

STOFF- UND ENERGIEBILANZEN BEI DER VERBRENNUNG VON ROH- UND FAULSCHLAMM

M. Beckmann, A. Baumann, B. v. Gynz-Rekowski; Weimar

1 Einführung

Im Jahr 2000 fielen im Freistaat Thüringen auf kommunalen Kläranlagen 43.800 Tonnen Klärschlamm-Trockenmasse an. Davon wurden ca. 93 % in der Landwirtschaft, im Landbau und der Kompostierung eingesetzt, weitere 3 % wurden deponiert. Die thermische Behandlung von Klärschlamm hat, mit einem Anteil $< 2\%$ im Lagebericht für das Jahr 2000 /1/ erstmals erwähnt, für Thüringen zur Zeit nur eine untergeordnete Bedeutung.

Der Einsatz von Klärschlamm in der Landwirtschaft wird wegen des Eintrags von Schadstoffen (Schwermetalle, org. Schadstoffe, Krankheitserreger etc.) in stärker werdendem Umfang kritisch eingeschätzt. Die Deponierung thermisch unbehandelter Klärschlammes kann nach Vollzug der TA Siedlungsabfall ab dem Jahr 2005 keinen Beitrag zur Klärschlammesorgung mehr leisten. Vor diesem Hintergrund wird die Klärschlammverbrennung als Alternative zunehmend diskutiert.

Geht man der Frage nach, welchen Einfluss die Verbrennung von Klärschlamm auf die Schlammbehandlung vorhandener Kläranlagen haben kann, zeigt sich je nach vorgelagertem Behandlungsverfahren ein differenziertes Bild.

Während die Behandlung auf Kläranlagen mit simultan-aerober Stabilisierung im Prinzip unverändert bleiben kann, sind für größere Anlagen mit anaerob-mesophiler Stabilisierung zwei grundsätzliche Verfahrensvarianten möglich. Neben der Beibehaltung der anaerob-mesophilen Stabilisierung mit nachfolgender Verbrennung des Faulschlammes ist auch eine Verbrennung von entwässertem, unstabilisierten Rohschlamm möglich. Beide Varianten werden derzeit in Deutschland praktiziert und in Fachkreisen diskutiert.

Die Betreiber von Kläranlagen mit anaerob-mesophiler Stabilisierung stehen bei der Planung einer Klärschlammbehandlung durch Verbrennung vor der Entscheidung, die vorhandenen Faulbehälter - einschließlich der Anlagen zur Gasverwertung - stillzulegen oder weiterzunutzen. Das die Außerbetriebnahme vorhandener Faulbehälter nicht nur eine theoretische Option ist, zeigt das Beispiel der Kläranlage Berlin-Ruhleben /2/. Die 8 Faulbehälter werden nicht mehr zur Stabilisierung, sondern als s.g. Mischschlamm-speicher genutzt und der Rohschlamm wird nach der Entwässerung ohne weitere Behandlung verbrannt.

Mit dem vorliegenden Beitrag soll der Versuch unternommen werden, die Frage der geeigneten Schlammbehandlung in der Kläranlage in Verbindung mit nachfolgender Verbrennung mit Hilfe von Stoff- und Energiebilanzen zu beantworten. Die beiden Grundvarianten (mit und ohne Faulung auf der Kläranlage) werden auf dieser Basis einem Vergleich unterzogen. Die Bewertung erfolgt in dem hier gewählten Rahmen auf der Grundlage der jeweils für die Behandlung eingesetzten bzw. zur Substitution zur Verfügung stehenden Primärenergie. Eine Kostenbetrachtung erfolgt nicht.

Im folgenden werden zuerst die Varianten kurz aus verfahrenstechnischer Sicht erläutert. Danach werden die einzelnen Bilanzgrundlagen (Bilanzkreise und Methodik) erörtert und die jeweiligen Berechnungsergebnisse diskutiert.

2 Ausgangssituation und untersuchte Verfahrensvarianten

2.1 Beschreibung der Modellkläranlage und der Rohschlammbeschaffenheit

Für den Variantenvergleich wird eine mittelgroße Modellkläranlage zur Behandlung kommunaler Abwässer, mit einem durchschnittlichen Anschlusswert von 60.000 Einwohnerwerten (EW) ausgewählt. Die Anlage wurde so modelliert, dass sie den gegenwärtigen Stand der Abwasser- und Schlammbehandlung in mittelgroßen Kläranlagen möglichst repräsentativ abbildet.

Folglich handelt es sich um eine mechanisch-biologische Kläranlage mit kurzer Vorklärung, Nitrifikation, Denitrifikation und biologisch/chemischer Phosphor-Elimination. Die anaerob-mesophile Schlammstabilisierung des voreingedickten Rohschlammes erfolgt in geschlossenen Faulbehältern. Nach der Stabilisierung wird der Faulschlamm maschinell entwässert. Die energetische Verwertung des Klärgases erfolgt durch Kraft-Wärme-Kopplung (K-W-K) in Blockheizkraftwerken (BHKW). **Abbildung 1** zeigt den prinzipiellen Aufbau der Modellkläranlage.

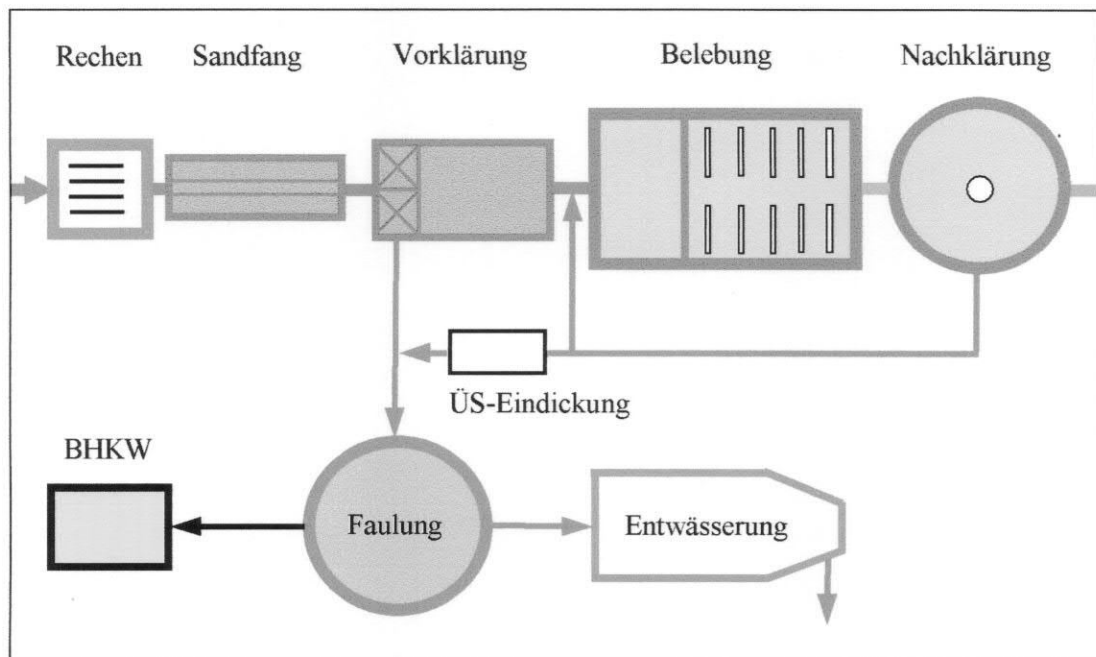


Abbildung 1 : Schematische Darstellung der Modellkläranlage

Die Schlammbehandlung wird mit in der Praxis üblichen Werten bemessen :

- Spezifischer TR-Anfall $0,085 \text{ kg TR} / (\text{EW} * \text{d}) \sim 30 \text{ kg TR} / (\text{EW} * \text{a})$
- TR-Gehalt vor der Faulung (nach ÜS-Eindickung) $5 \% \text{ TR}$

Für eine Stoff- und Energiebilanzierung der Verbrennung muss die Elementarzusammensetzung der Schlämme bekannt sein. Sie unterliegt analog zur Abwasserzusammensetzung starken Schwankungen. Roediger et.al. rechnen in /3/ für Rohschlamm mit der durchschnittlichen Zusammensetzung von Zellsubstanz ($\text{C}_{106} \text{H}_{180} \text{O}_{45} \text{N}_{16} \text{P}$). Wird berücksichtigt, dass kommunaler Klärschlamm weniger Stickstoff enthält als die Zellsubstanz, kann der Modell-Rohschlamm näherungsweise durch die chemische Summenformel $\text{C}_{106} \text{H}_{180} \text{O}_{45} \text{N}_{11} \text{P}$ beschrieben werden. Nach Umrechnung dieser Summenformel in Massenanteile der Elemente am Trockenrückstand TR (bzw. oTR) zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit in der Praxis üblichen Zusammensetzungen von Rohschlämmen /4/. Aus der Zusammensetzung lässt sich über die Verbandsformel /5/ der untere Heizwert (h_u) der Trockensubstanz grob abschätzen. Dieser wurde für den Modell-Rohschlamm mit $h_u = 13,3 \text{ MJ/kg TR}$ berechnet. Als mittlere jährliche Rohschlammtemperatur wird 15°C gewählt.

Tabelle 1 : Elementarzusammensetzung des Modell-Rohschlammes

Element	C	H	O	N	P	mineral.
Ma-% von oTR	54,0	7,6	30,6	6,5	1,3	---
Ma-% von TR	31,3	4,4	17,7	3,8	0,8	42

2.2 Standortwahl der Verbrennungsanlage

Bei den Variantenuntersuchungen zur thermischen Klärschlammbehandlung wird eine Standorttrennung zwischen Verbrennungsanlage und Kläranlage angenommen. Die Verbrennungsanlage wird als zentrale Großanlage betrachtet, welche Schlämme aus mehreren Kläranlagen behandelt. Großanlagen bieten im Vergleich zu dezentralen, kleineren Anlagen den Vorteil, dass ein hoher energetischer Nutzungsgrad bei einwohnerspezifisch geringen Investitionskosten erreicht werden kann. Ein wesentlicher Aspekt für die Standortwahl einer Verbrennungsanlage sollte die möglichst optimale Nutzung der anfallenden thermischen Energie sein.

Die Berechnungen für den Verbrennungsstandort werden in den weiteren Untersuchungen nur für den Schlammanteil aus der Modellkläranlage durchgeführt und erfassen somit nur einen Teil des Anlagendurchsatzes.

2.3 Beschreibung der Varianten

Für den Variantenvergleich werden folgende Grundvarianten ausgewählt:

- Grundvariante F : Thermische Behandlung von Faulschlamm
- Grundvariante R : Thermische Behandlung von Rohschlamm

Die Verbrennung von Klärschlamm im Sinne einer thermischen Verwertung sollte möglichst ohne den Einsatz von Zusatzbrennstoffen, als selbstgängige Verbrennung erfolgen. Rohschlämme können ab einen Trockenrückstand von ca. 30 %, Faulschlämme ab ca. 40 % TR als selbstgängig brennbar eingestuft werden. Bei den heute praktisch erreichbaren Entwässerungsgraden (ohne Berücksichtigung anorganischer Feststoffe aus Konditionierungsmitteln !) ist eine selbstgängige Verbrennung von Faul- und Rohschlämmen damit ohne vorherige Trocknung i.d.R. nicht möglich. Im Variantenvergleich wird für beide Grundvarianten mit einer Trocknung gerechnet. Untervarianten ergeben sich aus der Überlegung, dass sich die

Trocknung entweder am Standort der Kläranlage oder am Standort der Verbrennungsanlage befinden kann.

Im Hinblick auf ein sinnvolles Energienutzungskonzept sollte eine vorgeschaltete Trocknung von Roh- und Faulschlamm unter Nutzung der Kondensationsenthalpie aus der Brüdenkondensation erfolgen. Hierauf wird im Zusammenhang mit dem Energienutzungskonzept in Abschnitt 5 detaillierter eingegangen.

Bei der Rohschlammverbrennung wird eine weitere Untervariante ohne zusätzliche Trocknung untersucht. Diese Form der Thermischen Behandlung stellt jedoch ausschließlich eine Entsorgung des Klärschlammes dar, da hierbei kein energetischer Nutzen erreicht wird.

Zusammenfassend ergeben sich damit fünf zu untersuchende Varianten:

- Grundvariante F :

Untervariante	$F - Tr + V$
Untervariante	$F + Tr - V$
- Grundvariante R :

Untervariante	$R - Tr + V$
Untervariante	$R + Tr - V$
Untervariante	$R + V$

3 Bilanzgrenzen und Bilanzierungsmethodik

3.1 Bilanzgrenzen

Die Variantenuntersuchung basiert auf einer detaillierten Stoff-, Massen- und Energiebilanzierung für die Verfahrensstufen - Faulung - Entwässerung - Trocknung - Verbrennung. Entsprechend der gewählten Standorttrennung zwischen Kläranlage und Klärschlammverbrennung wird eine Aufteilung in folgende Bilanzgrenzen vorgenommen.

- **Bilanzgrenze KA** umfasst die Schlammbehandlung der Kläranlage einschließlich Faulgasverwertung, jedoch ohne Voreindickung.
- **Bilanzgrenze V** umfasst die Verbrennungsanlage, die Energieumwandlung von Dampf in elektrische Energie, die Dampferzeugung und die Abgasreinigung

Die Trocknung, einschließlich der Brüdenbehandlung gehört je nach untersuchter Variante entweder zum Bilanzraum KA oder zum Bilanzraum V.

- **Bilanzgrenze G** umfasst die Bilanzräume KA und V und damit den Gesamtprozess der mechanischen, biologischen und thermischen Schlammbehandlung.
- Für die energetische Bewertung wird abschließend eine zusätzliche **Bilanzgrenze E** gezogen, welche den Aufwand zur Bereitstellung von elektrischer Energie (Kraftwerksmix Deutschland) und von Zusatzbrennstoffen (i.d.R. Heizöl oder Erdgas) erfasst. Damit kann der Primärenergiewirkungsgrad der Varianten ermittelt werden.

Abbildung 2: Übersicht über die Bilanzgrenzen

3.2 Bilanzierungsmethodik

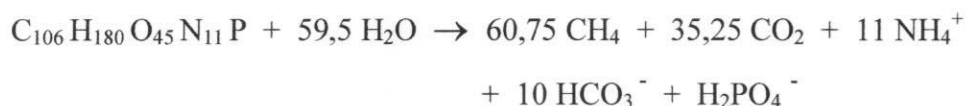
Für die einzelnen Verfahrensstufen und Bilanzräume werden getrennte Stoff-, Massen- und Energiebilanzen aufgestellt. Stoffbilanzen werden für die Elemente C, H, O, N, P, den anorganischen Trockenrückstand TR (Asche) und Wasser erstellt. Die jeweiligen Massenströme ergeben sich aus der Summe der einzelnen Stoffströme. Im Rahmen der Energiebilanz werden die an die Masse gebundenen Enthalpien (physikalische und chemische Energie), die elektrische Energie und die Wärmeenergie erfasst. Als Bezugstemperatur wird 0°C gewählt.

4 Beschreibung der Verfahrensstufen

4.1 Anaerob-Mesophile Stabilisierung (Faulung)

Die anaerob-mesophile Stabilisierung im geschlossenen Faulbehälter wird im Modell als einstufiger Prozeß mit einer Faulzeit von 20 Tagen und einer Temperatur von 35°C betrachtet. Eine exakte Beschreibung zwischen den Eingangs- und Ausgangsparametern der Faulung im Sinne eines mathematischen Reaktionsmodells ist zur Zeit noch nicht möglich, so dass hier auf empirische Ansätze zurückgegriffen wird.

Die Stoff- und Massenbilanzen für den vollständigen anaeroben Abbau können mit Hilfe der von Roediger et.al. /3/ erweiterter Buswell'schen Gleichung erstellt werden.



Der erreichbare Abbaugrad für die organische Trockensubstanz muss u.a. mit Berücksichtigung des Schlammalters und des Abbaugrades in der Vorklärung festgelegt werden. Für die unter Abschnitt 2.1 genannten Randbedingungen wurde in Anlehnung an Untersuchungen der ATV /6/ mit einem Abbaugrad von 42 % gerechnet.

In der Energiebilanz werden neben den Enthalpieströmen des Roh- und Faulschlammes, der Wärmebedarf für die Rohschlammerwärmung, die Wärmeverluste an Faulbehälter und Rohrleitungen, sowie der elektrische Energiebedarf für Durchmischung, Heizschlamm- und Faulbehälterbeschickungspumpen berücksichtigt.

4.2 Nacheindickung und Entwässerung

Die Verfahrensstufen Nacheindickung und Entwässerung haben das gemeinsame Ziel, den Wassergehalt im Schlamm zu verringern und können für die Modellierung in einem Modul zusammengefasst werden. Um die hohen Bindungskräfte zwischen Schlammflocken und Wasser zu lockern und gleichzeitig die Trennschärfe im Interesse einer geringen Feststoffrückbelastung zu erhöhen, ist eine Konditionierung der Schlämme erforderlich. Dazu stehen chemische, physikalische und thermische Verfahren zur Verfügung. Der Nutzen der einzelnen Verfahren ist unter dem Aspekt einer nachfolgenden thermischen Schlammverwertung unterschiedlich zu bewerten. Anorganische Konditionierungsmittel, wie Kalk, Asche oder Eisensalze, erhöhen den mineralischen Anteil der Feststoffe und sind aus thermischer Sicht als ungünstig zu bewerten. Deshalb werden häufig organische Flockungshilfsmittel (FHM), auch Polyelektrolyte genannt, eingesetzt. In Verbindung mit der Abwärmenutzung aus Trocknungs- und Schlammverbrennungsanlagen kommen auch Verfahren zur thermischen Schlammkonditionierung zum Einsatz.

In den Modellrechnungen wird die auf Kläranlagen weit verbreitete Entwässerung mit Dekanterzentrifugen unter Einsatz organischer FHM betrachtet. Zusätzliche Entwässerungseffekte durch Erwärmung des Faul- bzw. Rohschlammes (niederthermische Schlammkonditionierung) werden wegen der relativ geringen Temperaturerhöhung nicht berücksichtigt.

Ebenso wie bei der Verfahrensstufe der Faulung, gibt es auch für die Entwässerung kein exaktes Prozessmodell, welches den erreichbaren Trockenrückstand in Abhängigkeit von den Eingangs- und Betriebsparametern beschreibt. Der Trockenrückstand muss deshalb auf Grundlage von Erfahrungswerten festgelegt werden. In der Praxis können mit Dekanterzentrifugen und polymeren FHM bei Faulschlämmen Trockensubstanzgehalte von i.M. 28 % TR erreicht werden /7/. Nichtstabilisierte Rohschlämme entwässern schlechter als Faulschlämme und werden im Modell mit 26 % TR angesetzt. Der elektrische Energiebedarf für die Entwässerung wird mit 2,0 kWh pro m³ Schlamm gewählt /8/.

4.3 Trocknung

Erfolgt die Verbrennung, wie für den Variantenvergleich gewählt, in einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage, so ist eine Teiltrocknung der Klärschlämme ausreichend um die Verbrennung ohne Einsatz von Zusatzbrennstoffen selbstgänglich bei Verbrennungstemperaturen größer 850°C ablaufen zu lassen.

Für die Modellvarianten mit Trocknung am Standort Kläranlage wird eine Teiltrocknung im Kontakttrockenverfahren auf 42 % TR gewählt. Durch Kondensation der Brüden kann die für die Verdampfungstrocknung erforderliche Energie zu einem Teil zurückgewonnen werden. Einzelheiten zur Verwendung der Brüdenenergie werden im Abschnitt 5 beschrieben.

Befindet sich die Trocknung am Standort der Verbrennungsanlage, wird eine Volltrocknung auf mindestens 90 % TR gewählt. Die erforderliche Energie für die Verdampfungstrocknung wird hier durch eine mechanische Brüdenkompression bereitgestellt /9/. Das Energienutzungskonzept wird in Abschnitt 5 näher beschrieben.

Der durchschnittliche Elektroenergiebedarf für die Trocknung kann nach Brautlecht /10/ mit ca. 80 kWh pro Tonne Wasserverdampfung angesetzt werden. Der thermische Energiebedarf ergibt sich dann nach Vorgabe der Trockenschlammtemperatur aus der Energiebilanz.

4.4 Klärschlammverbrennung

Im Modell wird eine Monoverbrennung in einer Wirbelschicht bei einer Verbrennungstemperatur von 870°C angenommen. Zur Verbrennung gehören neben der eigentlichen Wirbelschicht, die Anlagenteile zur Abwärmenutzung aus dem Abgas- und Aschestrom (Luftvorwärmung, Abhitzekegel zur Dampferzeugung) sowie die Energieumwandlung von Dampf zu Elektroenergie. Der Luftüberschuss wird mit $\lambda = 1,35$ eingestellt. Der elektrische Energiebedarf der Verbrennung kann nach Meyer, U. /4/ mit $14 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{MWh}_{\text{therm}}$ angenommen werden, für die Abgasreinigung werden $15 \text{ kWh}_{\text{el}}/1.000 \text{ m}^3_{\text{N}}$ Abgas angesetzt /12/.

5 Energienutzungskonzept

5.1 Energienutzung am Standort der Kläranlage

5.1.1 Grundvariante „Faulschlamm“

Die thermische Energie für die Faulbehälter- und die Gebäudeheizung wird für die Variante ohne Trocknung (F + Tr-V) vor Ort über Kraft-Wärme-Kopplung aus dem anfallenden Faulgas gewonnen. Bei sachgerechter Dimensionierung der Schlammbehandlung und sonstiger zu beheizender Gebäude kann bei einem thermischen Wirkungsgrad der Faulgasverwertung im BHKW von ca. 55 % ein wärmeautarker Betrieb von Kläranlagen erreicht werden (Dichtl /8/). Außerhalb der Wintermonate fällt auf Kläranlagen mit mesophiler Faulung ohne Trockner regelmäßig überschüssige thermische Energie an, welche i.d.R. nicht an Verbraucher außerhalb der Kläranlage angegeben werden kann. Die nicht benötigte thermische Energie wird in das Abwasser abgeführt und steht damit im Rahmen des Variantenvergleiches als Nutzenergie nicht weiter zur Verfügung.

Der elektrische Wirkungsgrad eines BHKW wird mit 35 % angesetzt. Da die Stromerzeugung stets höher ist, als der entsprechende Verbrauch in der Schlammbehandlung wird der Überschuss für den Bilanzkreis Kläranlage als Gewinn verbucht ¹ und in der Gesamtenergiebilanz mit dem Bedarf an elektrischer Energie verrechnet.

Befindet sich die Trocknungsanlage in der Kläranlage (Variante F-Tr + V), wird das Faulgas ebenfalls vollständig in der Kraft-Wärme-Kopplung verwertet. Die Wärme aus dem Abgasstrom des BHKW wird hier jedoch ausgekoppelt und zur Dampferzeugung für die Trocknung genutzt. Die zusätzlich erforderliche Energie für den Betrieb der Trocknung muss in Form von Zusatzbrennstoff bereitgestellt werden.

¹ Der Bilanzkreis Kläranlage enthält nur die Schlammbehandlung, ohne Voreindickung sowie die Gebäude

Entsprechend der in der Praxis üblichen Verfahrensweise wird die Energie aus der Brüdenkondensation als Niedertemperaturwärme (NT-Wärme) im Wärmeverbund der Kläranlage für die Beheizung der Faulbehälter und der Gebäude genutzt. Der noch verbleibende Teil der NT-Wärme wird für die Faulschlammerwärmung vor der Entwässerung eingesetzt.

5.1.2 Grundvariante „Rohschlamm“

Bei der Variante ohne Faulung und ohne Trocknung am Standort Kläranlage (R + Tr-V) muss die Gebäudeheizung über Energieumwandlung von Zusatzbrennstoff erfolgen. Nutzbare Energie fällt bei dieser Variante in der Kläranlage nicht an.

Die Variante ohne Faulung mit Trocknung am Standort Kläranlage (R-Tr + V) benötigt Zusatzbrennstoff für die Dampferzeugung der Trocknung. Die Gebäudeheizung kann dagegen aus der Brüdenkondensationsenergie vollständig gedeckt werden. Ein großer Teil der Brüdenenergie bliebe bei dieser Verfahrensführung jedoch ungenutzt. Um den Einsatz von Zusatzbrennstoff zu verringern, wird die verbleibende Brüdenenergie zur Erwärmung des Rohschlammes vor der Entwässerung verwendet. Die Möglichkeit einer Brüdenkompression zur Einsparung von Zusatzbrennstoffen für die Trocknung wird am Standort der Kläranlage nicht betrachtet.

Der Bedarf an elektrischer Energie muss grundsätzlich als Fremdenergie bezogen werden.

5.2 Energienutzung am Standort der Verbrennungsanlage

5.2.1 Untervarianten ohne Trockner

Am Standort der Verbrennungsanlage steht, nach Abzug der in der Anlage benötigten Prozessenergien für die Luftvorwärmung und die Abgasreinigung, überschüssige thermische Energie in Form von hochgespannten Dampf zur Verfügung. Dieser wird im hier behandelten Beispiel in einer Turbine entspannt und in elektrische Energie umgewandelt. Eine Auskopplung von Fernwärme oder Prozessdampf wird hier nicht betrachtet.

Der Wirkungsgrad für die Umwandlung der Dampfenenergie in elektrische Energie wird mit 30 % zugrundegelegt. Die für die Verbrennungsanlage erforderliche elektrische Energie kann vollständig durch die im Prozess erzeugte elektrische Energie gedeckt werden. Der Überschuss wird in der Gesamtbilanz verrechnet.

5.2.2 Untervarianten mit Trockner

Bei den Varianten mit gemeinsamen Standort von Trocknung und Verbrennung wird im Interesse eines möglichst hohen Primärenergienutzungsgrades im Beispiel eine vollständige Nutzung der erzeugten Dampfes für die Verstromung angestrebt. Auf eine Auskopplung von Dampf zur Trocknerheizung wird verzichtet, da die beim konventionellen Trocknerbetrieb anfallende NT-Wärme aus den Brüden in der Anlage selbst i.d.R. nicht vollständig genutzt werden kann. Die Abgabe von NT-Wärme an externe Verbraucher ist nur unter bestimmten Randbedingungen möglich und wirtschaftlich, sie wird deshalb wie am Kläranlagenstandort nicht in Ansatz gebracht. Die für die Trocknung erforderliche Energie wird am Verbrennungsstandort über eine mechanische Brüdenkompression unter Einsatz von elektrischer Energie bereitgestellt.

Die für die Verbrennungsanlage, den Trockner und die Brüdenkompression erforderliche elektrische Energie kann vollständig mit der erzeugten elektrischen Energie aus der Dampfturbine gedeckt werden.

5.3 Bewertungsmethodik für den bilanzierten Energieüberschuss

Die Energiebilanz für den Gesamtprozess G (Kläranlage und Verbrennung) erfasst als nutzbare Energieträger elektrische Energie und Zusatzbrennstoffe. Diese Energieträger sind aufgrund unterschiedlicher energetischer Voraufwendungen nicht direkt miteinander vergleichbar.

Mit Hilfe von Primärenergiefaktoren, welche die Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie erfassen, können die bilanzierten Energieträger auf eine vergleichbare Basis umgerechnet werden. Die Primärenergiefaktoren enthalten sämtliche Vorketten, einschließlich Material-Vorleistungen und Hilfsenergie für Förderung, Aufbereitung und Transport. Die hier verwendeten Faktoren f_p wurden aus [11] entnommen :

- elektrische Energie $f_{p,elt} = 3,0$
- Zusatzbrennstoffe (Heizöl, Erdgas) $f_{p,Z-BS} = 1,1$

Im Ergebnis erhält man den Primärenergienutzen $E_{Nutz-PE}$ für den bilanzierten Gesamtprozess.

$$E_{Nutz-PE} = (E_{elt,OUT} - E_{elt,IN}) * f_{p,elt} - H_{Z-BS} * f_{p,Z-BS}$$

$E_{elt,IN}$	Bedarf an elektrischer Energie
H_{Z-BS}	Enthalpiebedarf an Zusatzbrennstoff
$E_{elt,OUT}$	Gewinn an elektrischer Energie

6 Berechnungsergebnisse

6.1 Übersicht über die Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse für die untersuchten Varianten sind in **Tabelle 2** zusammengestellt. Im oberen Teil stehen die absoluten Werte für das Beispiel mit 1.800 t TR/a, entsprechend 60.000 EW, im unteren Teil die spezifischen, auf 1 kg TR bezogenen Werten für die Energien/Enthalpien. In der jeweils letzten Zeile wird der Primärenergienutzen der Varianten angegeben. Das Bilanzschema in **Abbildung 3** enthält die Werte für die Variante mit dem größten Primärenergienutzen (Variante F + Tr-V : Faulschlammverbrennung mit Trocknung am Standort der Verbrennung).

6.2 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Grundlage für die Auswahl der Verfahren waren in der Praxis übliche Verfahrens- und Anlagenkonfigurationen für Kläranlagen im mittleren Kapazitätsbereich. Unter der Annahme von standortneutralen Randbedingungen wurde keine externe Nutzung von Niedertemperaturwärme (NT-Wärme) aus dem Trocknungsprozess und der Faulgasverwertung zugrunde gelegt.

Der Vergleich der Grundvarianten (Faulung / Rohschlamm) zeigt deutlich, dass bei jeweils gleichen Untervarianten (Trocknerstandort), die Faulschlammverbrennung stets einen höheren Primärenergienutzen erzielt als die Rohschlammverbrennung.

$$\begin{array}{lcl}
 e_{\text{Nutz-PE}} (F + \text{Tr-V}) = 5,95^2 & > & e_{\text{Nutz-PE}} (R + \text{Tr-V}) = 3,64 \\
 e_{\text{Nutz-PE}} (F-\text{Tr} + V) = 2,91 & & e_{\text{Aufwand-PE}} (R-\text{Tr} + V) = - 2,05^3
 \end{array}$$

² [MJ / kg TR]

³ Das negative Vorzeichen weist darauf hin, daß hier kein Nutzen entsteht, sondern ein Aufwand für die Behandlung des Schlammes (Entsorgung) erforderlich ist.

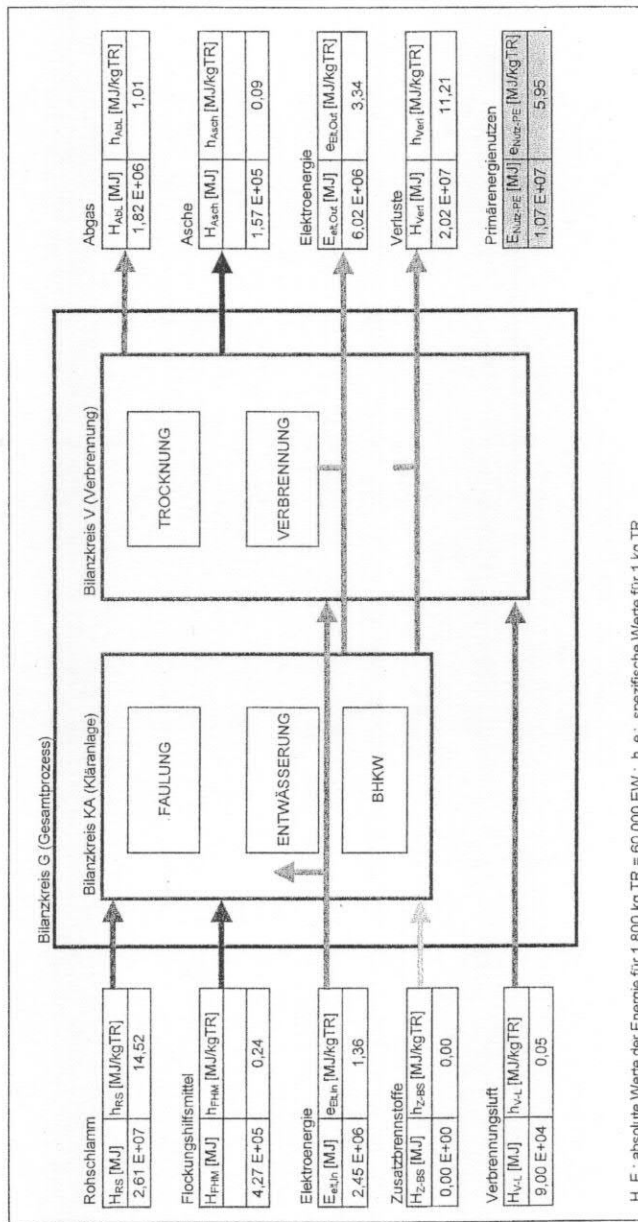


Abbildung 3: Vereinfachtes Schema der wesentlichen Energieflüsse für die Variante Faulschlammverbrennung mit Trocknung am Verbrennungsstandort

Tabelle 2 : Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Energien [MJ]	F + Tr-V	F-Tr + V	R + Tr-V	R-Tr + V	R + V
$E_{\text{El,In}}$ Elektroenergie, Input	2,45 E+06	1,67 E+06	2,95 E+06	1,83 E+06	1,59 E+06
$E_{\text{El,Out}}$ Elektroenergie, Output	6,02 E+06	4,61 E+06	5,41 E+06	3,64 E+06	2,78 E+06
h_{RS} Rohschlamm (TR)	2,61 E+07	2,61 E+07	2,61 E+07	2,61 E+07	2,61 E+07
h_{FHM} Flockungshilfsmittel	4,27 E+05	4,27 E+05	5,64 E+05	5,64 E+05	5,64 E+05
$h_{\text{Z-BS}}$ Zusatzbrennstoffe	0,00 E+00	3,26 E+06	7,61 E+05	8,30 E+06	6,82 E+06
$h_{\text{V-L}}$ Verbrennungsluft	9,00 E+04	9,02 E+04	1,55 E+05	1,55 E+05	1,96 E+05
h_{ABL} Abluft	1,82 E+06	2,52 E+06	3,12 E+06	4,00 E+06	5,91 E+06
h_{ASch} Asche	1,57 E+05	1,57 E+05	1,58 E+05	1,58 E+05	1,58 E+05
h_{Verl} Verluste	2,02 E+07	3,06 E+07	1,68 E+07	3,33 E+07	2,82 E+07
$E_{\text{Nutz,PE}} = (E_{\text{El,OUT}} - E_{\text{El,IN}}) * 3,0 - h_{\text{Z-BS}} * 1,1$	1,07 E+07	5,23 E+06	6,55 E+06	-3,69 E+06	-3,92 E+06
spezifische Energien [MJ/kg TR]					
$e_{\text{El,In}}$ Elektroenergie, Input	1,36	0,93	1,64	1,01	0,88
$e_{\text{El,Out}}$ Elektroenergie, Output	3,34	2,56	3,01	2,02	1,55
h_{RS} Rohschlamm (TR)	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52
h_{FHM} Flockungshilfsmittel	0,24	0,24	0,31	0,31	0,31
$h_{\text{Z-BS}}$ Zusatzbrennstoffe	0,00	1,81	0,42	4,61	3,79
$h_{\text{V-L}}$ Verbrennungsluft	0,05	0,05	0,09	0,09	0,11
h_{ABL} Abluft	1,01	1,40	1,73	2,22	3,28
h_{ASch} Asche	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
h_{Verl} Verluste	11,21	17,01	9,31	18,49	15,68
$E_{\text{Nutz,PE}} = (e_{\text{El,OUT}} - e_{\text{El,IN}}) * 3,0 - h_{\text{Z-BS}} * 1,1$	5,95	2,91	3,64	-2,05	-2,18

Betrachtet man den Einfluss des Trocknungsstandortes zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich die Varianten mit Trocknung am Standort der Verbrennung energetisch günstigster darstellen, als die Varianten mit Trocknung in der Kläranlage. Dies ergibt sich aus der günstigeren Energienutzung der Brüdenabwärme am Standort der Verbrennungsanlage. In der Kläranlage kann die Brüdenabwärme der Trocknung nur teilweise genutzt werden. Selbst bei Erwärmung des Dünnschlammes vor der Entwässerung, geht ein großer Teil der Wärme mit dem Entwässerungszentrat ungenutzt verloren.

Bei der Grundvariante ohne Faulung wird die Energie für die Trocknung in der Kläranlage vollständig durch Zusatzbrennstoffe zugeführt. Dagegen wird bei der Grundvariante mit Faulung ein Teil der im Faulgas enthaltenen Enthalpie in elektrische Energie umgewandelt, und gleichzeitig Hochtemperaturwärme aus dem Abgas des BHKW für die Trocknungsstufe zur Verfügung gestellt. Deshalb ergibt sich für die Varianten mit Faulung ein deutlich höherer Primärenergienutzen als im Fall ohne Faulung. Inwieweit eine Brüdenkompression, wie sie für die Trocknung größerer Schlammengen am Standort der Verbrennungsanlage gewählt wurde, auch in mittelgroßen Kläranlagen mit Trocknung wirtschaftlich betrieben werden kann, bedarf weiterer Untersuchungen im weiteren Zusammenhang mit künftigen Parametervariationen zur energetischen Optimierung der einzelnen Varianten

Die Rohschlammverbrennung ohne Trocknung kann unter den angesetzten Randbedingungen nicht selbstgänglich betrieben werden. Um die erforderliche Verbrennungstemperatur von 850°C zu erreichen, muss der Verbrennung Zusatzbrennstoff zugegeben werden. Die Variante stellt sich energetisch ebenso ungünstig wie die Rohschlammverbrennung mit Trocknung in der Kläranlage (Variante R-Tr + V) dar. In beiden Fällen muss Primärenergie aufgewendet werden, um den Schlamm entsprechend zu behandeln (Entsorgung).

Abschließend sei bei der Bewertung der Ergebnisse darauf hingewiesen, dass für die Modellrechnungen noch eine energetische Optimierung der einzelnen Varianten, insbesondere in Hinblick auf die Nutzung von NT-Wärme, durchgeführt werden muss. Da die Wahl der Randbedingungen die Ergebnisse selbstverständlich beeinflusst, sollte im Hinblick auf eine Entscheidung für ein bestimmtes Verfahrens- und Anlagenkonzept jeweils der Einzelfall mit den zugehörigen Randbedingungen und dann selbstverständlich auch unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit untersucht werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Verbrennung von ausgefaultem Schlamm bei entsprechender Prozessführung energetisch sinnvoll ist. Sie ist aus Sicht des erzielbaren Primärenergienutzens unter den hier betrachteten Randbedingungen der Verbrennung von Rohschlamm vorzuziehen.

Mit dem hier vorgestellten Berechnungsmodell für die Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen bei der Schlammbehandlung und -verbrennung ergeben sich im Vergleich zu den Erfahrungen aus der Praxis durchaus belastbare Ergebnisse. Es liegt damit ein tragfähiges Modell vor, mit dem in einem nächsten Schritt Parametervariationen durchgeführt werden sollten, um mögliche Optimierungspotentiale aufzudecken.

Literatur

- /1/ Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (2001) :
Kommunale Abwasserentsorgung im Freistaat Thüringen 2000

- /2/ Berliner Wasserbetriebe (2000) :
Klärwerk Ruhleben - Anlagenprospekt

- /3/ Roediger,H.; Roediger,M.; Kapp,H. (1990) :
Anaerobe alkalische Schlammfäulung, 4. Auflage 1990

- /4/ Meyer, J.U. (1998) :
Entwicklung und Bilanzierung von Verfahrensketten zur
Klärschlamm Entsorgung, 1. Auflage 1998

- /5/ Brennstofftechnische Arbeitsmappe
„VERBRENNUNGSWÄRME und HEIZWERT“

- /6/ ATV (1995) :
ATV-Arbeitsbericht „Maschinelle Schlamm entwässerung“,
Korrespondenz Abwasser (42) 1995, Nr. 2

- /9/ Dichtl, Kopp (2000) :
Kennwerte zur Entwässerbarkeit von Klärschlämmen,
Essener Tagung 2001; in GWA, Nr.184, Aachen

- /8/ Dichtl, N. (2000) :
Schlammbehandlung und Energie,
Vortrag anlässlich der Energietage der ATV in Bielefeld am 23./24. Mai 2000

- /9/ VDI-Gesellschaft Energietechnik (1988) : Mechanische Brüdenkompression

- /10/ Brautlecht, P. (2000):
Technische und ökonomische Aspekte kommunaler
Klärschlamm-trocknungsanlagen, GWA, Nr.181, Aachen
- /11/ DIN V 4701-10 (2001):
Energetische Bewertung heiz- und raumlufthechnischer Anlagen Teil 10
- /12/ Kriete, B.: Energetische Verwertung in der MVA-Bielefeld-Herford
In: Müllverbrennung von Abfällen – Emissionssituation –
Kostensenkungspotentiale in der Entsorgungskette.
UTECH Berlin 1998. S. 113f.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann,
Dipl.-Ing. Beatrice v. Gynz-Rekowski
Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Verfahren und Umwelt
Coudraystraße 13c
99423 Weimar
Tel. (03643) 58 46 75
Fax (03643) 58 47 90
E-Mail: michael.beckmann@bauing.uni-weimar.de
beatrice.v-Gynz-Rekowski@bauing.uni-weimar.de

Dipl.-Ing. Andreas Baumann
Bauhaus-Universität Weimar
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
Coudraystraße 7
99423 Weimar
Tel. (03643) 58 46 19
Fax. (03643) 58 46 48
E-Mail: andreas.baumann@bauing.uni-weimar.de