

Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm

Michael Beckmann

1 Einleitung

Für die thermische Behandlung von Klärschlamm stehen eine Reihe von Konzepten und Verfahren zur Verfügung. Will man diese im Hinblick auf einen Vergleich bewerten, so sind u.a. verfahrenstechnische Bilanzierungen – Stoff-, Massen- und Energiebilanzen – ein wichtiges Hilfsmittel. Je nach Konzept und Verfahren ergeben sich 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.

2 Betrachtete Verfahrensketten der Rohschlammbehandlung

Die unbehandelten Rohschlämme werden vor einer Verbrennung i.d.R. zunächst weiter aufbereitet. Hierfür kommen Verfahren der Stabilisierung, der mechanischen Entwässerung und der Trocknung zum Einsatz.

Die Stabilisierung ist nur bei bestimmten Verwertungs- und Entsorgungszielen erforderlich, sie kann anaerob oder aerob erfolgen. Bei der anaeroben Stabilisierung werden organische Substanzen des Rohschlammes unter Sauerstoffabschluss abgebaut, der Heizwert des Schlammes verringert sich entsprechend und es entsteht Faulgas, das entsprechend aufbereitet energetisch genutzt werden kann. Bei aeroben Verfahren wird ein Teil der organischen Substanz mit Sauerstoff abgebaut, d.h. der Heizwert verringert sich ebenfalls, allerdings ohne energetischen Nutzen aus dem Abbauvorgang.

Die Wasserabtrennung ist, mit unterschiedlichen Anforderungen an den Restwassergehalt, fester Bestandteil aller Behandlungskonzepte.

Verfahren zur Wasserabtrennung sind die Eindickung, die maschinelle Entwässerung und die Trocknung. Die statische oder maschinelle Eindickung wird in der Regel vor oder nach der Stabilisierung, sowie vor einer landwirtschaftlichen Nassschlammverwertung eingesetzt. Die Schlämme werden, je nach angewendeten Verfahren und geplanter Weiterverarbeitung, auf Wassergehalte zwischen 98 Ma.-% und 90 Ma.-% eingedickt. Durch maschinelle Entwässerungsverfahren (Filtration und Zentrifugation) kann der Wassergehalt auf 65 Ma.-% bis 89 Ma.-% verringert werden. Eine autarke Verbrennung, ohne Zusatzbrennstoff und Maßnahmen der Wärmerückgewinnung, ist damit aber nur unter optimalen Bedingungen möglich¹. In den meisten Fällen wird deshalb als zusätzliche Verfahrensstufe eine Trocknung (integriert oder extern) betrieben und der Wassergehalt auf 60 Ma.-% bis < 10 Ma.-% reduziert.

Am Ende der betrachteten Verfahrensketten zur energetischen Nutzung von Klärschlämmen steht häufig die Verbrennung². In der Verbrennung wird die chemische Enthalpie der organischen Trockensubstanz durch Reaktion mit Sauerstoff freigesetzt und aus dem Wasser hochgespannter Dampf erzeugt. Der Dampf kann an industrielle Abnehmer abgegeben, oder mittels Dampfturbine und Generator in elektrische Energie umgewandelt werden.

In Tab. 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.

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 Klärschlammigenschaften und der örtlichen Randbedingungen ermittelt werden.

Tab. 1: Untersuchte Verfahrensketten³.

Verfahrensketten	am Standort der Kläranlage			außerhalb der Kläranlage	
	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

¹ Um eine Verbrennungstemperatur von > 850 °C bei 2 s Mindestverweilzeit sicher einzuhalten zu können ist eine kalorische Temperatur von ca. 1000 °C erforderlich.

² Schließt Pyrolyse und Vergasung als Vorstufen ein. Andere Verfahren, wie Nassoxidation werden hier nicht weiter betrachtet.

³ Das Zeichen „/“ symbolisiert die Standorttrennung zwischen Kläranlage und Verbrennung.

Referent: Michael Beckmann, TU Dresden, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung | Vortrag: Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm

3 Randbedingungen für die Bilanzierung

Für die Bilanzierung müssen zunächst geeignete Bilanzräume festgelegt und die wesentlichen Stoff-, Massen- und Energieströme eingetragen werden.

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

- Der **Bilanzraum KA** erfasst die Schlammbehandlung der Kläranlage, einschließlich Faulgasverwertung und Gebäudeheizung.
- Im 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 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.

Eine Übersicht über die Bilanzräume und die wesentlichen Ströme zeigt Abb. 1:

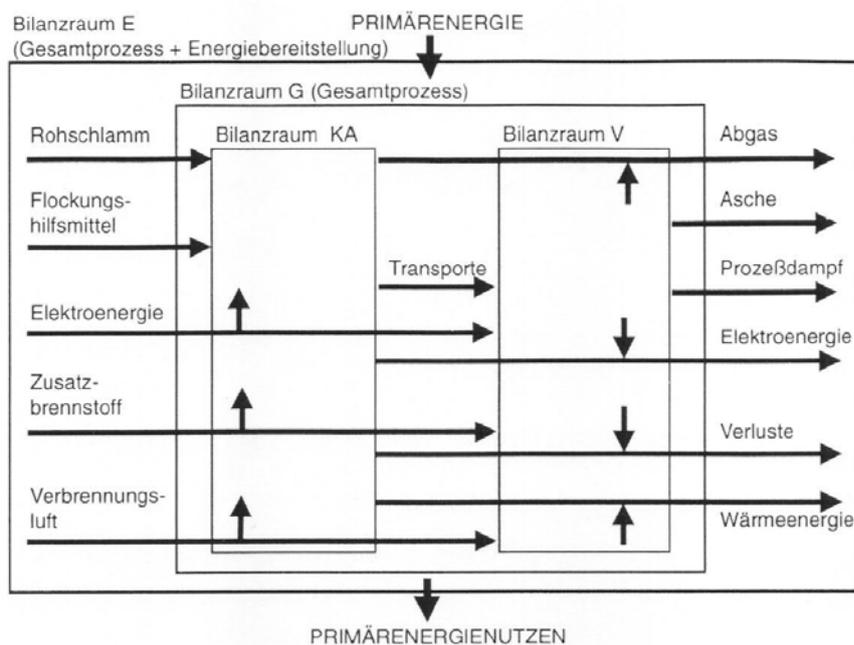


Abb. 1: Übersicht Bilanzgrenzen, Massen- und Energieströme.

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

- Spezifischer Trockenrückstand-Anfall 0,085 kg TR / (EW*d)
- Organischer Anteil der Trockenmasse 58 Ma.-%
- Heizwert der Trockenmasse 13,3 MJ/kg TR

In die Bilanzierung der einzelnen Verfahrensstufen (Tab. 1) sind die in Tab. 2 zusammengefassten Parameter eingeflossen.

Tab. 2: Wesentliche Parameter der untersuchten Verfahrensstufen [1, 2, 3, 4].

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 : $\eta_{\text{elektrisch}}$ 32 %, $\eta_{\text{therm., HT-Abgasabwärme}}$ 22,5 %, $\eta_{\text{therm., NT-Motorabwärme}}$ 32,5 %
Nacheindickung/ Entwässerung	Entwässerung mit Dekanterzentrifuge, (Faulschlamm auf 28 % TR, Rohschlamm auf 26 % TR), Energiebedarf ca. 2,0 kWh/m ³ , 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 $\geq 870^\circ C$, Luftüberschuss $\lambda = 1,3$; 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 %

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 abgedeckt werden⁴. 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 verbucht⁵, und in der Gesamtenergiebilanz mit dem Bedarf verrechnet werden.

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 Faulschlamm-Erwärmung vor der Entwässerung einsetzen.

⁴ Bei der Sachgerechten Dimensionierung der Schlammbehandlung und der zu beheizten Gebäude ist ein wärmeautarker Betrieb von Kläranlagen möglich [3]. In den Sommermonaten anfallende Überschusswärme wird als Verlust gebucht.

⁵ Der Bilanzkreis Kläranlage enthält nur die Schlammbehandlung und die Gebäude, ohne Abwasserbehandlung und Voreindickung.

Referent: Michael Beckmann, TU Dresden, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung | Vortrag: Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm

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 Erzeugung 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 erzeugten 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 Ergebnisse

Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der Energiebilanz für die Bilanzräume G und E (vgl. Abb. 1) vorgestellt. Die auf die Rohschlamm-Trockenmasse bezogenen Energieströme für den Bilanzraum G sind in Tab. 3 zusammengestellt. In der letzten Zeile der Tabelle wird der Primärenergienutzen (Bilanzraum E) der Verfahrenskette angegeben.

Das vereinfachte Bilanzschema in Abb. 2 enthält die Ergebnisse für die Verfahrenskette mit dem größten Primärenergienutzen (Faulschlamm-Verbrennung mit Trocknung am Standort Verbrennung).

Tab. 3: Ergebnisse der Energiebilanzen.

[MJ/kg TS _{RS}]		F-E / Tr-V	F-E-Tr / V	E / Tr-V	E-Tr / V	E / V
e _{EIT,in}	Elektroenergie, Eintritt	1,36	0,93	1,64	1,01	0,88
e _{EIT,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
h _{Z-BS}	Zusatzbrennstoffe	0,00	1,81	0,42	4,61	3,79
h _{V-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-PE}	$= (e_{EIT,out} - e_{EIT,in}) \cdot 3,0$ $- h_{Z-BS} \cdot 1,1$	5,95	2,91	3,64	-2,05	-2,18

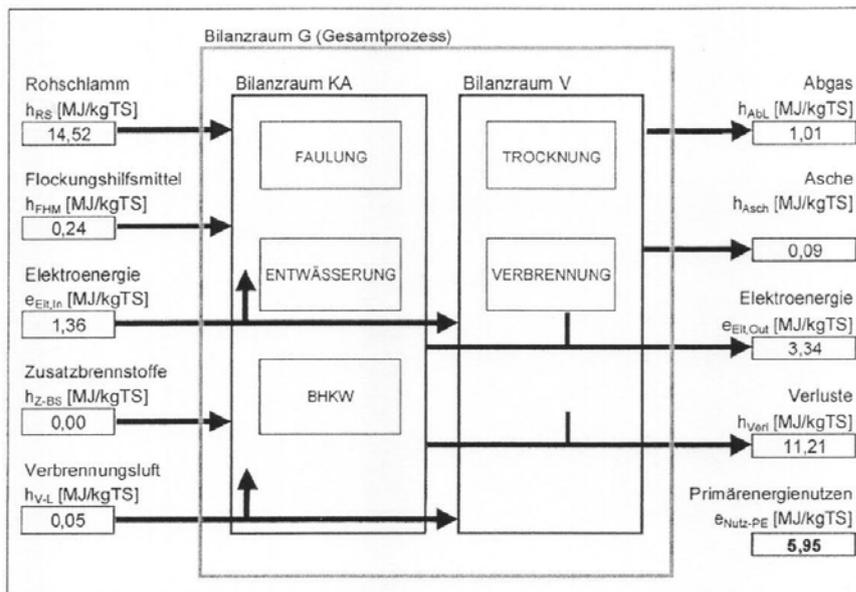


Abb. 2: Vereinfachtes Schema der wesentlichen Energieflüsse für die Verfahrenskette F-E / Tr-V.

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

$$\begin{aligned}
 e_{\text{Nutz-PE}}(F - E / Tr - V) &= 5,95 > e_{\text{Nutz-PE}}(E / Tr - V) &= 3,64 \\
 &> &> &6 \\
 e_{\text{Nutz-PE}}(F - E - Tr / V) &= 2,91 > e_{\text{Aufwand-PE}}(E - Tr / V) &= -2,05 \\
 &> &e_{\text{Aufwand-PE}}(E / V) &= -2,18
 \end{aligned}$$

Betrachtet man den Einfluss des Trocknungsstandortes zeigt sich erwartungsgemäß, dass sich die Varianten mit Trocknung am Standort der Verbrennung energetisch günstiger 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.

⁶ Die Werte sind in MJ/kg Trockensubstanz angegeben. Das negative Vorzeichen weist darauf hin, dass hier kein Nutzen, sondern ein Aufwand für die Behandlung des Schlammes (Entsorgung) erforderlich ist.

5 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 positivem Ergebnis, d.h. 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.

Die in dem vorliegenden Beitrag dargestellten Zusammenhänge sind ausführlicher in [5] und [6] beschrieben.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Roediger, H.; Roediger, M.; Kap, H.: Anaerobe alkalische Schlammfäulung, 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, 1990.
- [2] ATV: ATV-Arbeitsbericht „Maschinelle Schlammmentwässerung“, Korrespondenz Abwasser (42) 1995, Nr. 2
- [3] Dichtl, N. (2000): Schlammbehandlung und Energie. In: Tagungsunterlagen der 1. ATV-DVWK-Energietage vom 23.05.-24.05.2000 in Bielefeld.
- [4] Kriete, B.: Energetische Verwertung in der MVA-Bielefeld-Herford. In: Müllverbrennung von Abfällen – Emissionssituation – Kostensenkungspotentiale in der Entsorgungskette. UTECH Berlin 1998.
- [5] Beckmann, M; Baumann, A.; v. Gynz-Rekowski, B.: Stoff und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Roh- und Faulschlamm. WAR, 12. gemeinsames Seminar: Abwassertechnik, Weimar, September 2001, ISBN 3-932518-28-4.
- [6] Baumann, A.; Beckmann, M.; Gynz-Rekowski, v. B.: Energiepotenzial im Klärschlamm. erschienen in Müll-Handbuch, September 2002, Nr. 3027, Erich Schmidt Verlag.