Baumann, A.; Beckmann, M.; Gynz-Rekowski, v. B.: Energiepotenzial im Klärschlamm. In: Müll-Handbuch 09 (2002), Nr. 3027, Erich Schmidt Verlag

Energiepotenzial im Klärschlamm

Bearbeiter: Dipl.-Ing. A. Baumann, Prof. Dr.-Ing. M. Beckmann, Dipl.-Ing. B. v. Gynz-Rekowski

1.0 Einleitung

Gegenwärtig fallen in Deutschland pro Jahr ca. 2,5 Mio. Tonnen Klärschlamm Trockenmasse an. Der überwiegende Teil wird nach wie vor stofflich verwertet oder deponiert. Nur ca. 18% werden thermisch behandelt und sind damit zunächst in einem unmittelbaren Zusammenhang mit einer möglichen energetischen Verwertung zu sehen [1].

Bei der Einschätzung der energetischen Verwertungsmöglichkeiten von Klärschlamm ist jedoch über die unmittelbar mit der thermischen Behandlung zusammenhängenden Verfahrensschritte hinaus die gesamte Verfahrenskette der Behandlung des Schlammes vom Rohschlamm über ggf. die Faulung, die mechanische Wasserabtrennung, die Trocknung und die Verbrennung (schließt Pyrolyse, Vergasung als Vorstufen ein), einschließlich der jeweiligen Energienutzungskonzepte, zu betrachten.

In der Praxis werden in den einzelnen Prozessabschnitten verschiedene Verfahren zur Klärschlammbehandlung eingesetzt. Damit ergeben sich entsprechend unterschiedliche Verfahrensketten. Im Hinblick auf eine vergleichende Bewertung der jeweiligen Verfahrensketten untereinander ist es in einem ersten Schritt erforderlich, die Verfahrensketten entsprechend der wesentlichen Verfahrensstufen (z. B. mit/ohne Faulung, Trocknung/Verbrennung am Standort oder extern usw.) systematisch einzuordnen. Auf der Grundlage einer solchen systematischen Darstellung der Verfahrensketten lassen sich dann in einem zweiten Schritt die Bilanzkreise und die jeweils ein- und austretenden Massen- und Energieströme festlegen. Aus der Bilanzierung der einzelnen Grundbausteine und der gesamten Verfahrenskette ergibt sich ein energetischer Gesamtnutzen (Netto) oder aber nur ein energetischer Aufwand für die Behandlung des Klärschlammes. Je nachdem, ob dieser Nutzen und Aufwand elektrische oder thermische Energie darstellt, sind die zugehörigen externen Verluste für die Bereitstellung der entsprechenden Energieformen, z. B. Umwandlungsverluste im Kraftwerk, in die Bewertung mit einzubeziehen.

Die Fragestellung nach dem energetischen Potenzial von Klärschlamm lässt sich deshalb nicht allein mit den Eigenschaften des Klärschlammes wie z. B. Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert der organischen Trockensubstanz beantworten. Wichtig für die Bewertung ist vielmehr der jeweils am Ende der Behandlungskette entstehende Nutzen oder Aufwand. Bei der Diskussion des energetischen Potenzials muss somit eine Betrachtung der jeweiligen Verfahrenskette im v. g. Sinne einer kumulierten Bilanzierung (Massen- und Energiebilanzen), einschließlich der externen Verluste für die Energiebereitstellung, einbezogen werden.

[61] Baumann, A.; Beckmann, M.; Gynz-Rekowski, v. B.: Energiepotenzial im Klärschlamm. erschienen in Müll-Handbuch, September 2002, Nr. 3027, Erich Schmidt Verlag.

In dem vorliegenden Beitrag werden vor diesem Hintergrund zunächst wesentliche Aspekte zum Energieinhalt von Rohschlamm und zu den einzelnen Grundoperationen der Behandlung erläutert. Danach werden Beispiele von Verfahrensketten der Schlammbehandlung im Hinblick auf eine systematische Darstellung beschrieben und es erfolgt eine zusammenfassende Darstellung der Bilanzierung der Grundbausteine. Abschließend wird für ein ausgewähltes Beispiel die Frage nach dem energetischen Potenzial des Klärschlammes diskutiert.

2.0 Charakterisierung des Rohschlammes und der Verfahren der Schlammbehandlung

2.1 Energiegehalt im Klärschlamm

Der Energiegehalt des Klärschlammes wird maßgeblich von dem Heizwert h_u der organischen Trockensubstanz, dem Wassergehalt ξ_{H2O} und dem Aschegehalt ξ_{In} bestimmt. Im Hinblick auf die Einstellung erforderlicher Verbrennungstemperaturen ϑ_{kal} in einer Feuerung sind zunächst der Heizwert und die Luftzahl λ die entscheidenden Größen. In der Regel werden die Abgase aus den Verbrennungsanlagen zur Vermeidung von Korrosionen und Anbackungen mit Temperaturen deutlich oberhalb des Taupunktes abgeführt, daher ist der Heizwert auch für die Ermittlung der Energieauskopplung eine wichtige Größe.

Der Heizwert der organischen Trockensubstanz (oTS) ist von der Elementarzusammensetzung abhängig. Als Mittelwert kann $h_{u,oTS} \approx 23$ MJ/kg angesetzt werden [2,3]. Kommunaler Rohschlamm (Mischschlamm aus Vorklär-, biologischem Überschuss- und Fällschlamm) enthält i. d. R. 55 bis 75 Ma.-% organische Trockensubstanz und ca. 45 bis 25 Ma.-% Inertmaterial (Asche). Der Heizwert der Trockensubstanz beträgt dementsprechend $h_{u,TS} \approx 12$ MJ/kg bis $h_{u,TS} \approx 18$ MJ/kg. In der **Abbildung 1** sind die Heizwerte der Trockensubstanz auf der Abszisse beispielhaft eingetragen ($\xi_{H2O} = 0$).

Je nach Wassergehalt verringert sich der Heizwert dann um die zugehörige Verdampfungsenthalpie. Für Schlämme mit einem Heizwert der organischen Trockensubstanz $h_{u,oTS} \approx 23$ MJ/kg, einem Aschegehalt von $\xi_{In,TS} = 35$ Ma.-% und einem Wassergehalt von $\xi_{H2O} = 50$ Ma.-% ergibt sich aus dem Diagramm der **Abbildung 1** ein Heizwert von $h_u = 6$ MJ/kg. Mit diesem Heizwert lässt sich für eine Luftzahl von $\lambda = 1{,}6$ eine kalorische Verbrennungstemperatur von $\vartheta_{kal} \approx 1.050$ °C bestimmen (**Abbildung 2**).

Die tatsächliche Feuerraumtemperatur ist aufgrund der Verluste und bei Wärmeauskopplung im Feuerraum entsprechend niedriger. Aus den **Abbildungen 1 und 2** ist zu erkennen, dass bei Schlämmen mit hohem Wassergehalt sich entsprechend niedrige Heizwerte ergeben, die dann geringe Verbrennungstemperaturen zur Folge haben. Bei Schlämmen mit hohen Wassergehalten müssen dann entsprechende verfahrenstechnische Maßnahmen, wie Wärmerückgewinnung usw. angewendet werden.

Die Angaben zu Heizwert, Asche- und Wassergehalt eines Klärschlammes allein reichen zur Beurteilung des energetischen Nutzens nicht aus. Ein in der Praxis üblicher Rohschlamm, mit einem Aschegehalt von z. B. $\xi_{In,TS} = 35$ Ma.-%

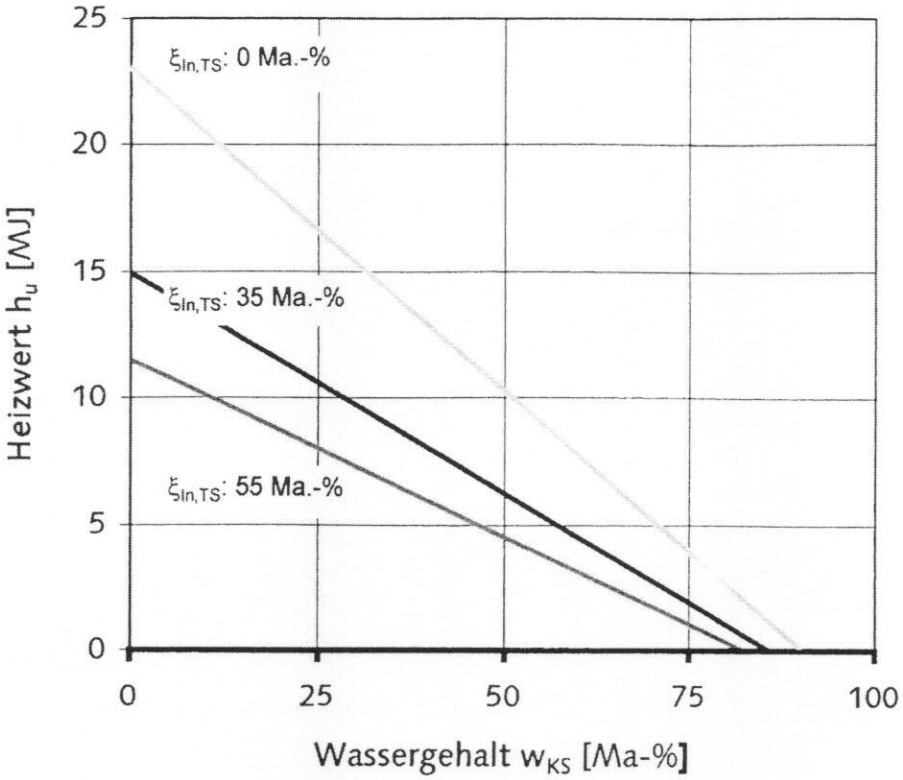


Abbildung 1: Heizwert, Wassergehalt und Inertanteil

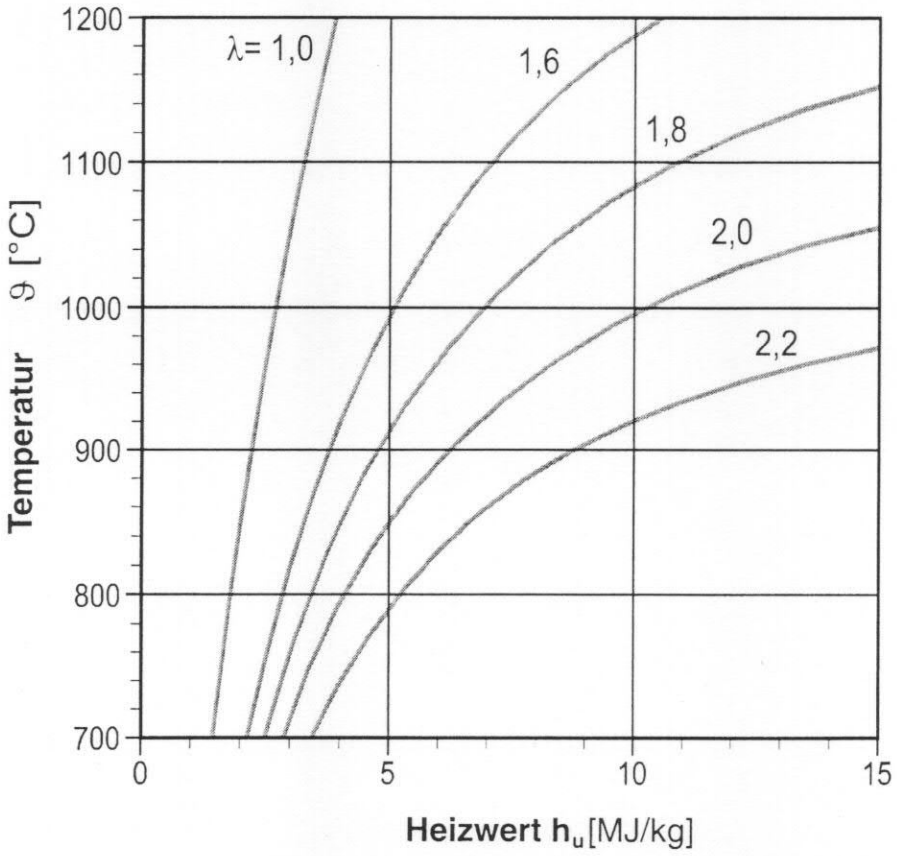


Abbildung 2: Heizwert und kalorische Verbrennungstemperatur

und einem Wassergehalt von ξ_{H2O} = 95 Ma.-% weist rein rechnerisch einen negativen Heizwert auf. Dennoch kann dieser Rohschlamm mit geeigneten Verfahren zunächst der mechanischen Wasserabtrennung, der Trocknung und Verbrennung mit entsprechender Wärmerückgewinnung energetisch genutzt werden. Hierauf wird weiter unten noch anhand eines Beispieles eingegangen.

2.2 Verfahrensketten der Schlammbehandlung

Die unbehandelten Rohschlämme aus der Abwasserbehandlung müssen vor ihrer Verwertung oder Entsorgung aufbereitet werden. Dies erfolgt in einzelnen Verfahrensstufen, welche im wesentlichen die Grundoperationen Wasserabtrennung und die Stabilisierung beinhalten. Die Wasserabtrennung ist, mit unterschiedlichen Anforderungen an den Restwassergehalt, fester Bestandteil aller Verfahrensketten. Eine Stabilisierung der Schlämme ist dagegen nur bei bestimmten Verwertungs- und Entsorgungszielen erforderlich.

Ziel der Stabilisierung ist die Verringerung der Fäulnisfähigkeit durch Abbau organischer Stoffe bei gleichzeitiger Reduzierung der Feststoffmasse. Die Schlämme können anaerob oder aerob stabilisiert werden. Mit der anaeroben Stabilisierung (Faulung) werden hochmolekulare organischen Verbindungen des Rohschlammes zu niedermolekularen Verbindungen und Faulgas abgebaut. In Abhängigkeit vom Abbaugrad verringert sich der Heizwert der Trockenmasse $h_{u,TS}$ um bis zu 40 % (s. a. **Abbildung 1**). Das anfallende Faulgas besteht i. M. aus 40 Ma.-% CH_4 und 60 Ma.-% CO_2 [1] und hat einen Heizwert von $h_u \approx 20$ MJ/kg. Es wird in mittleren und großen Kläranlagen in s. g. Blockheizkraftwerken (BHKW) mittels Kraft-Wärme-Kopplung (K-W-K) mit einem Gesamtwirkungsgrad von bis zu $\eta_{BHKW} \approx 90\,\%$ in elektrische Energie und Wärmeenergie umgewandelt.

Aerobe Stabilisierungsverfahren bauen einen Teil der organischen Trockenmasse des Rohschlammes unter Sauerstoffverbrauch (i. d. R. Luftsauerstoff) zu CO_2 und Wasser ab. Für die Sauerstoffversorgung wird elektrische Energie verbraucht, ohne dass ein energetischer Nutzen aus den Abbauvorgängen gewonnen werden kann. Der Einsatz aerober Stabilisierungsverfahren findet daher nur bei kleinen Anlagen, in denen anaerobe Verfahren unrentabel sind, Anwendung.

Grundsätzlich sind, wie auch aus **Abbildung 1** ersichtlich ist, stabilisierte Schlämme heizwertärmer als die entsprechenden Rohschlämme.

Verfahren zur Wasserabtrennung sind die Eindickung, die maschinelle Entwässerung und die Trocknung. Die statische oder maschinelle Eindickung wird in der Regel vor und nach der Stabilisierung, sowie vor einer landwirtschaftlichen Nassschlammverwertung eingesetzt. Die Schlämme werden, je nach angewendeten Verfahren und geplanter Weiterverarbeitung, auf Wassergehalte zwischen 98 und 90 Ma-% eingedickt. Durch maschinelle Entwässerungsverfahren (Filtration oder Zentrifugation) kann der Wassergehalt auf 65 bis 80 Ma.-% verringert werden. Eine autarke Verbrennung ohne Zusatzbrennstoff und Maßnahmen der Wärmerückgewinnung, ist damit aber nur unter optimalen Be-

[1] Daneben ist u. a. H_2S in geringen Anteilen enthalten.

dingungen möglich[2]. In den meisten Fällen wird deshalb als zusätzliche Verfahrensstufe eine Trocknung (integriert oder extern) betrieben und der Wassergehalt auf 60 bis < 10 Ma.-% reduziert.

Am Ende der betrachteten Verfahrensketten zur energetischen Nutzung von Klärschlämmen steht häufig die Verbrennung[3].

In der Verbrennung wird die chemische Enthalpie der organischen Trockenmasse durch Reaktion mit Sauerstoff freigesetzt und aus Wasser hochgespannten Dampf erzeugt. Der Dampf kann an industrielle Abnehmer abgegeben, oder mittels Dampfturbine und Generator in elektrische Energie umgewandelt werden.

In **Tabelle 1** sind ausgewählte Verfahrensketten der Schlammbehandlung zusammengestellt. Die Aufteilung der Verfahrensketten in die Grundbausteine Faulung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung ermöglicht eine systematische Darstellung. Man kann grob u. a. in Verfahrensketten mit und ohne Faulung, mit und ohne Trocknung am Standort oder extern unterscheiden.

Tabelle 1: **Verfahrensketten der Schlammbehandlung (Auswahl)**

	Verfahrensstufen am Standort der Kläranlage				Außerhalb der Kläranlage	
	Faulung	Entwässerung	Trocknung	Verbrennung	Trocknung	Verbrennung
1	X	X	X	X		
2	X	X	X			X
3	X	X		X		
4	X	X			X	X
5		X	X	X		
6		X		X		
7		X	X			X
8		X			X	X

Für die unterschiedlichen Verfahrensketten sind unterschiedliche energetische Nutzen zu erwarten. Wie hoch der energetische Nutzen der Verfahrensketten im einzelnen ist, und welche Verfahrenskette im Vergleich zu anderen den größeren energetischen Nutzen erzielt, kann nur mittels Stoff- und Energiebilanzen der betreffenden Verfahrensketten, unter Berücksichtigung der konkreten Klärschlammeigenschaften und der örtlichen Randbedingungen ermittelt werden. Die Grundsätze für eine Gesamtbilanzierung werden in Abschnitt 2.3 erläutert.

---

[2] Um eine Verbrennungstemperatur von > 850°C bei 2 sec. Mindestverweilzeit sicher einhalten zu können, ist eine kalorische Temperatur von ca. 1.000 °C erforderlich.

[3] Schliesst Pyrolyse und Vergasung als Vorstufen ein. Andere Verfahren, wie Nassoxidation werden hier nicht weiter betrachtet.

3.0 Grundlagen der Bilanzierung und Bewertung für Verfahren und Verfahrensketten

3.1 Bilanzierung

Vor der Bilanzierung müssen geeignete Bilanzräume festgelegt, und die wesentlichen Stoff- und Energieströme der Prozesse erfasst werden. Grundlage für die Festlegung der Bilanzräume stellt eine Aufteilung der Verfahrensketten in die Grundbausteine (systematische Darstellung in **Tabelle 1**) dar.

Für eine Stoff-, Massen- und Energiebilanzierung über die Grundbausteine – Faulung – Entwässerung – Trocknung – Verbrennung werden folgende Bilanzräume ausgewählt:

- Der **Bilanzraum KA** erfasst die Schlammbehandlung der Kläranlage, einschließlich Faulgasverwertung und Gebäudeheizung.
- In Fall einer Standorttrennung von Schlammbehandlung und Verbrennung wird ein zusätzlicher Bilanzraum für die Verbrennungsanlage erforderlich (**Bilanzraum V**).
- Der Gesamtprozess der Verfahrenskette sollte auch die energetischen Aufwendungen für die Transporte zur Verbrennungsanlage berücksichtigen (**Bilanzraum G**). Befindet sich die Verbrennungsanlage am Standort der Kläranlage sind die Bilanzräume KA und G identisch.
- Für die energetische Gesamtbewertung wird ein zusätzlicher **Bilanzraum E** gebildet, welcher die Vorketten zur Bereitstellung von elektrischer Energie, Dampf, Wärme und Zusatzbrennstoffen (i. d. R. Heizöl oder Erdgas) erfasst (s. a. Abschnitt 3.2).

Eine Übersicht über die Bilanzräume sowie die wesentlichen Energie- und Stoffströme gibt **Abbildung 3**.

Bei der Bilanzierung der Stoffströme müssen die Elemente C, H, O, N, P, S und die anorganische Trockenmasse (Asche) Berücksichtigung finden. Die jeweiligen Massenströme der Bilanzräume ergeben sich aus der Summe der einzelnen Stoffströme. Im Rahmen der Energiebilanz müssen die an die Masse gebundenen Enthalpien (physikalische und chemische Energie), die elektrische Energie und die Wärmeenergie erfasst werden.

Die **Abbildungen 4 und 5** zeigen das Bilanzschema für eine vereinfachte Stoff- und Energiebilanz der anaerob-mesophilen Stabilisierung (Faulung).

3.2 Bewertungskennzahlen für das Energiepotenzial

Von den ausgewiesenen Energieströmen am Austritt des Bilanzraumes G (Gesamtsystem der Verfahrenskette nach **Abbildung 3**) können nur die erzeugte elektrische Energie, Prozessdampf und Wärmeenergie als Nutzenergien betrachtet werden. Die Abgas- und Ascheströme werden nicht weiter genutzt und sind als Verluste zu werten.

Die tatsächlich nutzbare Energie ist jedoch häufig geringer. Während in der Schlammbehandlung und -verbrennung nicht benötigte elektrische Energie in das Netz der EVU eingespeist und, zumindest theoretisch, außerhalb der betrachteten Systemgrenzen genutzt werden kann, ist für Prozessdampf und

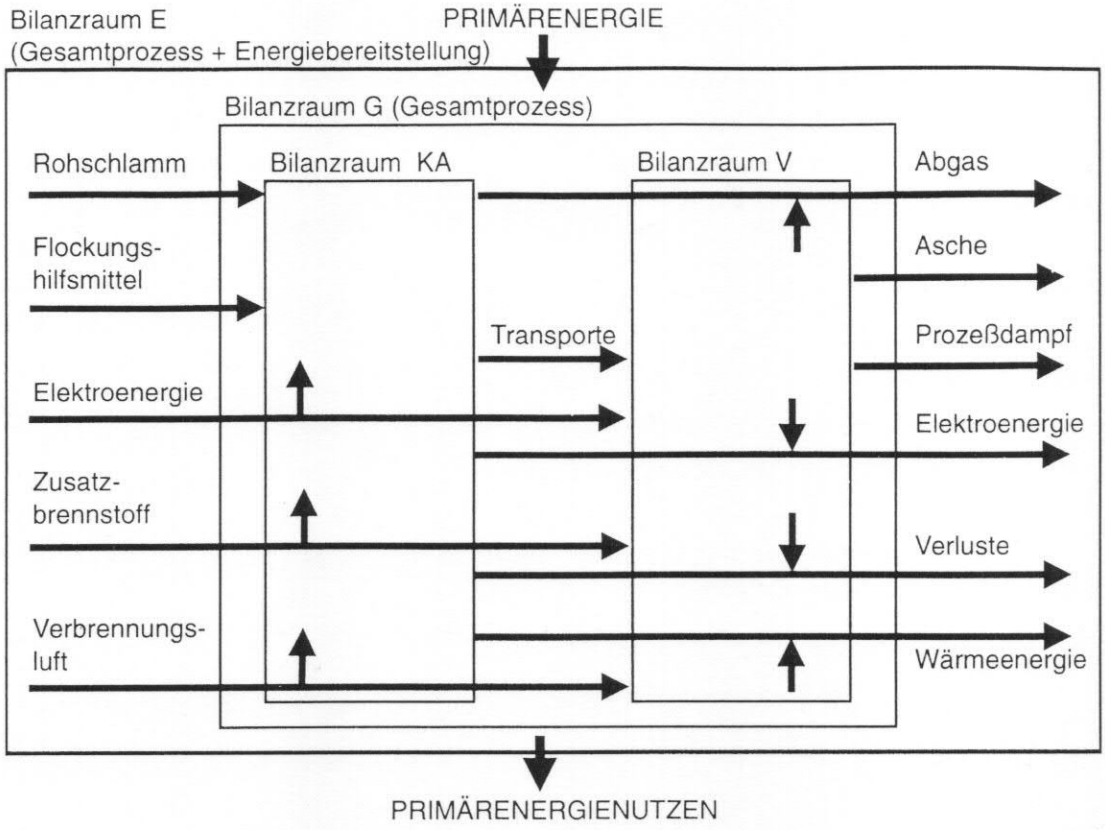
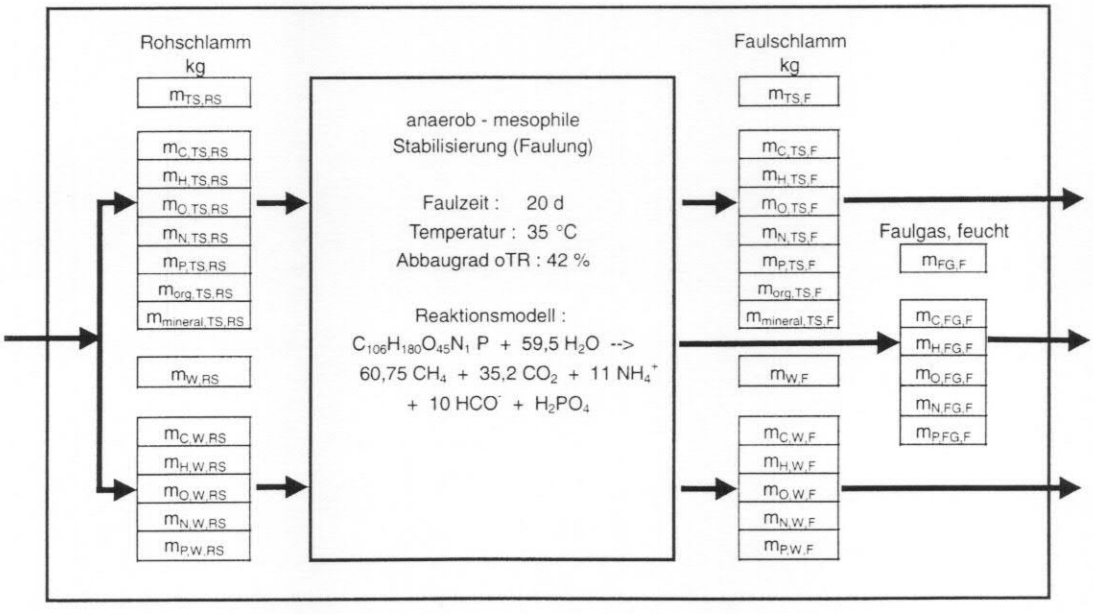


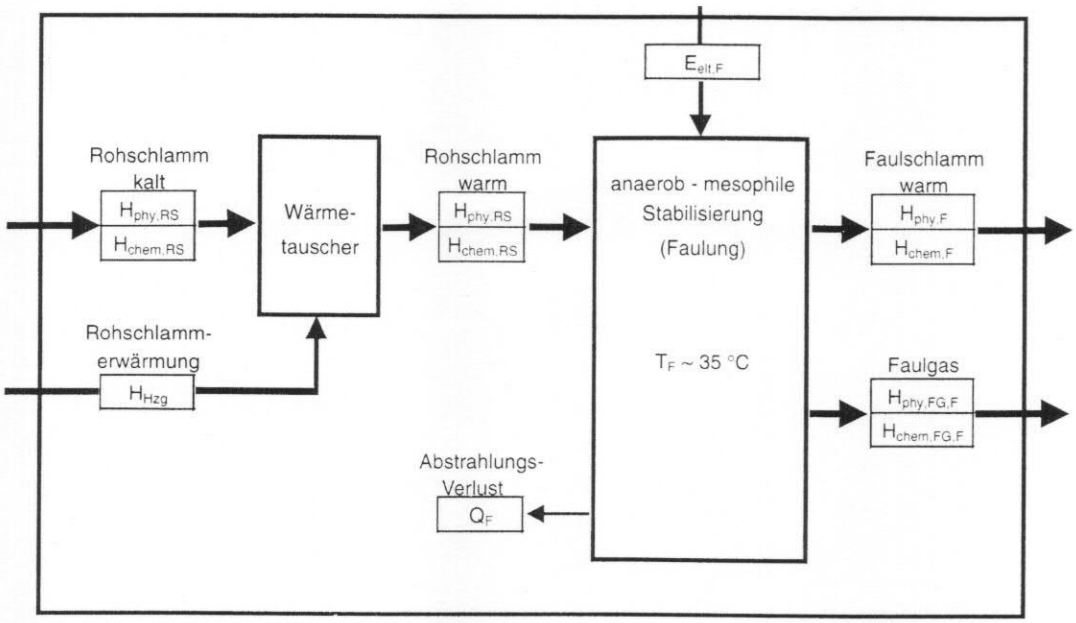
Abbildung 3: Übersicht über die Bilanzräume, Energie-/Enthalpieströme



Massenbilanz: $m_{TS,RS} + m_{W,RS} = m_{TS,F} + m_{W,F} + m_{FG,F}$

Stoffbilanz (z.B. "H"): $m_{H,TS,RS} + m_{H,W,RS} = m_{H,TS,F} + m_{H,W,F} + m_{H,FG,F}$

Abbildung 4: Vereinfachte Stoffbilanz der Faulung



Energiebilanz: $H_{phy,RS} + H_{chem,RS} + H_{Hzg} = H_{phy,F} + H_{chem,F} + H_{phy,FG} + H_{chem,FG} + Q_F$

Abbildung 5: Vereinfachte Energiebilanz der Faulung

Wärmeenergie eine Nutzung außerhalb der Anlagen nicht immer möglich. In der Praxis muss ein Teil davon ständig oder zeitweise über Notkühleinrichtungen ohne Nutzen an die Umgebung abgegeben werden.

Der nutzbaren Energie steht ein Energiebedarf für die Verfahrenskette in Form von elektrischer Energie und Zusatzbrennstoff gegenüber (Eintritt).

Will man den energetischen Gesamtnutzen ermitteln, muss die Differenz zwischen dem eintreter den Energiebedarf und dem austretenden Energienutzen (Nettoenergienutzen) gebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Energieformen *elektrische Energie, Prozessdampf und Wärmeenergie* sowie die Enthalphie der Zusatzbrennstoffe von unterschiedlicher Wertigkeit sind.

Mit Hilfe von Primärenergiefaktoren, welche die Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie erfassen, können die genannten Energieformen auf eine vergleichbare Basis umgerechnet werden.

In [4] werden für die Bundesrepublik Deutschland folgende, durchschnittliche Primärenergiefaktoren $f_{p,i}$ angegeben:

- elektrische Energie $f_{p,elt} = 3,0$
- Wärmeenergie aus fossilen Brennstoffen $f_{p,W} = 1,3$
- Zusatzbrennstoffe (Heizöl, Erdgas) $f_{p,Z\text{-}BS} = 1,1$

Nach Verrechnung der auf Primärenergiebasis umgerechneten Netto-Energieströme, empfiehlt sich der Bezug auf die zugeführten Feststoffe im Rohschlamm. Im Ergebnis erhält man den spezifischen Primärenergienutzen $e_{Nutz\text{-}PE}$ für den bilanzierten Gesamtprozess, oder den Primärenergieaufwand (bei negativer Gesamtenergiebilanz).

$$e_{Nutz\text{-}PE} = [(E_{elt,OUT} - E_{elt,IN}) \cdot f_{p,elt} + H_{W,OUT} \cdot f_{p,W} - H_{Z\text{-}BS,IN} \cdot f_{p,Z\text{-}BS}] / m_{T,RS}$$

$E_{elt,OUT}$	Gewinn an elektrischer Energie
$E_{elt,IN}$	Bedarf an elektrischer Energie
H_W	Enthalpie der abgegebenen Wärmeenergie / Prozessdampf
$H_{Z\text{-}BS}$	Enthalpiebedarf an Zusatzbrennstoff
$m_{T,RS}$	Feststoffe im Rohschlamm [kg]

Mit dem spezifischen – auf die Feststoffmasse im Rohschlamm bezogenen – Primärenergienutzen, wird die durch die betrachtete Verfahrenskette substituierte Primärenergie beschrieben.

Aufbauend auf der hier vorgestellten Methodik wurde ein Berechnungsmodell zur Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen bei der Klärschlammbehandlung und -verbrennung entwickelt, welches die wesentlichen Verfahrensparameter abbildet.

4.0 Beispiel für Gesamtbilanzen von Verfahrensketten

Das Berechnungsmodell wurde für eine vergleichende energetische Bewertung von ausgewählten Verfahrensketten der Klärschlammbehandlung angewendet und ist in [5] näher beschrieben. Im folgenden wird hier nur auf die wesentlichen verfahrenstechnischen Parameter, die gewählten Konzepte zur Energienutzung und die Berechnungsergebnisse eingegangen.

4.1 Untersuchte Verfahrensketten

Für das Beispiel wird ein auf 5 % Trockenrückstand voreingedickter „Modell-Rohschlamm" gewählt, welcher als repräsentativ für eine kommunale, mechanisch-biologischen Kläranlage mit Denitrifikation und biologisch/chemischer Phosphor-Elimination gelten kann.

- spezifischer TR-Anfall 0,085 kg TR/(EW · d)
- organischer Anteil der Trockenmasse 58 %
- Heizwert der Trockenmasse h_U = 13,3 MJ/kg TR

In **Tabelle 2** sind die untersuchten Verfahrensketten zusammengestellt.

Tabelle 2: **Untersuchte Verfahrensketten**[4]

	am Standort der Kläranlage			außerhalb der Kläranlage	
Verfahrensketten	Faulung (F)	Entwässerung (E)	Trocknung (Tr)	Trocknung (Tr)	Verbrennung (V)
F – E – Tr / V	X	X	X		X
F – E / Tr – V	X	X		X	X
E – Tr / V		X	X		X
E / Tr – V		X		X	X
E / V		X			X

[4] Das Zeichen " / " symbolisiert die Standorttrennung zwischen Kläranlage und Verbrennung

4.2 Kurzbeschreibung der Verfahrensstufen

4.2.1 Verfahrenstechnische Konzepte

Tabelle 3 enthält die für die Ergebnisinterpretation wesentlichen Parameter. Eine ausführliche Beschreibung der untersuchten Verfahrensstufen ist in [5] enthalten.

Tabelle 3: **Wesentliche Parameter der untersuchten Verfahrensstufen**

Verfahrensstufe	Wesentliche Parameter
Anaerob-mesophile Stabilisierung (Faulung)	Faulzeit 20d, Temperatur 35°C, oTR-Abbau = 42 %, Reaktionsmodell: erweiterte Buswell'sche Gleichung: $C_{106}\ H_{180}\ O_{45}\ N_{11}\ P + 59{,}5\ H_2O \rightarrow$ $60{,}75\ CH_4 + 35{,}2\ CO_2 + 11\ NH_4^+ + 10\ HCO_3^- + H_2PO_4$
Blockheizkraftwerk	Wirkungsgrade η: $\eta_{elektrisch}$ 32 %, $\eta_{therm.,\ HT\text{-}Abgasabwärme}$: 22,5 %, $\eta_{therm.,\ NT\text{-}Motorabwärme}$: 32,5 %
Nacheindickung/ Entwässerung	Entwässerung mit Dekanterzentrifuge, (Faulschlamm auf 28 % TR, Rohschlamm auf 26 % TR), Energiebedarf ca. 2,0 kWh/m³, Konditionierung mit organischen Flockungshilfsmitteln (Polyelektrolyte)
Klärschlamm-Trocknung	am Standort Kläranlage: Teiltrocknung auf 42 % TR, am Standort Verbrennung: Volltrocknung auf > 90 % TR, Energiebedarf: ca. 80 kWh / Tonne Wasserverdampfung
Klärschlamm-verbrennung	Monoverbrennung in der Wirbelschicht, Verbrennungstemperatur ≥ 870°C, Luftüberschuss λ = 1,3; elektrischer Energiebedarf: Verbrennung 14kWh/MW_{therm}, Abgasreinigung 15 kWh/1.000 m^3_N Abgas
Dampfturbine/ Generator	Wirkungsgrad für die Umwandlung von Dampf in elektrische Energie: 30 %

4.2.2 Energienutzungskonzepte

Energienutzung am Standort der Kläranlage

Die chemische Enthalpie des Faulgases wird im Blockheizkraftwerk in Wärmeenergie und elektrische Energie umgewandelt. Mit der Wärmeenergie kann der Bedarf für die Faulbehälter- und Gebäudeheizung vollständig abdeckt werden [5]. Eine Abgabe von überschüssiger Wärmeenergie an externe Verbraucher ist nur unter bestimmten Randbedingungen wirtschaftlich darstellbar und wird deshalb hier nicht in Ansatz gebracht. Dagegen kann der Überschuss an elektrischer Energie für den Bilanzraum Kläranlage als Gewinn verbucht[6], und in der Gesamtenergiebilanz mit dem Bedarf verrechnet werden.

---

[5] Bei sachgerechter Dimensionierung der Schlammbehandlung und der zu beheizenden Gebäude ist ein wärmeautarker Betrieb von Kläranlagen möglich (Dichtl [6]). In den Sommermonaten anfallende Überschusswärme wird als Verlust gebucht

[6] Der Bilanzkreis Kläranlage enthält nur die Schlammbehandlung und die Gebäude, ohne Abwasserbehandlung und Voreindickung

Befindet sich zusätzlich eine Trocknungsanlage in der Kläranlage (Variante F-E-Tr / V) ist es energetisch vorteilhafter, die Wärme aus dem Abgasstrom des BHKW separat auszukoppeln und für die Trocknung zu nutzen. Damit muss nur noch ein Teil der erforderlichen Wärmeenergie für den Betrieb der Trocknung in Form von Zusatzbrennstoff bereitgestellt werden. Die Energie aus einer Brüdenkondensation kann im Wärmeverbund der Kläranlage für die Beheizung der Faulbehälter und der Gebäude genutzt werden. Den verbleibenden Teil der Wärme kann man für die Faulschlammerwärmung vor der Entwässerung einsetzen.

Die Variante ohne Faulung mit Trocknung am Standort Kläranlage (Variante E-Tr / V) benötigt für die Trocknung Zusatzbrennstoff. Der Wärmebedarf für die Gebäudeheizung kann z. B. durch eine Brüdenkondensation vollständig abgedeckt, die verbleibende Niedertemperaturwärme (NT-Wärme) zur Erwärmung des Rohschlammes vor der Entwässerung verwendet werden. Elektrische Energie muss als Fremdenergie bezogen werden.

Bei den Varianten ohne Faulung und ohne Trocknung am Standort Kläranlage (Varianten E / Tr-V und E / V) muss die Gebäudeheizung über Energieumwandlung von Zusatzbrennstoff erfolgen. Nutzbare Energie fällt bei diesen Varianten in der Kläranlage nicht an.

Energienutzung am Standort der Verbrennung

Im Interesse eines möglichst hohen Primärenergienutzungsgrades wird im Beispiel eine vollständige Nutzung des erzeugtes Dampfes für die Verstromung angesetzt und keine Abgabe von Prozessdampf betrachtet. Auf eine Auskopplung von Dampf zur Trocknerheizung wird ebenfalls 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 für die Trocknung erforderliche Energie wird am Verbrennungsstandort über eine mechanische Brüdenkompression unter Einsatz von elektrischer Energie bereitgestellt.

4.3 Berechnungsergebnisse der Energiebilanz

Im folgenden werden nur die Ergebnisse der Energiebilanz für die Bilanzräume G und E vorgestellt. Die auf die Rohschlamm-Trockenmasse bezogenen Energieströme für den Bilanzraum G sind in **Tabelle 4** zusammengestellt. In der letzten Zeile der Tabelle wird der Primärenergienutzen (Bilanzraum E) der Verfahrensketten angegeben.

Tabelle 4: **Ergebnisse der Energiebilanzierung**

[MJ/kg TS_{RS}]		F-E / Tr-V	F-E-Tr / V	E / Tr-V	E-Tr / V	E / V
$e_{Elt,In}$	Elektroenergie, Eintritt	1,36	0,93	1,64	1,01	0,88
$e_{Elt,Out}$	Elektroenergie, Austritt	3,34	2,56	3,01	2,02	1,55
h_{RS}	Rohschlamm (TS)	14,52	14,52	14,52	14,52	14,52
h_{FHM}	Flockungshilfsmittel	0,24	0,24	0,31	0,31	0,31

[MJ/kg TS_{RS}]		F-E / Tr-V	F-E-Tr / V	E / Tr-V	E-Tr / V	E / V
$h_{Z\text{-}BS}$	Zusatzbrennstoffe	0,00	1,81	0,42	4,61	3,79
$h_{V\text{-}L}$	Verbrennungsluft	0,05	0,05	0,09	0,09	0,11
h_{AbL}	Abgas	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
$e_{Nutz\text{-}PE}$	$= (e_{Elt,Out} - e_{Elt,In}) * 3,0 - h_{Z\text{-}BS} * 1,1$	**5,95**	**2,91**	**3,64**	**-2,05**	**-2,18**

Das vereinfachte Bilanzschema in **Abbildung 6** enthält die Ergebnisse für die Verfahrenskette mit dem größten Primärenergienutzen (Faulschlammverbrennung mit Trocknung am Standort Verbrennung).

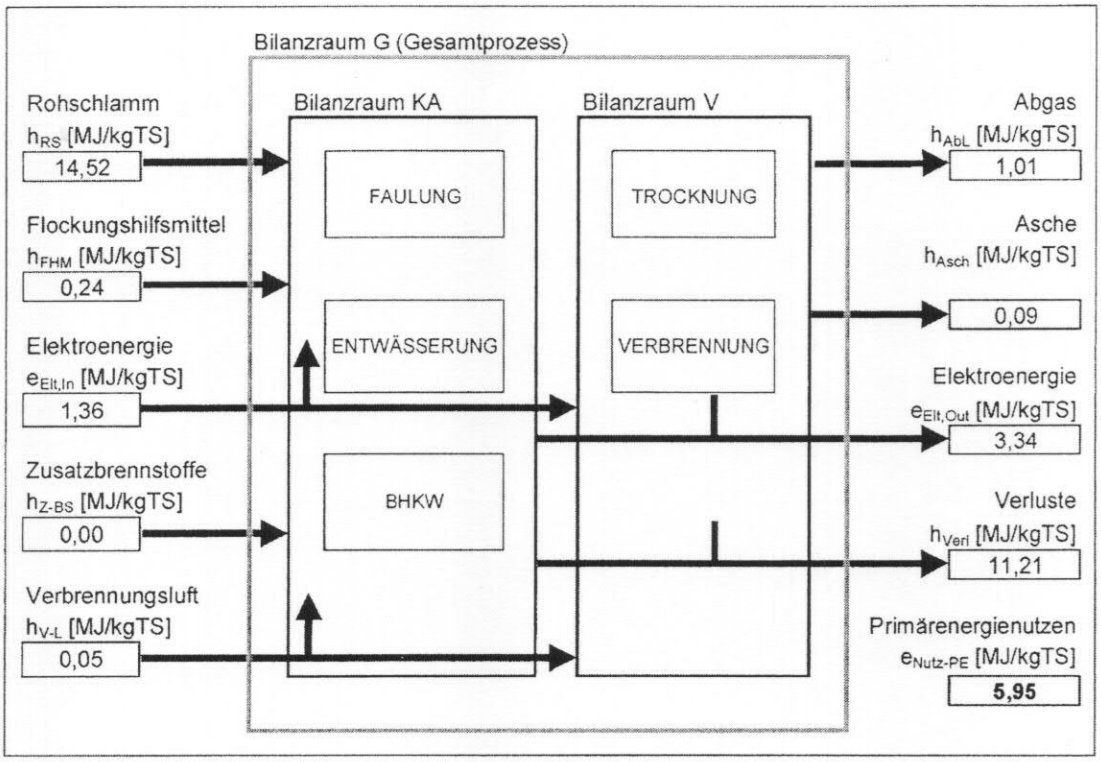


Abbildung 6: vereinfachtes Schema der wesentlichen Energieflüsse für die Verfahrenskette F-E / Tr-V

Der Vergleich der spezifischen Primäreneergienutzen zeigt deutlich, dass bei jeweils gleichem Trocknerstandort, die Faulschlammverbrennung stets einen höheren Primärenergienutzen erzielt als die Rohschlammverbrennung:

$e_{Nutz\text{-}PE}$ (F-E / Tr-V) = 5,95[7] > $e_{Nutz\text{-}PE}$ (E / Tr-V) = 3,64

> >

$e_{Nutz\text{-}PE}$ (F-E-Tr / V) = 2,91 > $e_{Aufwand\text{-}PE}$ (E-Tr / V) = −2,05[8]

$e_{Aufwand\text{-}PE}$ (E / V) = −2,189

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.

Die Rohschlammverbrennung ohne Trocknung (Variante E / V) kann unter den angesetzten Randbedingungen nicht autark 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 E-Tr / V) dar. In beiden Fällen muss Primärenergie aufgewendet werden, um den Schlamm entsprechend zu behandeln (Entsorgung).

Da die örtlichen Gegebenheiten die Ergebnisse selbstverständlich beeinflussen, 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.

5.0 Zusammenfassung

Das hier aufgeführte Beispiel der Bilanzierung von unterschiedlichen Verfahrensketten zur Behandlung eines Rohschlammes zeigt deutlich, dass der energetische Nutzen nicht allein aus den Eigenschaften des Rohschlammes (Heizwert, Wassergehalt, Aschegehalt) abgeleitet werden kann. Je nach Verfahrenskombination der Gesamtkette ergeben sich für ein und denselben Rohschlamm ganz unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Energienutzung bzw. des Energieaufwandes. Man findet Verfahrensketten mit positiven Ergebnis, d. h., einem Netto-Energienutzen und Verfahren mit negativem Ergebnis, d. h., Netto-Energieaufwand für die Behandlung.

Der aus der Klärschlammbehandlung erzielbare Nutzen oder der erforderliche Aufwand sind daher nur aus den Eigenschaften des Rohschlammes in Verbindung mit einer kumulierten Bilanzierung der Verfahrenskette, auch unter Einbeziehung der externen Verluste der Energiebereitstellung, z. B. im Kraftwerk, zu beurteilen. Grundlage für eine solche Beurteilung ist zunächst die systematische Beschreibung der Verfahrensketten mit Hilfe von Grundbausteinen (z. B. Faulung, Entwässerung, Trocknung, Verbrennung) und die einheitliche Festlegung von Bilanzgrenzen, sowie die Erfassung der ein- und austretenden Stoff- und Energieströme.

---

[7] [MJ / kg TS]

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

Mit Hilfe der Bilanzmodelle besteht nun über die Beurteilung hinaus die Möglichkeit, Parametervariationen für einzelne Verfahrensketten im Hinblick auf eine Optimierung durchzuführen.

6.0 Literatur

[1] Esch, B.; Loll. U. (2001):
Aktuelle Klärschlammmengen und -qualitäten sowie Entsorgungswege in Deutschland, in: KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2001,) Heft 11, S. 1594–1601

[2] Thomé-Kozmiensky, K. J. (1998): Klärschlammentsorgung. Enzyklopädie der Kreislaufwirtschaft, Neuruppin 1998

[3] Meyer, J. U. (1997): Energetische Aspekte der thermischen Behandlung von Klärschlamm, in: „Klärschlammbehandlung und -entsorgung. Erfahrungen und Perspektiven", 12. Seminar der Zentralstelle für Weiterbildung an der Technischen Universität Braunschweig, vom 18.–19.9.97 in Braunschweig

[4] DIN V 4701-10 (2001): Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen, Teil 10

[5] Beckmann, M.; Baumann, A.; von Gynz-Rekowski, B. (2001):
Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Roh- und Faulschlamm, in: „Aktuelle Ansätze bei der Klärschlammbehandlung und -entsorgung", 12. Gemeinsames Seminar – Abwassertechnik –, vom 05.09.–06.09. 2001 in Weimar,
Hrsg. Verein zur Förderung des Instituts *WAR* Wasserversorgung (Abwassertechnik (Abfalltechnik (Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt (Schriftenreihe *WAR* 132) Darmstadt 2001, S. 157ff.

[6] Dichtl, N. (2000): Schlammbehandlung und Energie, in: Tagungsunterlagen der 1. ATV-DVWK-Energietage, vom 23.05.–24.05. 2000 in Bielefeld