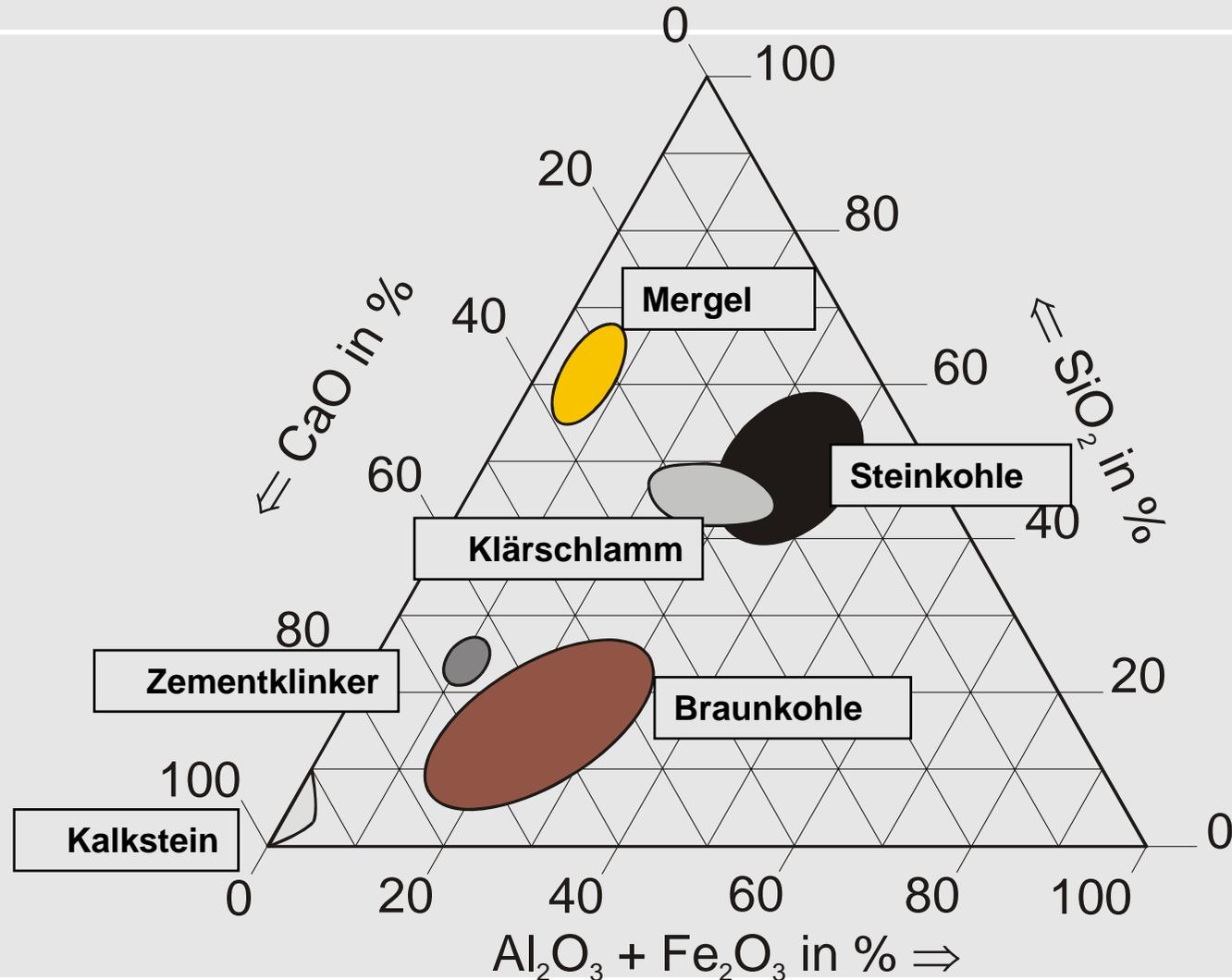


Siedlungsabfälle werden erst seit 2001 gesondert erfasst.

Gas- und Materialverweilzeiten in einem Klinkerofen



Simultane stoffliche und energetische Verwertung der Klärschlämme im Klinkerbrennprozeß



Anforderungen an eine ordnungsgemäße Verwertung

- Verfahrenstechnik (H_u , Cl, S, Lagerfähigkeit, Feuchte, Aschegehalt etc.)
- Umweltverträglichkeit / Schadlosigkeit
 - keine nachteilige Veränderung der Emissionssituation
 - keine nachteiligen Auswirkungen auf das Produkt

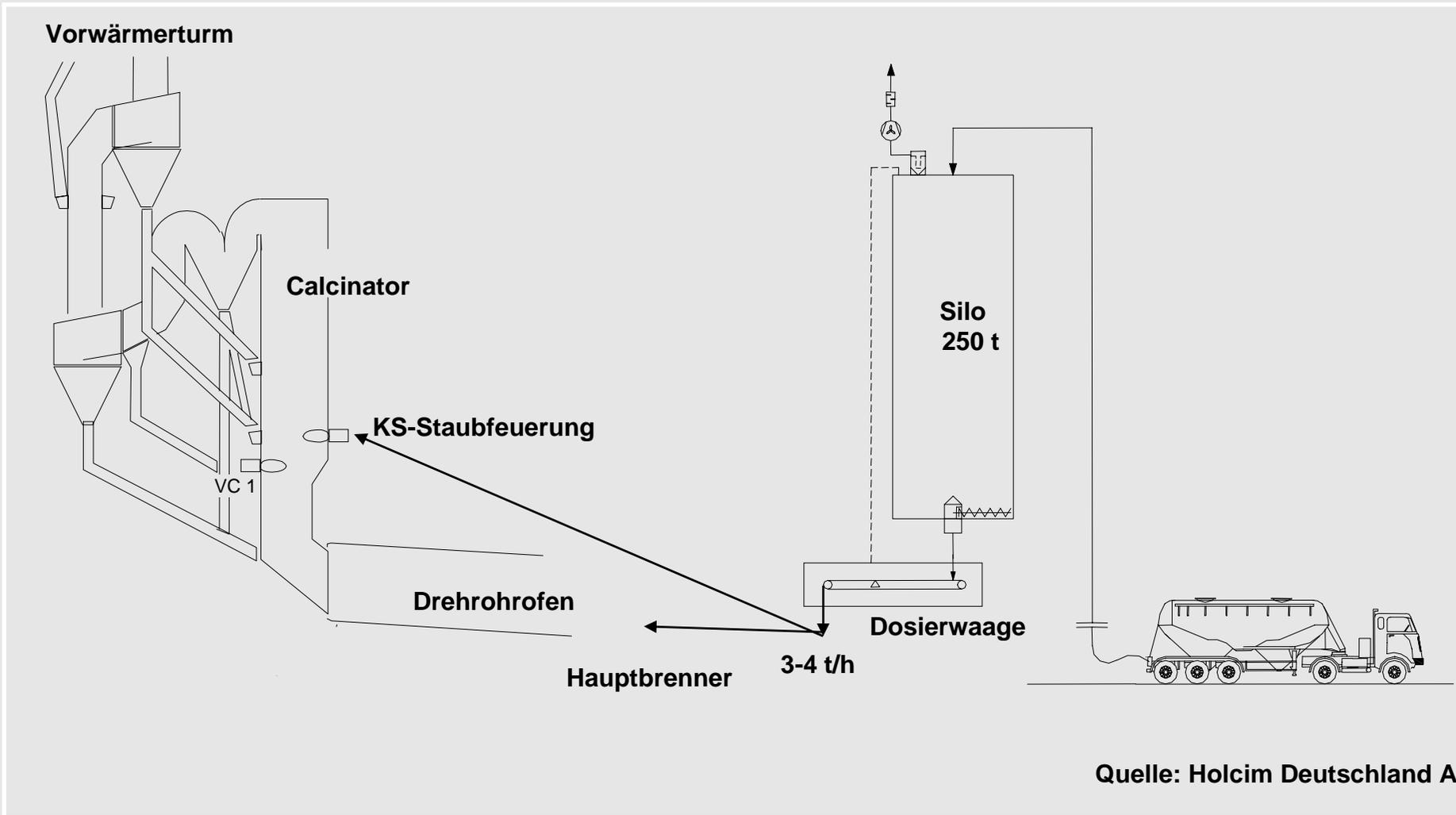
➔ Ersatzbrennstoffe müssen bestimmte physikalisch-chemische Parameter einhalten

Beim Klärschlammeinsatz zusätzlich besondere Anforderungen an Arbeits- und Gesundheitsschutz

Thermisch getrockneter Klärschlamm



Lagerung und Dosierung von thermisch getrocknetem Klärschlamm

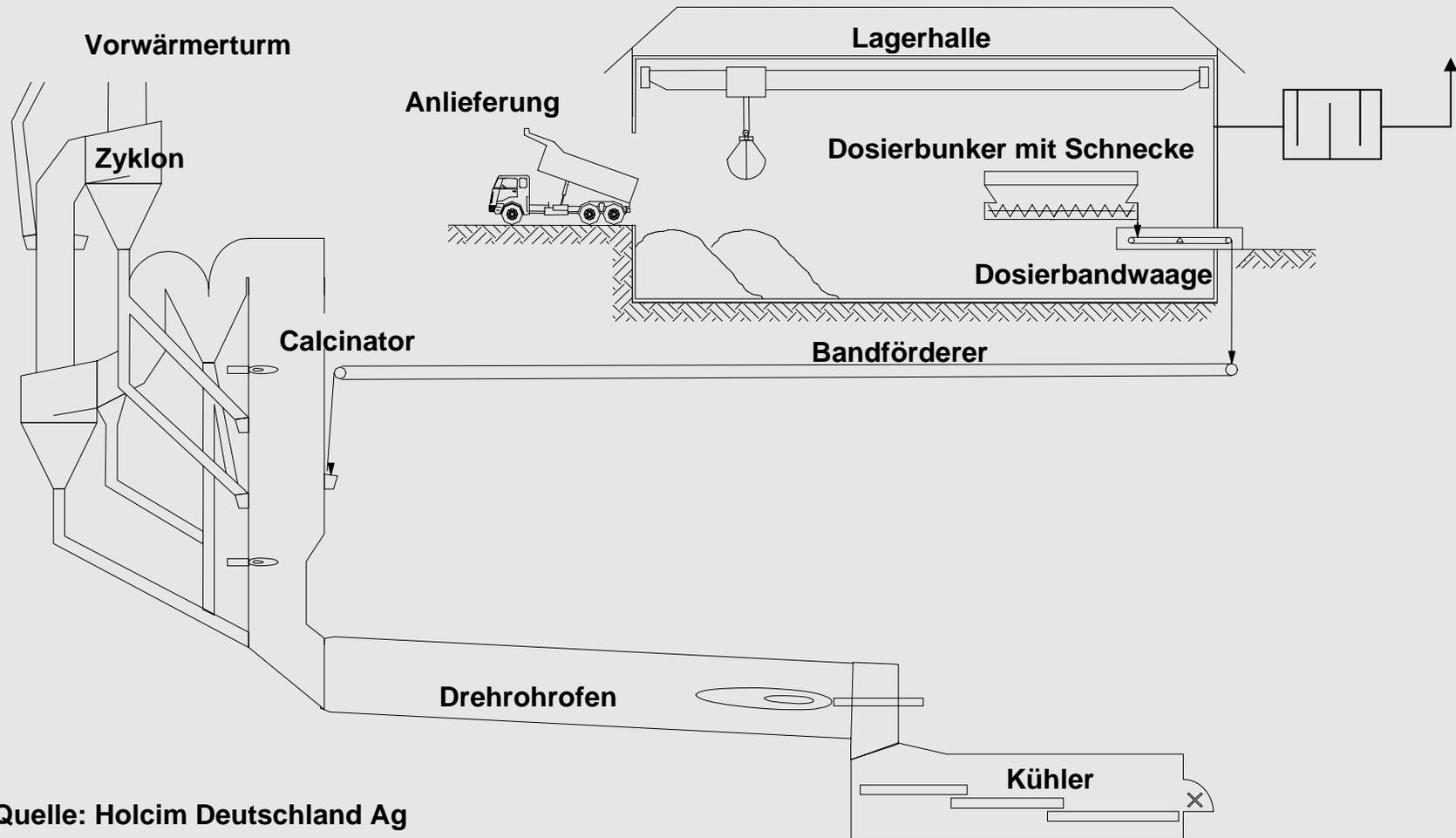


Quelle: Holcim Deutschland Ag

Mechanisch entwässerter Klärschlamm



Lagerung und Dosierung von teilgetrocknetem / mechanisch entwässertem Klärschlamm



Quelle: Holcim Deutschland Ag

Klärschlammanlieferung



Klärschlamm-lagerhalle



Zwischenfazit

- Der Klinkerbrennprozeß ist gut zur simultanen stofflichen und energetischen Verwertung von Klärschlämmen geeignet.
- Der Einsatz solcher Schlämme erfordert ein hohes Maß an technischem Knowhow.
- Unter Umständen sind hohe Investitionen erforderlich
- Kenntnisse über den Eintrag und über das Verhalten von Quecksilber sind wichtig, um die gesetzlichen Vorgaben einhalten zu können

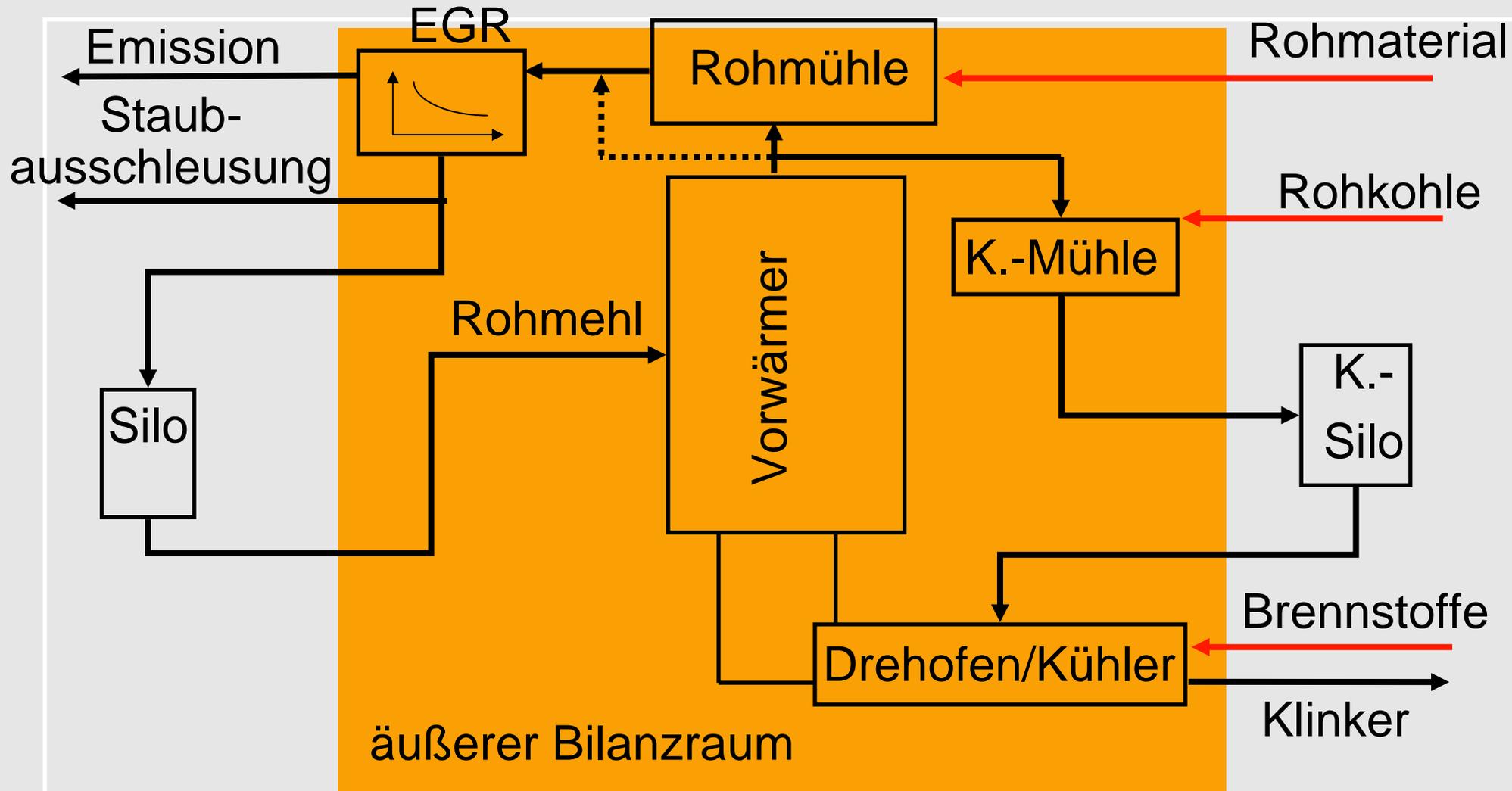
Die besondere Rolle des Quecksilbers

- Quecksilber ist ein Spurenelement mit einer hohen Flüchtigkeit
- Das Rückhaltevermögen des Vorwärmer-/Filtersystems ist begrenzt
- Die 17. BImSchV setzt strenge Emissionsgrenzwerte

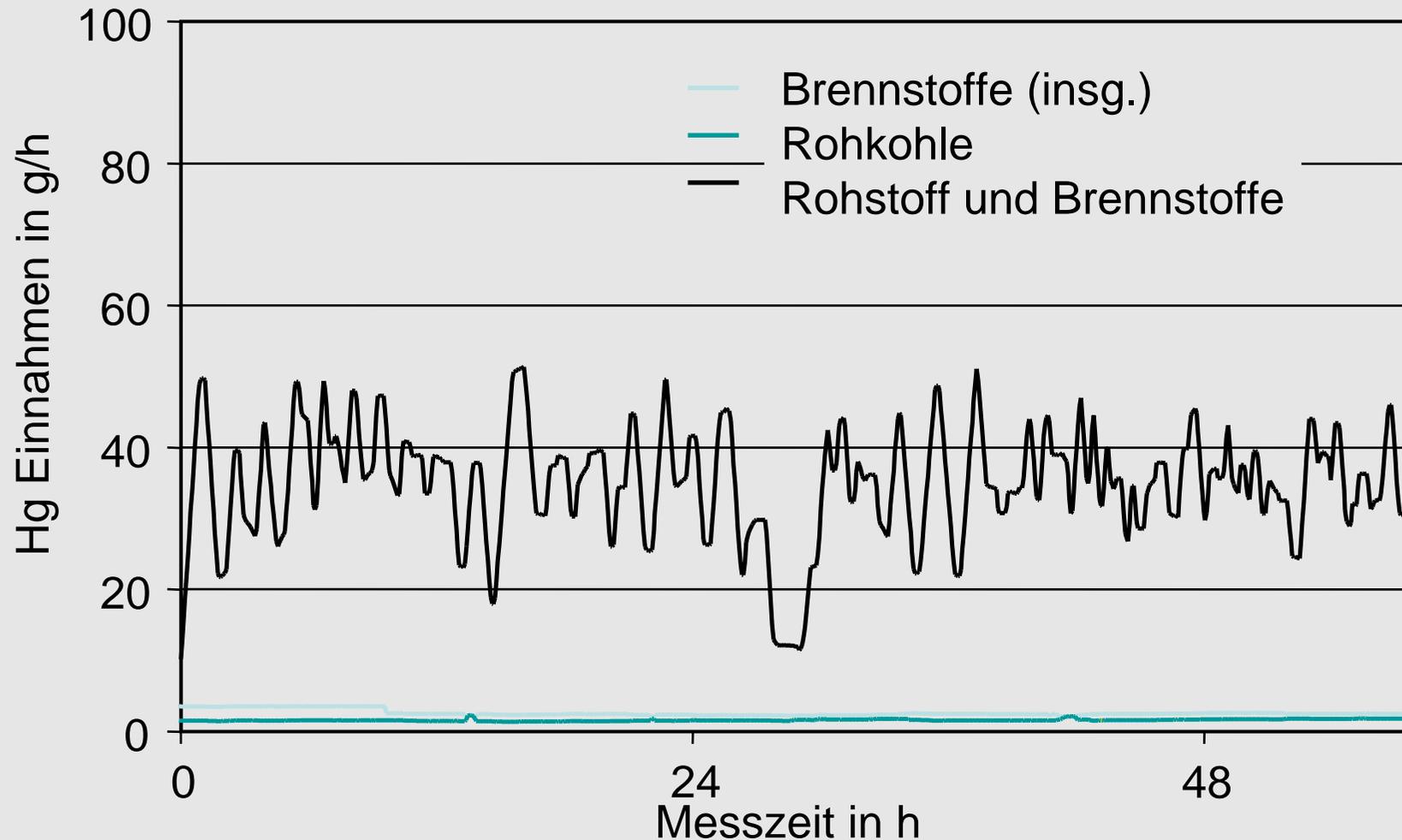
Mittlere Spurenelementgehalte typischer Einsatzstoffe in mg/kg

Element	Rohmehl	Kohle	Altreifen
Cd	0,15	1	8
Tl	0,78	3,3	0,3
Hg	0,05	0,4	0,2
As	15	17	20
Co	5	15	250
Ni	23	43	30
Pb	15	70	70
Cr	39	28	40
Cu	11	33	450

Äußerer Bilanzraum



Quecksilbereintrag in einen Klinkerdrehofen



Derzeitige Situation und mögliche Entwicklungen

- Die deutschen Zementwerke verfügen über eine langjährige Erfahrung im Einsatz unterschiedlicher Alternativ(brenn)stoffe
- Diese Stoffe werden unter kontrollierten Bedingungen umweltverträglich und schadlos verwertet
- Der Klärschlamm wird im Klinkerbrennprozeß **vollständig** verwertet
- Die Klärschlammverwertung im Zementwerk bedingt eine Minderung der fossilen CO₂-Emissionen
- Die deutschen Zementwerke können langfristig einen nachhaltigen Beitrag zur Klärschlammmentsorgung leisten