

1 Einleitung

Bei der biologischen Abwasserreinigung fallen, neben Wasser und gasförmigen Stoffen wie Kohlendioxid und Stickstoff, europaweit mit steigender Tendenz jährlich ca. 7,0 Mio. Tonnen Trockenmasse als Klärschlamm an. Die Behandlung und Entsorgung dieser Schlämme stellen einen nicht unerheblichen Kostenfaktor der Abwasserreinigung dar. Zudem werden in immer mehr Ländern die Entsorgungswege für diese Schlämme durch den Gesetzgeber eingeschränkt, so dass in den nächsten Jahren mit einer weiteren Zunahme der Entsorgungskosten zu rechnen ist. Eine Reduzierung der zu entsorgenden Schlammengen bietet eine Möglichkeit, die Kosten für die Entsorgung zu verringern.

Die im Schlamm enthaltenen Feststoffe bestehen überwiegend aus Mikroorganismen, welche die im Abwasser gelöst und partikulär vorliegenden Verunreinigungen als Substrat nutzen und in Kohlendioxid und neue Biomasse umwandeln. Wurde bisher davon ausgegangen, dass ein Wachstum der Biomasse unumgänglich mit dem Abbau der Verunreinigungen verbunden ist, werden seit ca. 10 Jahren vermehrt verschiedene Verfahren zur Reduzierung des Biomassewachstums im Belebungsbecken der Kläranlagen bei gleichzeitiger Beibehaltung des Abbaus der Verunreinigungen untersucht.

Aus früheren Arbeiten am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik ist bekannt, dass durch eine mechanische Beanspruchung die Struktur der im Schlamm enthaltenen Feststoffe deutlich verändert werden kann. Dies reicht von einer Reduzierung der Partikelgröße der zumeist in losen Flockenverbänden organisierten Mikroorganismen bei geringen Beanspruchungsintensitäten bis hin zu einer Zerstörung der Zellwände der im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen bei entsprechend hohen Beanspruchungsintensitäten. Dadurch kann unter anderem der anaerobe Abbau der aerob gebildeten Klärschlämme verbessert werden.

Initiiert durch ein von der Europäischen Union finanziertes internationales Forschungsprojekt "Ways of Innovation for the Reduction of Excess Sludge" W.I.R.E.S. wurde in dieser Arbeit der Einfluss einer mechanischen Schlammbehandlung und einer damit verbundenen Veränderung der Schlammstruktur auf das Biomassewachstum beim Substratabbau und auf die Überschussschlammproduktion bei der biologischen Abwasserreinigung untersucht. Dies erfolgte in zwei Teilschritten:

- Mit Hilfe zweier diskontinuierlich betriebener Respirometer wurden zunächst der Sauerstoffverbrauch und die Substrataufnahme mechanisch behandelte und unbehandelte Schlämme beim Abbau einfacher Substrate gemessen und der Einfluss der Beanspruchung auf den Ausbeutekoeffizienten der im Schlamm enthaltenen Biomasse bestimmt.

- In vier parallel betriebenen Laborkläranlagen wurde in kontinuierlichen Versuchen mit einer Dauer von bis zu über 100 Tagen der Einfluss einer mechanischen Schlammbeanspruchung auf die Überschussschlammproduktion und auf weitere wichtige Prozessparameter der biologischen Abwasserreinigung untersucht.

Anschließend wurde über ein Simulationsmodell Modell der Einfluss der mechanischen Beanspruchung auf die Überschussschlammproduktion nachgestellt, so dass die verschiedenen Mechanismen, die zu einer Reduzierung der Überschussschlammproduktion führen können, beurteilt werden konnten.

Auf Grund der guten Ausstattung des Institutes für Mechanische Verfahrenstechnik mit Geräten für den mechanischen Zellaufschluss konnten verschiedene Geräte hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das Klärschlammwachstum und auf die Überschussschlammproduktion getestet werden. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Ultraschallhomogenisatoren, eine Rührwerkskugelmühle, ein Hochdruckhomogenisator und ein Scherspalthomogenisator.

2 Einführung in die Entsorgungsproblematik

2.1 Anfall und Charakterisierung von Klärschlämmen

Bei der mechanisch-biologischen Reinigung kommunaler und industrieller Abwässer fallen in den verschiedenen Stufen der Abwasserreinigung erhebliche Mengen an Klärschlamm an. Dabei wird zwischen verschiedenen "Schlammtypen" unterschieden.

Mechanisch leicht abtrennbare Abwasserinhaltsstoffe, die z.B. durch den Einsatz von Sedimentationsbecken abgetrennt werden können, bilden den *Primärschlamm*. Dieser hat je nach Effizienz der mechanischen Reinigungsstufen und der verwendeten statischen Eindickung einen Feststoffanteil von 2,5 bis 7 % mit einem organischen Gehalt zwischen 60 und 75 %. Primärschlamm enthält einen hohen Anteil leicht identifizierbarer Inhaltsstoffe, wie z.B. Kot, Gemüsereste, aber auch Papier oder Kunststoffe. Der in den anschließenden biologischen Reinigungsstufen anfallende Schlamm wird im Allgemeinen als *Überschussschlamm* bezeichnet und hat nach der Sedimentation in der Nachklärung einen Feststoffanteil zwischen ca. 0,3 und 1,5 % mit einem organischen Anteil von 55 bis 80 %. Hauptbestandteil des Überschussschlammes sind Mikroorganismen, die überwiegend in Flocken organisiert sind. Die Mikroorganismen nutzen die im Abwasser enthaltenen, biologisch abbaubaren Verunreinigungen als Substrat und wandeln diese in CO₂ und neue Biomasse um. Dieser Biomassezuwachs erfordert die regelmäßige Entnahme von Klärschlamm, um einen konstanten Feststoffgehalt in der biologischen Stufe der Abwasserreinigungsanlage sicherzustellen. Findet neben einer mechanisch-biologischen Abwasserbehandlung zusätzlich eine chemische Fällung oder Flockung gelöster oder kolloidaler Abwasserinhaltsstoffe statt, so fällt zusätzlich zu den genannten Schlämmen auch noch ein *Tertiärschlamm* an. Wird die chemische Behandlung vor der biologischen Behandlung durchgeführt, liegt der Feststoffgehalt des Tertiärschlammes zwischen 2,5 und 6 % mit einem organischen Anteil von 52 bis 60 %. Findet die Behandlung erst nach der biologischen Stufe statt, so verringert sich der organische Anteil des Tertiärschlammes deutlich auf 20 - 27 % bei einem Feststoffgehalt von nur noch 0,5 bis 2 %. Bei der Behandlung industrieller Abwässer können die Klärschlammzusammensetzungen je nach Industriezweig deutlich nach oben oder unten abweichen [ATV/VKS-Fachauschuss 3.2, 1987], [Abwassertechnische Vereinigung, 1996].

Im Jahr 2001 fielen in der Bundesrepublik Deutschland in ca. 9.800 kommunalen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen ca. 2,43 Mio. t Trockenmasse als Schlämme zur Entsorgung an [Statistisches Bundesamt, 2003a]. Aus industriellen Abwasserbehandlungsanlagen wurden im Jahr 2001 ca. 660.000 t Trockenmasse aus der biologischen Abwasserbehandlung der Klärschlamm Entsorgung zugeführt [Statistisches Bundesamt, 2003b]. Während in Deutschland seit dem Jahr 1991 eine leichte Abnahme der zu entsorgenden Klärschlamm Mengen aus kommunalen

Anlagen zu verzeichnen war (ca. 2,96 Mio. t Trockenmasse in 1991 [Statistisches Bundesamt, 1996]), stieg europaweit die Gesamtmenge des Klärschlammes aus Anlagen zur Behandlung von kommunalem Abwasser von 5,5 Mio. t Trockensubstanz im Jahr 1992 (ohne Italien und Schweden) auf 7,0 Mio. t Trockensubstanz im Jahr 2000 deutlich an (mit Italien und Schweden) [Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2004]. Dies liegt vor allem an den verschärften Anforderungen an die Behandlung von kommunalem Abwasser, die von der EU an ihre Mitglieder gestellt werden und die im Laufe der Zeit von allen Mitgliedsstaaten zu erfüllen sind [91/271/EWG, 1991], [98/15/EG, 1998].

2.2 Problematik der Schlammentsorgung

Die Entsorgungswege für Klärschlamm aus der biologischen Abwasserreinigung haben sich in den letzten Jahren gravierend geändert (siehe Abbildung 2-1). Während im Jahr 1991 in der Bundesrepublik Deutschland noch rund 42 % der kommunal angefallenen Trockenmasse auf Deponien abgelagert wurden [Statistisches Bundesamt, 1996], waren es im Jahr 2001 nur noch ca. 7 % der kommunal angefallenen Schlämme und ca. 11 % der Klärschlämme aus der biologischen Reinigung industrieller Abwässer [Statistisches Bundesamt, 2003a], [Statistisches Bundesamt, 2003b].

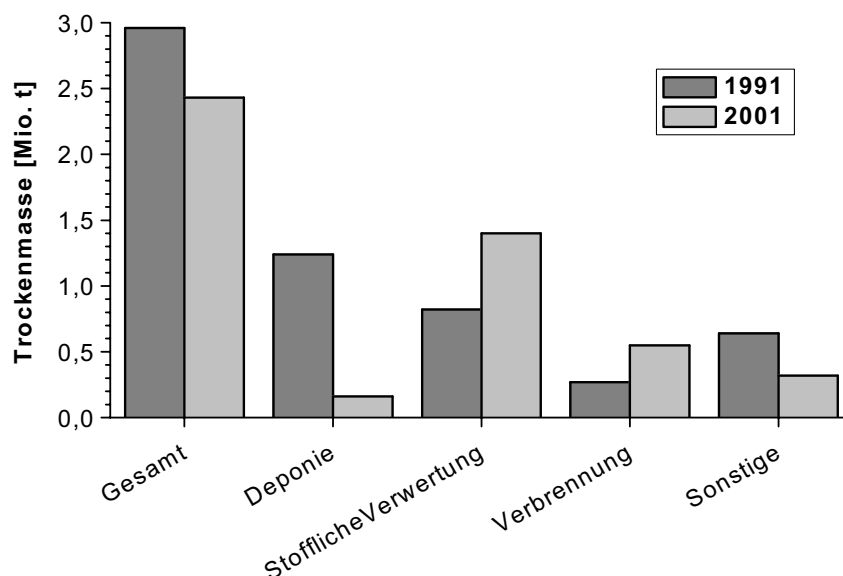


Abbildung 2-1: Klärschlamm Entsorgung aus kommunalen Kläranlagen in der BRD in den Jahren 1991 [Statistisches Bundesamt, 1996] und 2001 [Statistisches Bundesamt, 2003a]

Der Rückgang der Deponierung in diesem Zeitraum ist eine Anpassung an neue gesetzliche Rahmenbedingungen. Seit Juni 2005 dürfen in Deutschland auf Deponien nur noch Materialien mit einem organischen Anteil $\leq 5\%$, gemessen als Glühverlust, abgelagert werden [AbfAbIV, 2001]. Dies ist für Klärschlämme mit ihrem hohem Bio-

masseanteil jedoch nur nach vorheriger thermischer Behandlung möglich. Durch den starken Rückgang der Deponierung sind im gleichen Zeitraum die Mengen, die über die stoffliche oder thermische Verwertung entsorgt wurden, stark angestiegen.

Zur stofflichen Verwertung zählen u.a. die Verwendung von Klärschlämmen bei Re-kultivierungsmaßnahmen im Landschaftsbau, in der Kompostierung, aber auch als Dünger in der Landwirtschaft. Dabei nimmt der Einsatz als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft den weitaus größten Teil ein (siehe Abbildung 2-2). Die öffentliche Akzeptanz für diese Art der Entsorgung unterliegt jedoch starken Schwankungen [Melsa, A. K., 2003]. Zudem regeln stringente Vorschriften u.a. hinsichtlich der Belastung mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen den Einsatz von Klärschlämmen in der Landwirtschaft, wie z.B. die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) oder die EU-Klärschlammrichtlinie 86/278/EWG, welche seitens des Gesetzgebers in der Zukunft noch einmal deutlich verschärft werden sollen [Loll, U., 2003]. In der Schweiz ist z.B. ab 2005 die Klärschlamm Entsorgung in der Landwirtschaft bereits gänzlich verboten worden [Böhler, M. and Siegrist, H., 2003].

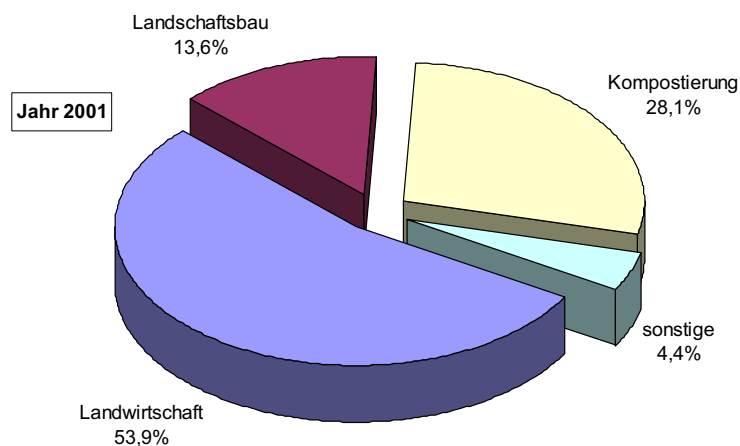


Abbildung 2-2: Stoffliche Verwertung von Klärschlamm aus kommunalen Anlagen im Jahr 2001 [Statistisches Bundesamt, 2003a]

Der vollständige Wegfall der Deponierung seit Juni 2005 und die oben genannten unsicheren Rahmenbedingungen bei der landwirtschaftlichen Nutzung werden dazu führen, dass die thermische Verwertung von Klärschlämmen in der BRD einen immer größeren Stellenwert einnehmen wird. Bei gleichbleibendem Klärschlammaufkommen kann eine vollständige Entsorgung allein durch die thermische Verwertung jedoch nur durch eine Ausweitung der Verbrennungskapazitäten sichergestellt werden [Hanßen, H., 2003]. So könnte zwar über eine Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken die in der BRD jährlich anfallende Schlammmenge entsorgt werden, der Klärschlamm hat jedoch auch im vollgetrockneten Zustand einen deutlich schlechteren Heizwert als z.B. Steinkohle [Hermann, T. and Goldau, K., 2004]. Zudem ist die thermische Entsorgung erheblich teurer als die landwirtschaftliche Verwertung. Vor diesem Hintergrund und mit der Tatsache einer unsicheren Zukunft der landwirt-

schaftlichen Verwertung ist somit eine Reduzierung der anfallenden Klärschlamm-mengen sowohl innerhalb der BRD, aber vor allem auch europaweit, aus ökonomi-scher Sicht sinnvoll.

2.3 Lösungsansätze zur Entsorgungsproblematik

Angesichts der entfallenen Deponierungsmöglichkeit, der oben genannten Unsicher-heiten hinsichtlich der landwirtschaftlichen Klärschlammnutzung und der zur Zeit beschränkten Kapazitäten der thermischen Klärschlammverwertung stellt die Redu-zierung der zu entsorgenden Klärschlammengen eine ernsthafte Alternative zu einer Erweiterung der Verbrennungskapazitäten dar.

Eine Reduzierung der zu entsorgenden Mengen kann dabei auf zwei unterschiedli-chen Wegen geschehen. Zum Einen besteht die Möglichkeit, bereits gebildete Schlamm-mengen wieder zu reduzieren, zum Anderen kann versucht werden, die Schlamm-entstehung selbst zu reduzieren. Auf beide Wege soll im Weiteren näher eingegangen werden.

2.3.1 Reduzierung bereits vorhandener Schlamm-mengen vor der Entsorgung

Auf der Mehrzahl der Kläranlagen in Deutschland werden die anfallenden Schlämme vor ihrer Entsorgung noch einer anaeroben Stabilisierung zugeführt, damit die Schlämme bei Lagerung und Transport keinem unkontrollierten Faulungsprozess unterliegen. Bei der anaeroben Stabilisierung wird der Schlamm großen Faulbehäl-tern zugeführt. In diesen werden die im Schlamm enthaltenen Feststoffe unter anaero-ben Bedingungen biologisch abgebaut. Die im Faulbehälter anaerob lebenden Mikroorganismen nutzen die organischen Bestandteile der im zu behandelnden Schlamm enthaltenen Feststoffe als Substrat und wandeln diese größtenteils zu CO₂ und Methan aber auch zu neuer Biomasse um. Durch die anaerobe Schlamm-fermentation kann die organische Trockenmasse der Schlämme je nach Schlammzusammenset-zung um bis zu 60% reduziert werden. Das Methan kann energetisch weiterverwertet werden.

Eine Intensivierung dieses Faulungsprozesses kann die zu entsorgende Menge an Klärschlamm verringern. Die Geschwindigkeit und damit letztendlich die Effizienz eines anaeroben Abbauprozesses wird durch die Bioverfügbarkeit der Substrate bestimmt. Komplexe organische Verbindungen müssen bei der Faulung durch einen Hydrolyseschritt zunächst in leicht abbaubare Substanzen umgesetzt werden, bevor sie für den weiteren Faulungsprozess verfügbar sind. Dies gilt auch für die im Über-schussschlamm enthaltenen Mikroorganismen. Die in diesen enthaltenen organi-schen Substanzen müssen zunächst durch hydrolysierende Bakterien im Faulbehälter in Lösung gebracht werden. Dabei stellen die Zellwände der Mikroorga-nismen einen erheblichen Widerstand gegen die Hydrolyse dar. Durch eine dem

Faulungsprozess vorgeschaltete Desintegration des zu behandelnden Überschussschlammes können die Zellwände der im Überschussschlamm enthaltenen Mikroorganismen zerstört und die organischen Inhaltsstoffe in Lösung gebracht werden. Somit können die Inhaltsstoffe auch ohne die langsame bakterielle Hydrolyse dem anaeroben Abbauprozess zugänglich gemacht werden.

Hierzu sind in den letzten Jahren diverse Untersuchungen durchgeführt worden, z.B. [Müller, J., 1996], [Baier, U. and Schmidheiny, P., 1997], [Nickel, K. *et al.*, 1998]. Ein großtechnischer Vergleich verschiedener Desintegrationsverfahren auf einer Kläranlage des Lippeverbandes ergab abhängig vom jeweiligen Desintegrationsverfahren eine mögliche Erhöhung des Abbaugrades des Überschussschlammes in der Faulung zwischen 10 und 20 % [Winter, A., 2003].

2.3.2 Reduzierung der Schlammmentstehung

Die im vorigen Kapitel beschriebene Möglichkeit zur Reduzierung der zu entsorgenden Klärschlammengen bezieht sich ausschließlich auf eine nachträgliche Minimierung bereits gebildeter Schlammengen. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist es jedoch sinnvoller, die Schlammmentstehung "*an sich*" zu reduzieren.

Eine Reduzierung der Schlammproduktion bietet neben einer Verringerung der zu entsorgenden Mengen und damit der Entsorgungskosten zudem den Vorteil, dass die vor der Entsorgung der Schlämme nötigen Behandlungsschritte, wie die Faulung und die Entwässerung, im selben Maß reduziert werden können. Somit sinken zusätzlich auch die Kosten für die Schlammbehandlung auf der Kläranlage.

Für eine Reduzierung des Primärschlammmanfalls müsste entweder bereits bei der Abwassereinleitung in die Kanalisation eine Reduzierung der eingebrachten Feststoffe erreicht werden. Dies ist jedoch kaum realisierbar. Durch eine Verkürzung der Aufenthaltszeit des Abwassers in der Vorklärung kann die Menge an anfallendem Primärschlamm ebenfalls reduziert werden, die dadurch nicht abgetrennten Feststoffe würden jedoch nur in die anschließende aerobe Behandlung und somit in den Überschussschlamm verschoben.

Eine Reduzierung des Überschussschlammmanfalls ist jedoch möglich. Dazu muss direkt auf den Prozess der aeroben biologischen Abwasserreinigung Einfluss genommen werden. Dies kann auf verschiedene Weisen durch eine Vorbehandlung des zugeführten Abwassers oder durch eine Beeinflussung der biologischen Anteile im Schlamm geschehen [Ödegaard, H., 2003].

Auf die Möglichkeit der Reduzierung der Überschussschlammproduktion soll im nächsten Kapitel vertieft eingegangen werden.

3 Reduzierung der Überschussschlammproduktion

3.1 Theoretischer Hintergrund

Der in der biologischen Stufe einer Abwasserreinigungsanlage anfallende Überschussschlamm setzt sich aus den beim Abbau organischer Stoffe neu entstandenen Feststoffen sowie aus mit dem Abwasser eingebrachten, eingelagerten Feststoffen zusammen [ATV-DVWK, 2000]. Zum besseren Verständnis der Eingriffsmöglichkeiten zur Reduzierung der Schlammmentstehung wird im Folgenden zunächst genauer auf Prozesse eingegangen, die bei der Überschussschlamm-entstehung eine Rolle spielen. Darauf aufbauend können Eingriffsmöglichkeiten zur Überschussschlammreduzierung entwickelt werden.

3.1.1 Entstehung von Überschussschlamm

Im Belebungsbecken kommt es neben einer Neubildung von Feststoffen durch Wachstum der Mikroorganismen und durch Einlagerung von Feststoffen zeitgleich auch zu einem Abbau von Biomasse durch Autolyse durch die im System enthaltenen Mikroorganismen. Somit ist die insgesamt gebildete Schlammmenge die Summe aus diesen Einzelprozessen:

$$M_{TSS,neu} = M_{TSS,Wachstum} + M_{TSS,Einlagerung} - M_{TSS,Abbau} \quad \text{Glg. 3.1}$$

$M_{TSS,neu}$	insgesamt neu gebildete Feststoffmenge
$M_{TSS,Wachstum}$	durch Biomassewachstum neu entstandene Feststoffmenge
$M_{TSS,Einlagerung}$	Menge an akkumulierten Feststoffen des Abwassers
$M_{TSS,Abbau}$	durch Autolyse abgebaute Biomasse

Die einzelnen Teilmengen sind abhängig von diversen biologischen, chemischen und stöchiometrischen Parametern und Zusammenhängen. So gibt die Abwassertechnische Vereinigung e.V. einen relativ einfachen Zusammenhang zwischen dem biochemischen Sauerstoffbedarf BSB_5 des Abwassers, der Durchflussmenge und der Überschussschlammproduktion an [ATV, 1997]. Hiernach ist:

$$M_{TSS,Wachstum} = Q_{BB} \cdot Y_H \cdot (BSB_{5,0} - BSB_{5,A}) \quad \text{Glg. 3.2}$$

$$M_{TSS,Einlagerung} = Q_{BB} \cdot a \cdot TSS_0 \quad \text{Glg. 3.3}$$

$$M_{TSS,Abbau} = (1 - f_{XI}) \cdot k_{D,H} \cdot X_H \cdot f_T \quad \text{Glg. 3.4}$$

Das Wachstum neuer heterotropher Biomasse $M_{TSS,Wachstum}$ ist dabei abhängig vom heterotrophen Ausbeutekoeffizienten Y_H , vom Durchfluss des Belebungsbeckens mit Abwasser Q_{BB} und vom BSB_5 - Abbau im Belebungsbecken, gegeben

durch die Differenz der BSB_5 Konzentrationen im Zulauf $BSB_{5,0}$ und im Ablauf $BSB_{5,A}$. Der heterotrophe Ausbeutekoeffizient Y_H gibt dabei an, wie viel heterotrophe Biomasse pro abgebauter Masse BSB_5 gebildet wird (kg/kg).

Von den mit dem Abwasser eingebrachten Feststoffen TSS_0 ist ein Teil während der Aufenthaltszeit im System biologisch abbaubar. Der nicht abbaubare Anteil a der eingebrachten Feststoffe TSS_0 bewirkt eine Akkumulation von Feststoffen im Schlamm.

Der Abbau von aktiver heterotropher Biomasse X_H im Belebungsbecken ist abhängig vom Autolysekoeffizienten $k_{D,H}$ der heterotrophen Biomasse. Dieser gibt an, wie schnell Feststoffe in biologisch leicht abbaubare gelöste Substanzen umgesetzt werden können. Er ist stark abhängig von der Umgebungstemperatur, so dass zusätzlich ein Temperaturfaktor f_T mit einbezogen wird. Da bei der Autolyse von Mikroorganismen immer ein Rest inerter, also biologisch nicht umsetzbarer Feststoffe f_{XI} übrigbleibt, wird dies in der Bestimmung von $M_{TSS,Abbau}$ ebenfalls berücksichtigt. Die einzelnen Koeffizienten müssen empirisch bestimmt werden.

Um im Belebungsbecken einen konstanten Feststoffgehalt zu gewährleisten, muss die entnommene Überschussschlammmenge $\dot{ÜS}$ gleich der neu gebildeten Schlammmenge $M_{TSS,neu}$ sein. Basierend auf den genannten Beziehungen ist im ATV Arbeitsblatt A 131 unter Berücksichtigung des Schlammalters t_{TSS} für die Kohlenstoffelimination im Belebungsbecken folgender Zusammenhang zwischen der täglich produzierten Überschussschlammmenge und der täglichen BSB_5 -Fracht des Belebungsbeckens $B_{d,BSB}$ gegeben [ATV-DVWK, 2000]:

$$\dot{ÜS} = B_{d,BSB} \cdot \left(Y_H + a \cdot \frac{TSS_0}{BSB_{5,0}} - \frac{(1-f_{XI}) \cdot k_{D,H} \cdot Y_H \cdot t_{TSS} \cdot f_T}{1 + k_{D,H} \cdot t_{TSS} \cdot f_T} \right) \quad \text{Glg. 3.5}$$

In dieser Betrachtung der ATV wird für die Beschreibung des Abwassers nur der Summenparameter BSB_5 verwendet. Dieser ist zwar ein weit verbreiteter Parameter, er ist jedoch relativ aufwändig zu bestimmen und gibt keine Informationen über die Zusammensetzung des Abwassers.

Im Jahr 1987 hat eine Arbeitsgruppe der IAWPRC (International Association of Water Pollution Research and Control) unter der Leitung von Mogans Henze ein Modell vorgestellt, welches als Summenparameter den chemischen Sauerstoffbedarf CSB verwendet, das "Activated Sludge Model 1, ASM1" [Henze, M. *et al.*, 1987]. Dieser ist im Vergleich zum BSB_5 deutlich schneller zu bestimmen. Zudem wird in diesem Modell zwischen biologisch leicht, schwer oder nicht abbaubaren Abwasserinhaltsstoffen unterschieden. Eine Schlammbildung aufgrund von Nitrifikation und Denitrifikation wird ebenfalls in diesem Modell berücksichtigt. Ferner geht die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken mit in die Bestimmung der Überschussschlammproduktion ein. Dieses Modell ist somit deutlich vielschichti-