

Sonderabdruck aus
SCHWEIZERISCHE ZEITSCHRIFT FÜR HYDROLOGIE
Vol. XX BIRKHÄUSER VERLAG BASEL Fasc. 2, 1958

Zur Theorie des Belebtschlammverfahrens

*I. Beobachtungen über die Kinetik der Elimination organischer Verbindungen
aus Abwasser mittels Belebtschlamm*

Von

K. WUHRMANN, F. V. BEUST
und T. K. GHOSE

Zur Theorie des Belebtschlammverfahrens

I. *Beobachtungen über die Kinetik der Elimination organischer Verbindungen aus Abwasser mittels Belebtschlamm*

Von K. WUHRMANN, F. V. BEUST und T. K. GHOSE

Mitteilung Nr. 145 aus der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
Direktor: Prof. Dr. O. JAAG

1. Einleitung und Problemstellung

Die *Geschwindigkeiten*, mit welchen die einzelnen organischen Verunreinigungssubstanzen aus einem Abwasser von der Biozönose einer biologischen Reinigungsanlage entfernt werden, stellen einen massgebenden Faktor für die Dimensionierung ihrer biologischen Stufe dar, denn es ist offensichtlich, dass die Kontaktzeit zwischen Abwasser und reinigendem Agens (Belebtschlamm oder Tropfkörper-Rasen) so lange ausgedehnt werden muss, bis die Schmutzstoffe nach Massgabe ihrer individuellen Eliminationsgeschwindigkeiten die gewünschte Konzentrationsverminderung durch den Reinigungsprozess erfahren haben.

Wir verwenden in den nachfolgenden Ausführungen den Begriff «Elimination» für den gesamten Komplex von Mechanismen, welche eine Konzentrationsverminderung der unerwünschten Inhaltsstoffe eines Abwassers bei seiner biologischen Reinigung zur Folge haben. Meist wird in der deutschsprachigen Fachliteratur allerdings der Begriff «Abbau» für die Entfernung von Schmutzstoffen aus Abwasser bei der Reinigung in Belebtschlamm- oder Tropfkörperanlagen verwendet. Diese Terminologie ist aber nicht richtig, denn das Verschwinden organischer Verbindungen aus Abwasser in biologischen Reinigungsanlagen erfolgt auf Grund verschiedenster Mechanismen, wobei dissimilatorische Stoffwechselforgänge («Abbau») nur einen Teil der physiologischen Reaktionen darstellen.

In üblicher Weise verwenden wir die abgeleiteten Begriffe wie:

Eliminationsgeschwindigkeit: die pro Zeiteinheit aus Abwasser entfernte Menge einer Substanz. Dimension: mg/l · h.

Spezifische Elimination: die pro Zeiteinheit und Gewichtseinheit biologischen Schlammes aus Abwasser entfernte Menge einer Substanz. Dimension: g Substanz/g Schlammrockengewicht und Stunde.

Eliminationsleistung: die pro Volumeneinheit im Tag in einer Belüftungseinrichtung aus Abwasser entfernte Menge einer Substanz. Dimension: kg Substanz/m³ Belüftungsraum und Tag.

Grösse und hauptsächlichste Betriebsbedingungen der biologischen Stufe einer Reinigungsanlage sind weitgehend bestimmt, wenn die Eliminationsgeschwindigkeiten der wichtigsten Abwasserkomponenten und (im Falle der aeroben Verfahren) der Sauerstoffverbrauch des zur Reinigung verwendeten Organismenschlammes bei kontinuierlicher Zufuhr des Abwassers bekannt sind.

Der zeitliche Verlauf des Verschwindens einer *bestimmten* Substanz, welche einem Belebtschlamm-Abwasser-Gemisch zugesetzt wird, ist unseres Wissens bisher einzig von RUCHOFT *et al.* [13]¹⁾ am Beispiel der Glukose untersucht worden. Aus den von diesen Autoren veröffentlichten Messungen ist ersichtlich, dass die Konzentrationsabnahme des Zuckers in ihren Versuchen exponentiell verlief. Die Abhängigkeit der Eliminationsgeschwindigkeit der Glukose von der Konzentration des verwendeten Schlammgemisches liess sich in befriedigender Weise mittels der Freundlich'schen Adsorptionsisotherme interpretieren ('... it may be concluded that with normal activated sludge concentrations of 650 to 3250 ppm and a glucose concentration of about 500 ppm the Freundlich expression applies between the first and fifth hour.'). Die Beobachtungen der amerikanischen Autoren standen mit Erfahrungen, die wir anlässlich von Untersuchungen über die Beeinflussung der Atmung von Belebtschlamm durch verschiedene Substrate machten, völlig in Widerspruch. Im Hinblick auf die überaus grosse praktische Bedeutung der genauen Kenntnis des Verlaufes und der Mechanismen der Elimination von gelösten Verunreinigungsstoffen — speziell bei industriellen Abwässern — haben wir das Problem erneut aufgegriffen.

Wir haben versucht, auf experimentellem Wege einige Beiträge zur Abklärung der folgenden Fragen zu leisten:

¹⁾ Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis, Seite 810.

Welchen Verlauf besitzt die Konzentrations-Zeit-Funktion einer zu Belebtschlamm zugesetzten, von Mikroorganismen resorbierbaren, organischen Substanz?

Lassen sich Geschwindigkeitskonstanten für die Elimination bestimmter Substanzen unter gegebenen äusseren Bedingungen (Substratkonzentration, Schlammkonzentration, Belüftungsintensität, Temperatur, Anwesenheit zusätzlicher Substrate, Substratadaptation des Schlammes usw.) angeben?

Können Aussagen über den Mechanismus der Elimination vergärbare Substanzen aus Abwasser durch Belebtschlamm (oder Tropfkörper-Rasen) gewonnen werden?

Zu den gestellten Fragen soll in einigen Aufsätzen anhand der in den letzten Jahren durchgeführten experimentellen Arbeiten Stellung genommen werden.

Wir betonen nochmals, dass sich unsere Untersuchungen auf das Verhalten *gelöster* Verunreinigungsstoffe in Abwasser beziehen, deren Entfernung durch chemisch-physikalische Vorgänge (Sedimentation oder Koagulation + Sedimentation) unwahrscheinlich ist. Selbstverständlich müssen wir uns dabei auf die Prüfung einer beschränkten Zahl von Körpern beschränken, die im Sinne von Modellsubstanzen verwendet werden. Durch die geeignete Auswahl von Elektrolyten, Nichtelektrolyten und höher molekularen Verbindungen kann jedoch trotzdem ein Überblick über die allgemeingültigen Gesetzmässigkeiten bei der Elimination organischer Verunreinigungsstoffe gewonnen werden.

2. Methoden

2.1 Vorbereitung des Belebtschlammes

Für alle Experimente wurde Belebtschlamm aus einer Gemeindekläranlage (Pfäffikon ZH) oder aus unseren technischen Versuchsanlagen verwendet. Im allgemeinen handelte es sich um Schlämme, die sich aus vorwiegend häuslichem Abwasser entwickelten. Die Belebtschlämme wurden spätestens 1–2 h nach Entnahme aus den Anlagen für die Versuche folgendermassen vorbereitet:

Abtrennen des Schlammwassers (anhaftendes Abwasser) mittels Zentrifugieren oder Filtrieren.

3maliges Waschen des Schlammes in Leitungswasser oder 0,005 m Phosphatpuffer, pH 7,5.

Anhand einer orientierenden Schnellbestimmung der Schlammkonzentration nach dem letzten Waschen wurde die Versuchssuspension durch Aufschwemmen der notwendigen Schlamm Masse in 0,005 m Phosphatpuffer pH 7,5 hergestellt, deren genaue Konzentration anschliessend durch Bestimmen des Trockenrückstandes und des Glühverlustes (nach Zentrifugieren) in üblicher Weise erhalten wurde.

2.2 Durchführung der Versuche

Im allgemeinen wurde rund 1 l der Schlamm suspension in Imhoffgläsern oder hohen Standzylindern zunächst während 30–60 min intensiv belüftet und dann die Substratzusätze (in wässriger Lösung) vorgenommen. Nach verschiedenen Kontaktzeiten zwischen Schlamm und Substrat wurden für die Analysen die notwendigen Volumina der Schlamm suspension ohne Unterbrechung der Belüftung auspipettiert. In der Regel wurde von der gewaschenen Schlamm suspension auch die endogene Atmung mikromanometrisch bestimmt, da diese Grösse einen wertvollen Anhaltspunkt für die biologische Aktivität eines Schlammes darstellt [20]. Alle Versuche wurden bei Zimmertemperatur ausgeführt, die ziemlich konstant 20° betrug.

2.3 Analysen

Die aus den Belüftungsgefässen entnommenen Schlamm suspensionen wurden sofort zentrifugiert und die überstehende, klare Lösung entweder unmittelbar mit den Reagenzien für die Analysen versetzt oder dann bis zur weiteren Verarbeitung bei – 30° eingefroren. Bei Versuchen, in welchen organische Stickstoffverbindungen als Substrate dienten (Pepton, Aminosäuren), wurden die zentrifugierten Lösungen anschliessend noch durch Membranfilter steril filtriert, um sämtliche suspendierten ungelösten Teilchen (Bakterien usw.) zu entfernen. Über die verwendeten Analysemethoden gibt die nachstehende Zusammenstellung Aufschluss:

Organischer Stickstoff: nach KJELDAHL (abzüglich Ammoniumstickstoff).
Glukose: nach NELSON [9] und SOMOGYI [14], modifiziert nach SUNDMANN *et al.* [16].

Milchsäure: nach DAVIDSON [2], Kolorimetrierung mittels Beckmann-DU-Spektrophotometer.

Fettsäuren: titrimetrisch nach Wasserdampfdestillation in der von WIKÉN *et al.* [18] beschriebenen Apparatur.

Aminosäuren: etwas modifizierte Methode von BOISSONNAS [1].

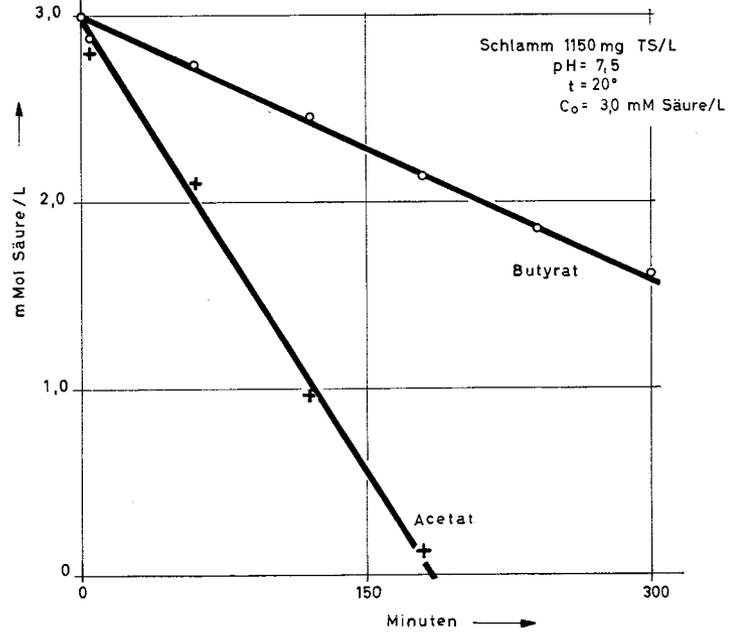
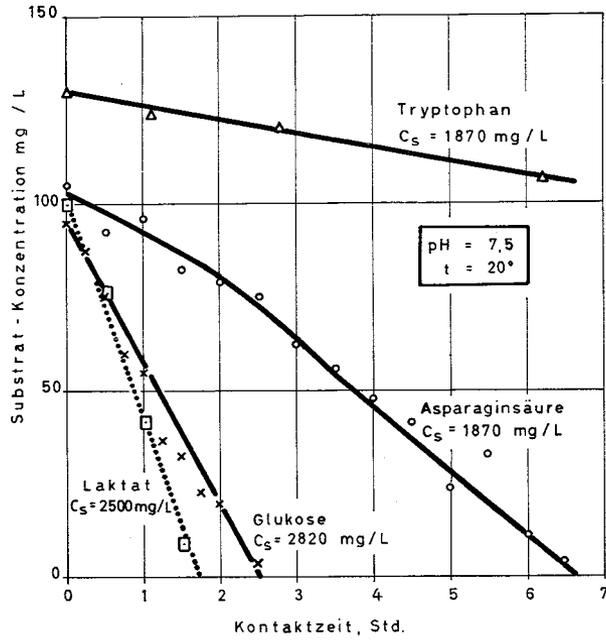
3. Versuchsergebnisse

3.1 Zeitlicher Verlauf der Konzentrationsabnahme einfacher Gärsubstrate

Wir geben in den Abbildungen 1a, b die Ergebnisse einiger der zahlreichen Eliminationsversuche mit einfachen Gärsubstraten wie Glukose, Laktat, Aspartat, Tryptophan und Fettsäuren als Modellsubstanzen wieder. Weitere Beispiele werden später noch im Zusammenhang mit anderen Experimenten dargestellt werden. Die Diagramme zeigen eindeutig, dass die Konzentrationen der dem Belebtschlamm zugesetzten reinen Substanzen, abgesehen von Aspartat, *linear* mit der Kontaktzeit abfallen. Die Aspartatelimination benötigt offensichtlich eine gewisse Adaptationsperiode, nach deren Ablauf aber ebenfalls eine zur Zeit proportionale Konzentrationsverminderung eintritt. Die Geschwindigkeiten der Substrateliminationen in den Versuchen der Abbildungen 1a, b lassen sich allerdings nicht absolut miteinander vergleichen, da die einzelnen Kurven aus Experimenten mit verschiedenen Schlämmen stammen. Ein Vergleich der Elimination verschiedener Substrate mit dem gleichen Schlamm wird später gegeben werden.

Wir haben bereits einleitend auf das von RUCHOFT *et al.* beschriebene Experiment über die Elimination von Glukose hingewiesen. Der von diesen Autoren beobachtete, stark gekrümmte Verlauf der Glukosekonzentrations-Zeit-Kurve steht mit unseren Feststellungen (Abbildung 1a) in Widerspruch. Eine Erklärung der Diskrepanzen ist heute natürlich nicht mehr möglich; wir vermuten allerdings auf Grund unserer früheren Erfahrungen, dass analytische Schwierigkeiten die Resultate der amerikanischen Forscher beeinträchtigt haben.

Die in den dargestellten Experimenten verwendeten Modellsubstanzen umfassen sowohl Nichtelektrolyte als auch dissoziierende Verbindungen. Das gleichartige Verhalten beider Substratgruppen schliesst unseres Erachtens weitgehend aus, dass *Adsorptionsvorgänge* in nennenswertem Umfange für das Verschwinden der Substanzen aus den Schlammsuspensionen verantwortlich gemacht werden können. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Folgerungen, die INGOLS [8] aus Versuchen über die Elimination von Aminosäuren aus Belebtschlamm ableitete. Wir werden in einer anderen Arbeit auf diesen Punkt speziell noch zurückkommen.



a

Abbildung 1

b

Konzentrationsabnahme verschiedener Substrate in Belebtschlamm suspensionen in Funktion der Kontaktzeit. Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoff im Schlammgemisch > 2 mg O/l; Bezeichnungen: c_s Schlammkonzentration in mg Trockensubstanz/l, c₀ Anfangskonzentration des Substrates im Schlammgemisch.

3.2 *Elimination komplexer Substrate*

Bei der Kontrolle der Elimination komplex zusammengesetzter Substrate (zum Beispiel häusliches oder industrielles Abwasser) verwendet man bisher «analytische» Methoden, die lediglich eine summarische Beurteilung der Konzentration gelöster Inhaltsstoffe der betreffenden Abwässer oder Lösungen gestatten, wie zum Beispiel den biochemischen Sauerstoffbedarf, die Oxydierbarkeit (Reduktion von Permanganat oder Chromsäure), die Bestimmung des organischen Stickstoffs oder des organischen Kohlenstoffs

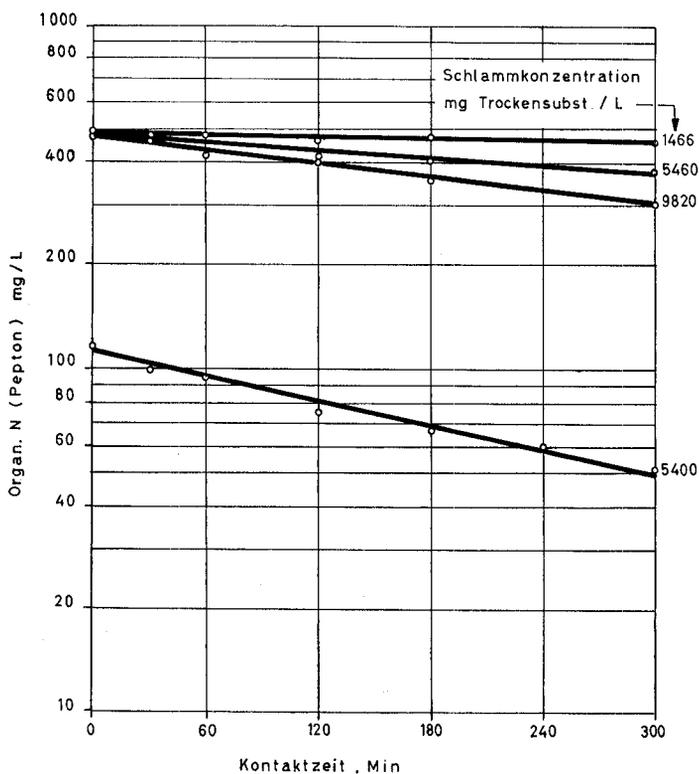


Abbildung 2

Konzentrationsabnahme des organischen Stickstoffs nach Zusatz von Peptonlösungen zu Belebtschlamm in Funktion der Kontaktzeit. Versuchsreihe a (oben): drei Konzentrationen desselben Schlammes bei gleichem Peptonzusatz (482 mg organischer N/l); Versuchsreihe b: Schlamm suspension der mittleren Konzentration aus Reihe a mit Peptonzusatz, entsprechend 100 mg organischem N/l. Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoffkonzentration im Schlammgemisch > 2 mg O/l; Temperatur: 20°C; pH = 7,5 (Phosphatpuffer).

usw. Auch unter der Voraussetzung, dass diese Bestimmungen wirklich ein quantitatives Mass für die Gesamtheit der vorhandenen organischen Verbindungen ergeben (was nur für die Werte des organischen Stickstoffes und Kohlenstoffes gilt), kann man mit ihrer Hilfe über die Konzentrationsveränderungen *einzelner* Komponenten eines komplexen Substrates natürlich keinen Einblick gewinnen. Es ist zum vorneherein zu vermuten, dass die mit solchen unspezifischen Parametern gemessenen «Konzentrationsveränderungen» eines zusammengesetzten Substrates in Funktion der Kontaktzeit nicht mehr linear verlaufen können. Die bisher veröffentlichten Experimente über den Reinigungsvorgang von organisch verunreinigten Abwässern mittels Belebtschlamm [4, 6, 7, 12] zeigen denn auch übereinstimmend einen exponentiellen Verlauf der «Konzentrationsabnahmen». Diese Beobachtungen führten zur allgemeinen Theorie, dass die Abbaugeschwindigkeit eines Substrates in Belebtschlamm in Funktion der Zeit immer geringer werde (Konzentrationsverlauf analog zum Verlauf der BSB-Kurve). In Abbildung 2 ist die Elimination von Peptiden (Pepton Witte als Substrat) dargestellt, wobei der Kjeldahl-Stickstoff (abzüglich Ammoniumstickstoff) als Konzentrationsparameter gewählt wurde. Die Konzentrationsabnahme des organischen Stickstoffs verläuft in der Tat nicht mehr linear mit der Zeit wie bei den früheren Experimenten mit definierten Einzelsubstraten, dagegen sind die Logarithmen der verbliebenen Stickstoffmengen angenähert proportional zur Kontaktzeit. Die Kinetik des «Substratabbaues» entspricht also scheinbar einer Reaktion 1. Ordnung, trotzdem auf Grund der in Abbildung 1 dargestellten Beobachtungen anzunehmen ist, dass sowohl die direkt resorbierbaren Peptonkomponenten als auch die bei der hydrolytischen Spaltung durch Exoenzyme gebildeten Aminosäuren mehr oder weniger proportional zur Kontaktzeit aus der Lösung eliminiert wurden. Dies führt zur Vermutung, dass der logarithmische Konzentrationsabfall lediglich durch Zusammenwirken einfacherer Reaktionen zustande kommt.

Eine direkte Bestätigung für diese Auffassung ergibt sich aus dem in Abbildung 3 dargestellten Versuch. Ein Mischsubstrat aus Glukose, Acetat und Aspartat wurde zu gewaschenem Belebtschlamm zugesetzt. Gleichzeitig erfolgten mit demselben Schlamm Parallelversuche mit den einzelnen Substraten. In den Schlammsuspensionen wurden die Substratkomponenten einzeln verfolgt und beim Mischsubstrat gleichzeitig auch die Veränderung des biochemischen Sauerstoffbedarfes der überstehenden Lösung bestimmt. Abbildung 3 und Tabelle 1 zeigen, dass die Konzentrationen der Substratkomponenten wiederum *linear* mit der Kontaktzeit bis

Konzentration der Komponenten und des BSB₅ in Mischsubstrat

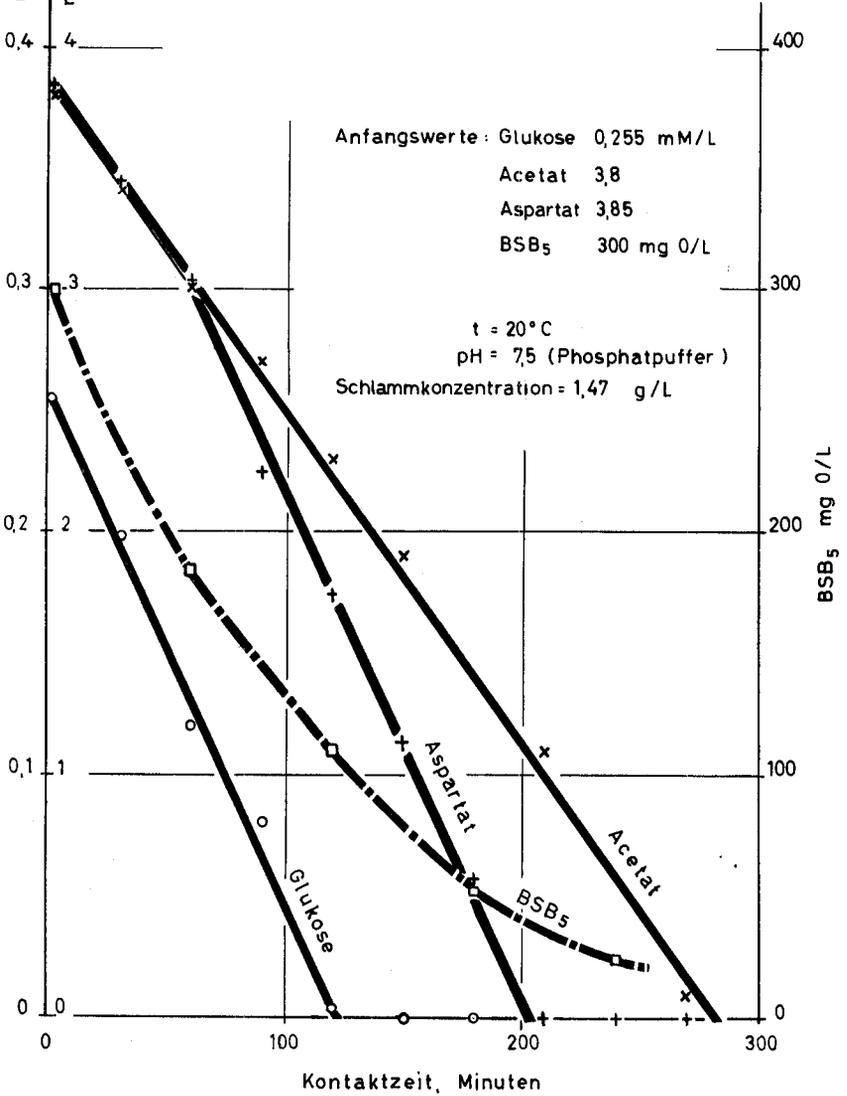


Abbildung 3

Konzentrationsabnahme von 3 Einzelsubstraten nach Zusatz des Substratgemisches zu einer Belebtschlamm suspension in Funktion der Kontaktzeit. Gleichzeitig wurde der BSB₅ der wässrigen Phase des Schlammgemisches gemessen. Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoff im Schlammgemisch > 2 mg O/l.

zum Werte 0 mg/l abfallen. Die BSB₅-Werte ergeben aber einen exponentiell verlaufenden «Konzentrations»abfall (die Kurve lässt sich ziemlich gut linearisieren, wenn man die Logarithmen der Messwerte in Funktion der Kontaktzeit aufträgt). Der Versuch zeigt eindeutig, dass die *Kinetik der Elimination zusammengesetzter Substrate, wie sie mittels unspezifischer Konzentrationsparameter verfolgt werden kann, durch das Zusammenwirken mehrerer Reaktionen nullter Ordnung mit unterschiedlichen Geschwindigkeitskonstanten bestimmt wird*. Die für den Verlauf der Elimination von Verunreinigungsstoffen aus Abwasser mittels Belebtschlamm bisher als charakteristisch dargestellte Reaktion 1. Ordnung ist auf Grund der bisherigen Versuche rein zufälligen Ursprungs und darf deshalb nicht als Grundlage für Überlegungen über den Mechanismus der biologischen Abwasserreinigung verwendet werden.

Wenn wir bisher festgestellt haben, dass die einzelnen, von Belebtschlamm resorbierbaren Substanzen aus Abwasser mit konstanter Geschwindigkeit eliminiert werden (von Substratadaptationen sei abgesehen), so ist allerdings eine gewisse Einschränkung anzubringen: unsere Beobachtungen beschränken sich auf den uns analytisch zugänglichen Konzentra-

Tabelle 1

Elimination von Glukose, Acetat und Aspartat aus einem Mischsubstrat

Kontaktzeit min (1)	Gemessene Substratkonzentration und theoretischer O-Bedarf für vollständige Veratmung								BSB ₅	
	Glukose		Acetat		Aspartat		Total O-Bedarf ¹⁾		gemessen mg O/l (10)	% des theoret. O-Bedarfs (11)
	mM Glukose/l (2)	mM O/l (3)	mM Acetat/l (4)	mM O/l (5)	mM Aspartat/l (6)	mM O/l (7)	mM/l (8)	mg/l (9)		
0	0,255 [0,284]	1,530	3,8 [4,0]	7,6	3,85 [3,82]	7,70	16,83	539	300	55,6
30	0,198 [0,193]	1,188	3,4	6,8	3,44 [3,53]	6,88	14,86	476		
60	0,120 [0,131]	0,720	3,0 [3,2]	6,0	3,03 [3,21]	6,06	12,78	409	184	45,0
90	0,080 [0,047]	0,480	2,7	5,4	2,24 [2,64]	4,48	10,36	331		
120	0,004 [0,021]	0,240	2,3 [3,0]	4,6	1,73 [2,30]	3,48	8,10	259	110	42,5
150	0 [0,002]	0	1,9 [2,3]	3,8	1,13 [1,79]	2,26	6,06	194		
180	0 [0]	0	(1,5)	(3,0)	0,56	1,12	(4,12)	(132)	52	(39,4)
210			1,1 [1,9]	2,2	0	0	2,2	70		
240			(0,55)	(1,1)			(1,1)	(35)	22	(63)
270			0,1 [0,9]	0,2			0,2	6		

¹⁾ Summe der Werte von Kolonnen (3), (5) und (7); [] Werte aus Parallelversuch mit Einzelsubstrat; () interpolierte Werte.

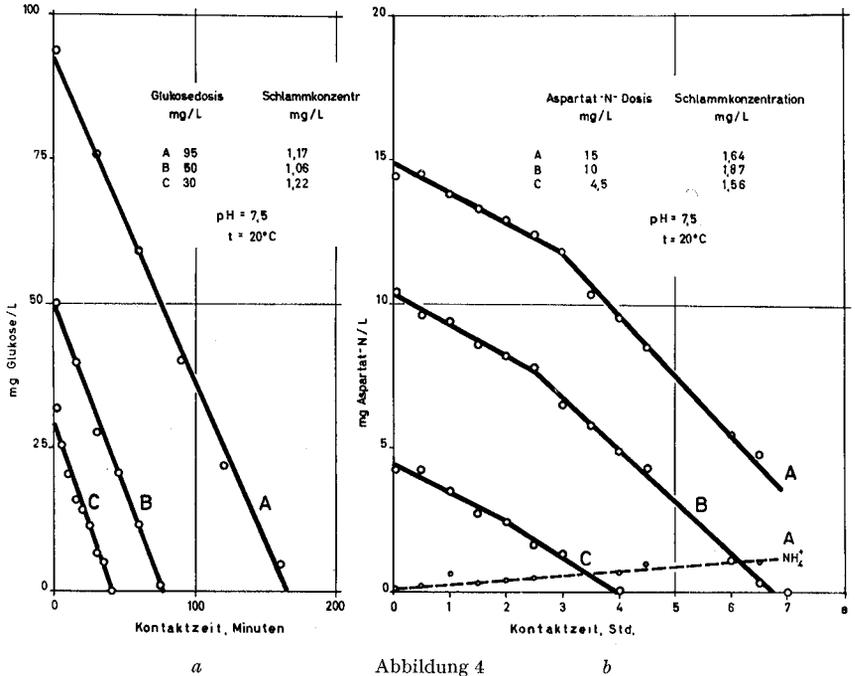


Abbildung 4
Konzentrationsabnahme verschieden konzentrierter Zusätze von Glukose (4a) bzw. Asparaginsäure (4b) zu Suspensionen desselben Belebtschlammes in Funktion der Kontaktzeit. Die Nicht-linearität der Asparaginsäurekurven rührt von enzymatischer Adaptation des Schlammes her. Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoff im Schlammgemisch > 2 mg O/1.

tionsbereich der untersuchten Substrate. Im Hinblick auf die Kinetik enzymatischer Reaktionen bei hohen Enzym- und geringen Substratkonzentrationen könnte vermutet werden, dass bei sehr hohen Verdünnungen der Substrate in hohen Schlammkonzentrationen der Verlauf der Elimination sich einer Reaktion höherer Ordnung annähert. Wie im folgenden noch gezeigt wird, konnten wir aber keinen Hinweis für eine solche Änderung des Reaktionstypus in Abhängigkeit der *relativen* Substratkonzentration finden.

3.3 Einfluss von Substrat- und Schlammkonzentration auf die Eliminationsgeschwindigkeit

Weitere Beweise für die im vorstehenden Abschnitt dargestellte lineare Konzentrationsabnahme eines Substrates in Belebtschlamm müssen sich finden, wenn gezeigt werden kann, dass

Tabelle 2

Glukose-Elimination (Versuch 55/6/15) bei verschiedenen Anfangskonzentrationen

Schlamm- konzentration [mg TS/l] Glukosezusatz [mg/l]	Ansatz: $t = 20^\circ$, pH = 7,5					
	I 1170 95		II 1060 50		III 1220 30	
	Zeit min	Glukose mg/l	Zeit min	Glukose mg/l	Zeit min	Glukose mg/l
	30	75,7	15	39,8	10	20,2
	60	59	30	27,5	15	15,7
	90	40	45	20,4	20	14,1
	120	21,9	60	11,5	25	11,5
	160	4,5	75	1,0	30	6,5
					35	6,0
					40	0
Regressions- koeffizient b (min^{-1})	- 0,5668		- 0,6393		- 0,6038	
Streuung von b	$\pm 0,0498$		$\pm 0,0596$		$\pm 0,119$	
Spezifische Elimination mg Glukose/g TS · h	29,1		36,2		29,2	
Differenzen zwischen allen Werten von b <i>nicht gesichert</i> bei $P = 0,10$.						

- a) bei gleichen Schlamm-, aber verschiedenen Substratkonzentrationen *parallele Regressionsgeraden* für die Konzentrations-Zeit-Funktionen auftreten;
 b) bei gleichen Substrat-, aber verschiedenen Schlammkonzentrationen die *Eliminationsgeschwindigkeiten proportional zur Schlammkonzentration* sind.

Zunächst sei auf ein Experiment verwiesen, in dem wir Glukose als Substrat verwendeten. Dieselbe Schlammsuspension (in Phosphatpuffer) wurde in eine Reihe von Portionen geteilt und ihnen die Substratlösungen in unterschiedlichen Konzentrationen zugesetzt. Abbildung 4a zeigt die Ergebnisse: Die Konzentrationsabnahme des Zuckers erfolgt wiederum linear mit der Kontaktzeit. Ferner sind die Konzentrationsfunktionen offensichtlich praktisch parallel. Wir haben in Tabelle 2 die Regressionskoeffizienten k_0 der Eliminationskurven zusammengestellt und auch die Standardabweichungen der k_0 -Werte angegeben. Die statistische Prüfung der Regressionen auf Parallelität zeigt gemäss den untersten Zeilen in Ta-

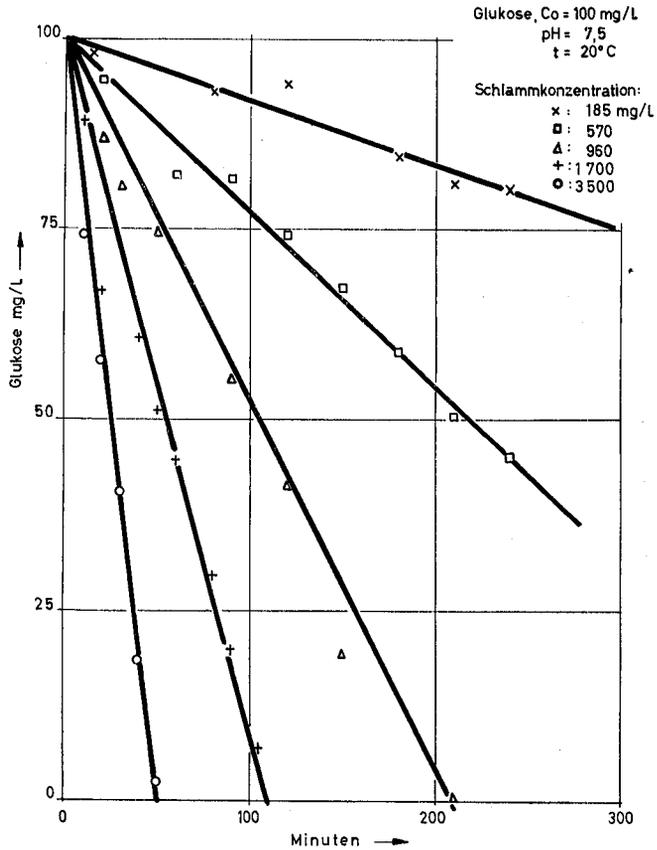


Abbildung 5

Konzentrationsabnahme von gleichartigen Glukosezusätzen zu verschiedenen konzentrierten Suspensionen desselben Belebtschlammes in Funktion der Kontaktzeit. Glukose-Anfangskonzentration = 100 mg/l. Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoff im Schlammgemisch $> 2 \text{ mg O/l}$.

belle 2, dass die Differenzen zwischen Regressionskoeffizienten benachbarter Eliminationskurven sehr viel grösser sein müssten, als sie effektiv sind, um die Hypothese der Nicht-Parallelität zu stützen ($P = 0,01$ angenommen). Die in der graphischen Darstellung angedeutete Parallelität der Geraden ist also sehr gut gesichert. Ein analoges Experiment mit Aspartat zeigt grundsätzlich dieselben Ergebnisse (Abbildung 4b), wobei aber die Elimination anfänglich verlangsamt erfolgt, da die Schlammbiozönose (gesamthaft betrachtet) zunächst einer enzymatischen Adaptation bedarf.

Zur Prüfung der Hypothese, dass die Eliminationsgeschwindigkeiten proportional zur Schlammkonzentration sein müssen, haben wir eine Reihe von Versuchen angestellt, von denen nur drei ausführlicher erwähnt werden sollen. In Abbildung 5 sind die Beobachtungen über die Elimination von Glukose dargestellt, wenn zu verschiedenen konzentrierten Suspensionen desselben Belebtschlammes identische Substratmengen zugesetzt werden. Erwartungsgemäss verschwindet der Zusatz um so schneller, je konzentrierter die Schlammsuspension ist. Dies gilt selbstverständlich auch dann, wenn die Elimination logarithmisch verläuft, wie zum Beispiel im Falle des Pepton-Stickstoffes (Abbildung 2, Anfangskonzentration: 482 mg org. N/l).

Tabelle 3 enthält die Geschwindigkeitskonstanten k_0 für die Konzentrationsabnahme der in den Abbildungen 2 und 5 dargestellten Versuche. Als weiteres Beispiel ist ein Experiment mit Lactat aufgenommen. Rechnet man aus den Werten k_0 die spezifische Elimination (mg Substrat je g Schlamm · h) aus, so findet man bei allen Schlammkonzentrationen innerhalb derselben Reihe einigermaßen gleichartige Grössen, das heisst, die Werte k_0 sind ungefähr der Schlammkonzentration proportional. Die Genauigkeiten sind ziemlich befriedigend, wenn man berücksichtigt, dass Experimente mit komplexen Biozönosen immer mit grossen Streuungen behaftet sind.

Tabelle 3

Abhängigkeit der Elimination von Glukose, Lactat und organischem N (Pepton) von der Schlammkonzentration

Glukose (Experiment 55/6/21) $c_0 = 100 \text{ mg/l}$				Lactat (Experiment 52/4/18) $c_0 = 65 \text{ mg/l}$				Pepton (Experiment 54/6/30) $c_0 = 482 \text{ mg N/l}$			
Schlammkonzentration		k_0	e	Schlammkonzentration		k_0	e	Schlammkonzentration		$k^1)$	$e^1)$
mg TS/l	mg org. St./l	mg/l · min	mg Gluk./g org. St. · h	mg TS/l	mg org. St./l	mg/l · min	mg Lact./g org. St. · h	mg TS/l	mg org. St./l	mg/l · min	mg N/g org. St. · h
3500	2450	2,00	49	7380	5250	0,392	29,8	9820	6845	0,047	3,35
1716	1082	0,913	50,5	3860	2572	1,450	33,8	5460	3740	0,026	3,30
959	575	0,479	50	1270	788	2,420	27,7	1465	1071	0,006	2,68
567	331	0,228	41,5 (?)								
185	105	0,083	52,3								

1) Nur gültig, wenn konstante Konzentration im Schlammwasser vorausgesetzt wird.

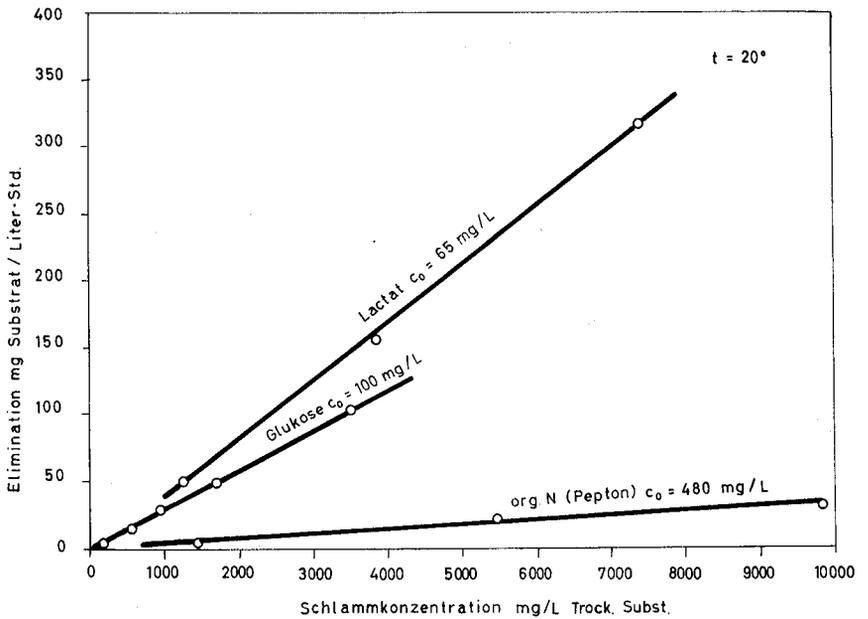


Abbildung 6

Spezifische Elimination verschiedener Substrate in Funktion der Belebtschlammkonzentration. In allen Fällen handelt es sich um Belebtschlamm aus häuslichem Abwasser, der nicht an die Substrate adaptiert war. pH = 7,5 (Phosphatpuffer), Temperatur = 20°C, Mischung und Belüftung mittels Druckluft, Sauerstoff im Schlammgemisch > 2 mg O/l.

Die proportionale Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Substratelimination von der Schlammkonzentration ist in Abbildung 6 für die bereits erwähnten Substrate nochmals verdeutlicht, indem die Eliminationswerte pro Volumeinheit eines Schlammes in Funktion seiner Konzentration aufgetragen sind. Bei dieser Darstellung ist selbstverständlich zu berücksichtigen, dass bei polymolekularen Substraten, welche nichtlineare Eliminationsfunktionen aufweisen, die angebbare spezifische Elimination nur für eine bestimmte, *konstant* bleibende Substratkonzentration gültig ist.

Es ist eine stillschweigende Voraussetzung für die — übrigens banale — Feststellung der proportionellen Abhängigkeit der Eliminationsgeschwindigkeiten von der Organismenzahl, dass bei *jeder Schlammkonzentration alle Zellen in gleicher Weise Zutritt zum Substrat besitzen*. In dichten Organismensuspensionen, wie beim Belebtschlamm, ist diese Voraussetzung nicht ohne weiteres zu erfüllen. In Laboratoriumsversuchen kann man die notwendige Turbulenz in den Reaktionsgefäßen zur befriedigenden Dispergierung der

Teilchen relativ leicht erhalten. In der Praxis der Abwasserreinigung steht man in dieser Hinsicht aber vor einem noch fast ungelösten Problem. Es kann denn auch von einer proportionalen Abhängigkeit der Reinigungsleistung von der Schlammkonzentration in den Belüftungsbecken nach den bisherigen Untersuchungen an Anlagen der Praxis keine Rede sein. Wohl lässt sich im allgemeinen eine Abhängigkeit der Reinigungsleistung von der Schlammkonzentration nachweisen [5, 17, 11, 15, 19], sie ist aber stets nur gering.

3.4 *Einfluss der Sauerstoffspannung auf die Eliminationsgeschwindigkeit eines Substrates*

Wir haben in einer früheren Arbeit [21] dargelegt, unter welchen Bedingungen ein aerobes Bakterium im Innern einer Belebtschlammflocke noch genügend Sauerstoff zugeführt bekommt, um seine Bedürfnisse zu decken. Es ist nun noch zu untersuchen, in welcher Weise die Sauerstoffspannung in einer Belebtschlamm suspension die Elimination von Substratmolekeln durch die Organismen beeinflusst. Aus den vorherigen Ergebnissen zeigte sich, dass die Elimination gelöster organischer Schmutzstoffe aus Abwasser der *Resorption* dieser Molekeln durch die Schlammorganismen gleichzusetzen ist. Wir müssen deshalb die Frage nach der *Wechselwirkung zwischen Sauerstoffversorgung einer Zelle und der Resorptionsgeschwindigkeit von bestimmten Substraten* beantworten. Die niedrigsten O-Spannungen, die betrachtet werden müssen, liegen im Gebiete der kritischen Sauerstoffspannung für einen ungestörten, aeroben Stoffwechsel der Belebtschlammorganismen, da ja ein Unterschreiten dieser Grenzkonzentration weitere Variable einführen würde (Änderung der Artenzusammensetzung im Sinne des Aufkommens anaerober Typen, Umstellung fakultativ anaerober Arten auf anaeroben Stoffwechsel), die wir hier nicht berücksichtigen wollen.

Die Beantwortung der gestellten Frage besitzt eine gewisse praktische Bedeutung (vor allem bei der Reinigung konzentrierter industrieller Abwässer), da man aus wirtschaftlichen Gründen natürlich darnach trachtet, die Belüftung in einer Anlage auf jenem Minimum zu halten, das gerade noch eine ungestörte, maximale Eliminationsleistung des Schlammes gestattet.

3.41 Glukose als Gärsubstrat

RUCHOFT *et al.* [13] hatten die gestellte Frage unter Verwendung von Glukose als Substrat bereits zu beantworten versucht. Sie fanden eine

Tabelle 4

Elimination von Glukose bei verschiedenen O₂-Spannungen

$c_0 = 100 \text{ mg/l}$, pH = 7,5, $t = 20^\circ$, Schlammkonzentration = 2800 mg TS/l

Belüftung	O ₂	Luft	N ₂	N ₂ (schütteln)				
O ₂ -Konzentration im Schlamm (geschätzt) mg O/l	20-30	3-7	≤ 0,1	0				
Eliminierte Glukose, mg/l (c_i)								
Kontaktzeit, (t_i) min	Red. ¹⁾	Chr. ²⁾	Red.	Chr.	Red.	Chr.	Red.	Chr.
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4,3	4,3	3,6	3,6	1,6	1,6	4,0	4,0
30	16,8	34,4	18,2	—	17,6	24,0	19,7	27,4
60	41,2	36,9	44,6	—	34,4	—	39,6	28,5
90	54,3	50,5	53,4	50,0	51,0	47,7	52,2	62,6
120	70,7	74,8	74,1	72,4	67,6	57,7	71,1	73,8
160	89,3	93,0	95,2	94,0	88,6	81,3	92,0	90,4
180	96,7	98,9	100,0	100,0	97,4	96,3	100,0	99,8
Regressionskoeffizient k_0 ³⁾ Standardabweichung v. k_0	0,565 ±0,024	0,582	0,590 ±0,028	0,524	0,553 ±0,011	0,519	0,575 ±0,016	0,582
Minimale signifikante Differenz zwischen k_0 -Werten für P = 0,01: $\Delta k_0 = 0,121$. ¹⁾ Direkte reduktometrische Bestimmung nach SUNDMANN <i>et al.</i> [16]. ²⁾ Quantitative chromatographische Glukosebestimmung. ³⁾ $k_0 = \frac{S t_i \cdot c_i}{S t_i^2}$.								

starke Abnahme der Eliminationsgeschwindigkeit, wenn der Belebtschlamm auch nur sehr kurzzeitig (1 h) unter Sauerstoffausschluss gehalten wurde. Da die Autoren gleichzeitig stark gekrümmte Eliminationskurven für die Glukose fanden, müssen ihre Ergebnisse mit Vorsicht beurteilt werden. Sie stimmen denn auch mit unseren eigenen Befunden keineswegs überein:

Versuchsansatz: Belebtschlamm aus der Gemeindekläranlage Pfäffikon ZH wurde in üblicher Weise gewaschen und in Phosphatpuffer, pH 7,5, wieder aufgeschwemmt (Trockensubstanz 2800 mg/l, Glühverlust 71,5%). Die

Suspension wurde in 1-Liter-Portionen auf 3 Standzylinder verteilt und mit Bombensauerstoff, Luft und reinem Bombenstickstoff (99% N) gleichartig intensiv begast. Eine vierte Schlammportion wurde unter Stickstoff in eine Flasche eingefüllt und während des Versuches unter Verschluss so geschüttelt, dass sich die Schlammflocken ähnlich zerteilten wie in den begasten Suspensionen. 30 min nach Ansatz der Schlämme wurden ihnen je 100 mg Glukose/l zugesetzt und in gleichen Zeitabständen Proben zur Bestimmung des verbliebenen Zuckers erhoben. Die Analysen erfolgten sowohl nach SUNDMANN *et al.* [16] wie auch mittels quantitativer Papierchromatographie, da damit gerechnet werden musste, dass unter Umständen reduzierende Zwischenprodukte des Glukoseabbaues die Ergebnisse reduktometrischer Methoden verfälschen konnten.

Ergebnis: In Tabelle 4 sind die vollständigen analytischen Beobachtungen zusammengestellt (Mittelwerte). Leider lassen sich die während der Beobachtungsperiode in den Schlamm suspensionen herrschenden Sauerstoffkonzentrationen aus methodischen Gründen nicht genau angeben.

Man kann aber abschätzen, dass unter den gewählten Begasungsbedingungen mit reinem O₂ und Luft die Sauerstoffkonzentrationen im Schlammwasser im Bereiche von 20—30 mg O/l bzw. 5—7 mg O/l lagen. In der mit N₂ begasten Probe war die Konzentration sicher weit unter 0,1 mg O/l (O-Partialdruck im Gas etwa 1,5 mm, was einer Sättigungskonzentration in reinem Wasser von rund 0,1 mg/l entspricht), und in der Schüttelprobe musste der Sauerstoffdruck schon wenige Minuten nach Ansatz auf Null gesunken sein.

In Übereinstimmung mit den früheren Versuchen fallen die Glukosekonzentrationen in allen 4 Ansätzen wiederum linear mit der Kontaktzeit ab. Die chromatographisch bestimmten Werte weisen dabei erwartungsgemäss eine grössere Streuung auf als die direkt bestimmten. Die Regressionskoeffizienten (das heisst Geschwindigkeitskonstanten für die Glukoseelimination), die sich mit den beiden Analysenmethoden gewinnen lassen, sind jedoch praktisch identisch. Auf Grund der Streuungen der Regressionskoeffizienten lässt sich berechnen, wie gross die Differenzen zwischen ihnen mindestens sein müssten, um einen gesicherten Unterschied der Eliminationsgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Versuchsbedingungen anzuzeigen. Für $P = 0,01$ findet man bei den reduktometrisch bestimmten Werten eine Grösse von $\Delta k_0 = 0,125$, das heisst, die in Tabelle 4 angegebenen k_0 -Werte sind als gleichartig zu betrachten. Innerhalb der verhältnismässig kurzen Beobachtungszeit des Experimentes ist also ein Einfluss der Sauerstoffspannung auf die Eliminationsgeschwindigkeit der Glukose nicht nachzuweisen.

3.42 Glutaminsäure als Substrat

Das vorstehende Resultat ist insofern nicht unerwartet, als wir nach allen Erfahrungen annehmen müssen, dass die Resorption von Glukose nicht von der Zellatmung abhängig ist. Bei Substraten, deren Aufnahme in die Zelle eine endergone Stoffwechselleistung darstellt, sollte jedoch aller Voraussicht nach die Resorption bei *aeroben* Organismen in gewissem Umfange von deren Sauerstoffversorgung abhängig sein.

Zur Prüfung dieser Frage haben wir als günstiges Beispiel die Resorption von Glutaminsäure gewählt. GALE *et al.* [3] haben nachgewiesen, dass Glutaminsäure (und in analoger Weise auch Glutamin, Histidin und vermutlich eine Reihe weiterer Aminosäuren und Amine) von grampositiven Bakterien nur resorbiert wird, wenn eine Energiequelle gleichzeitig zur Verfügung steht (zum Beispiel Glukose). Wir wissen allerdings vorläufig noch nicht, welche Stufe der Glukoseveratmung als Motor für die Aminosäureresorption dient.

Versuchsansatz: Belebtschlamm aus unserer Versuchsanlage Tüffenwies wurde in analoger Weise wie beim vorstehenden Glukoseversuch in einer wesentlich verbesserten apparativen Einrichtung mit reinem O₂, Luft, techn. N₂ (1,5% O₂ enthaltend) und reinstem, mittels Kupferkontakt von O₂ befreitem N₂ im Lösungsgleichgewicht gehalten. 1 h nach Beginn der Begasung wurden den Schlammproben 7 mg/l α -NH₂-N als Glutamat zugesetzt und der Abfall der Glutaminsäurekonzentration in der wässrigen Phase verfolgt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt und können wie folgt gedeutet werden:

1. Das Verschwinden der Glutaminsäure ist deutlich vom Sauerstoffgehalt des Milieus abhängig, wobei zwischen Sauerstoffkonzentrationen von 38,3 mg/l- und 0,3 mg/l allerdings nur ein Unterschied in der Eliminationsgeschwindigkeit von rund 1:2 besteht. Unter vollständig anaeroben Bedingungen ist eine Elimination nicht zu erkennen, der Aminosäuregehalt der Lösung steigt sogar im Laufe der Versuchszeit etwas an (Autolyse). Ein Unterschied der Glutaminsäure-Eliminationsgeschwindigkeit bei 38,3 mg O/l und 5,9 mg O/l ist auf Grund der vorliegenden Ziffern nicht gesichert nachweisbar.

2. Die Glutaminsäurekonzentration nimmt in Übereinstimmung mit früheren Versuchen mit anderen Substraten innerhalb des analytisch zugänglichen Konzentrationsbereichs linear mit der Kontaktzeit ab.

3. Während der ganzen Beobachtungszeit steigt die NH₄-Konzentration in der Schlammsuspension annähernd proportional mit der Zeit, zeigt aber

Tabelle 5

Elimination von Glutaminsäure bei verschiedenen O₂-Gehalten im Schlamm-Wasser-Gemisch

	Gasphase									
	O ₂		Luft		techn. N ₂	N ₂	Luft (Kontrolle)			
O ₂ -Gehalt im Schlamm- gemisch, mg O/l ¹⁾	38,3		5,9		0,3	0,0	7,0			
Schlammkonzentration mg TS/l	2228		2130		2116	2082	2008			
pH	7,5		7,5		7,5	7,5	7,5			
Temperatur °C	20,0		20,0		20,0	20,0	20,0			
Glutamat-Zusatz mg α-NH ₂ -N/l	7,0		7,0		7,0	7,0	0			
Konzentration in mg N/l	α-NH ₂	NH ₄	α-NH ₂	NH ₄	α-NH ₂	NH ₄	α-NH ₂	NH ₄		
vor Zusatz	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,3	0,75	0,55	0,0	0,1
nach Zusatz 10 min	7,0	0,2	7,7	0,2	7,2	0,4	—	—	0,0	0,1
1 h	3,3	1,0	2,8	0,9	5,3	1,3	7,4	0,8	0,0	0,8
2 h	0,0	1,9	0,0	1,7	3,4	2,5	8,0	1,0	0,0	0,5
3 h	0,0	2,3	0,0	2,2	1,6	3,7	8,4	1,4	0,0	0,6
4 h	0,0	3,0	0,0	3,0	0,0	4,8	7,9	1,5	0,0	0,9
5 h	0,0	3,7	0,0	3,5	0,0	5,3	8,3	1,9	0,0	1,4
6 h	0,0	4,7	0,0	4,4	0,0	6,0	8,7	2,5	0,0	2,5
7 h	0,0	5,8	0,0	5,2	0,0	6,3	8,7	2,9	0,0	3,1
8 h	0,0	6,4	0,0	6,2	0,0	8,0	8,7	3,5	0,0	3,8
Glutamat-Elimination mg α-NH ₂ -N/g TS·h . . .	1,6		2,0		0,8	0	0			

1) Mittelwerte.

keinen direkten Zusammenhang mit dem Verschwinden der Glutaminsäure. Immerhin ist die Geschwindigkeit der Ammoniumbildung in den sauerstoffhaltigen, mit Glutaminsäure belasteten Suspensionen deutlich grösser als beim Kontrollschlamm. Das Maximum wird beim Schlamm mit dem kleinsten Sauerstoffgehalt erreicht. Der anaerob gehaltene Schlamm zeigt die gleiche Geschwindigkeit der NH₄-Bildung wie der belüftete, glutaminsäurefreie Kontrollschlamm. Die Glutaminsäureresorption führt also zu einer verstärkten NH₄-Ausscheidung des Schlammes, ein quantitativer Zusammenhang der beiden Vorgänge besteht aber nicht.

4. Die Konzentrationen von NO₃⁻, NO₂⁻ und des organischen Stickstoffs (abzüglich freie Aminosäuren) in der wässrigen Phase zeigen inner-

halb der Versuchszeit keine wesentlichen Veränderungen. Die Nitratkonzentrationen halten sich dauernd unter 0,2 mg N/l. Im schwach belüfteten Schlamm ist stets eine Nitritkonzentration von rund 0,15 mg N/l nachzuweisen, während in allen anderen Schlämmen Nitrit-Ion höchstens in Spuren beobachtet wurde.

Aus dem Experiment muss geschlossen werden, dass die Elimination der Glutaminsäure, soweit sie auf der Resorption der Glutaminsäuremolekeln durch die Belebtschlammflora besteht, unzweifelhaft von der Sauerstoffversorgung, das heisst der Atmung der Organismen abhängig ist. Diese war bei den Schlämmen mit 38,3 bzw. 5,9 mg O/l in keiner Weise gehemmt (kein Unterschied in der Eliminationsgeschwindigkeit). Aus unseren früheren Berechnungen [21] ist aber zu schliessen, dass in der Suspension mit nur 0,3 mg O/l ein wesentlicher Teil der Organismen von der für eine normale Atmung genügenden Sauerstoffversorgung abgeschnitten war, und damit fielen diese Zellen auch für die Glutaminsäureresorption aus.

Die vorstehenden Experimente können natürlich nur Hinweise auf die Wechselwirkung zwischen Substratresorption und Sauerstoffspannung in einer Belebtschlamm suspension geben und sollten lediglich als erster Ansatz dazu dienen, um festzustellen, wie weit der Sauerstoffversorgung in einem Belüftungsbecken (immer unter aeroben Bedingungen) eine Bedeutung als *begrenzender* Faktor für die Eliminationsleistung zukommt.

Nach den neueren Erfahrungen der Bakterienphysiologie (vgl. zum Beispiel die zusammenfassenden Darstellungen anlässlich des Symposiums über *Active Transport* der Society of Experimental Biology, 1954) haben wir zu unterscheiden zwischen: 1. Substraten, deren Resorption unabhängig von energieliefernden Prozessen in der Zelle erfolgt, und 2. Substraten, die nur bei gleichzeitig stattfindender Atmung aufgenommen werden können. Die Resorption der ersten Gruppe ist vom Sauerstoffgehalt des Milieus unabhängig. Wenn wir für die zweite Substratgruppe annehmen, dass ihre Resorptionsgeschwindigkeit sich proportional zur Atmungsintensität verhalte, so ist als begrenzender Faktor diejenige O-Spannung zu betrachten, die gerade noch eine *maximale* Atmungsgeschwindigkeit bei gegebenen übrigen Milieubedingungen gestattet. Sie kann also höchstens so gross wie die kritische Sauerstoffspannung sein. Gemäss den dafür bekannten Werten wäre für *einzelnen dispergierten Zellen*, also bei O-Konzentrationen um 0,1 bis 0,2 mg/l, eine ungehemmte Elimination derjenigen Substrate möglich, deren Resorption mit der Atmung verknüpft ist. Aber auch bei viel geringeren O-Konzentrationen müssten noch erhebliche Eliminationsgeschwindigkeiten möglich sein. Für die Verhältnisse des *flockigen Belebtschlammes* gelten

sinngemäss die Bedingungen, die früher abgeleitet wurden [21]. Gleichzeitig tritt dann aber auch das Verhältnis der Diffusionsgeschwindigkeiten des Sauerstoffs und des zu resorbierenden Substrates als massgebende Grösse für die Eliminationsgeschwindigkeit auf. Man kann leicht zeigen, dass in wenig konzentrierten Abwässern wohl immer mit einer viel grösseren Geschwindigkeit des Sauerstoff- als des Substratzutrittes zu den Zellen im Innern von Flocken gerechnet werden kann. Man darf deshalb annehmen, *dass bei Sauerstoffkonzentrationen im Belebtschlamm, die gerade noch einen aeroben Stoffwechsel der Einzelindividuen gestatten, die Eliminationsgeschwindigkeit der verschiedenen Substrattypen nicht mehr von der Sauerstoffspannung abhängig ist.* Wir können nach diesen physiologischen Überlegungen deshalb die Ansicht von PASVEER [10] nicht vorbehaltlos teilen, wonach die Belüftungsintensität beim Belebtschlammverfahren als «begrenzender Faktor» für die Reinigungsleistung zu betrachten sei. Auch die praktischen Erfahrungen sprechen gegen diese Auffassung, immer unter der Voraussetzung, dass die kritische Sauerstoffspannung für alle Schlammorganismen aufrechterhalten bleibe.

Die bisherige Diskussion befasste sich ausschliesslich mit dem physiologischen Problem der Abhängigkeit der *Resorptionsleistung* eines bestimmten Belebtschlammorganismus vom Sauerstoffgehalt des Milieus. Man muss sich aber darüber klar sein, dass ein weiterer Einfluss der Sauerstoffspannung, nämlich die *Wechselwirkung zwischen Artenzusammensetzung des Belebtschlammes und Sauerstoffkonzentration im Belüftungsbecken* sehr wahrscheinlich eine grosse praktische Bedeutung besitzt. Leider weiss man heute über die Soziologie eines Belebtschlammes in Funktion verschiedener Betriebsbedingungen einer Anlage praktisch gar nichts, und ebenso liegen auch eventuelle Wechselwirkungen zwischen der Artenzusammensetzung eines Schlammes und seiner Reinigungsleistung völlig im dunkeln. Bevor nicht geeignete Methoden gefunden werden, um Belebtschlämme soziologisch zu charakterisieren, wird es nicht möglich sein, die Bedeutung der Sauerstoffkonzentration in einem Belüftungsbecken als Betriebsparameter voll zu erfassen.

Aus physiologischen Gründen kommt man immerhin zur Schlussfolgerung, dass die in der Praxis feststellbare Abhängigkeit der Leistung einer Belebtschlammanlage vom Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken indirekter Art sein muss. Die beobachtbaren Leistungsänderungen sind auf Verschiebungen der Artenzusammensetzung des Belebtschlammes in Funktion der Sauerstoffspannung des Milieus zurückzuführen.

4. Zusammenfassung einiger Werte von Eliminationsgeschwindigkeiten

Wir haben im Laufe der letzten Jahre zahlreiche Experimente über die Elimination verschiedener Substrate durch Belebtschlamm vorgenommen, von denen in Tabelle 6 einige zusammengefasst sind. Ergebnisse von Versuchen mit dem gleichen Substrat, die mehrmals, aber unter ähnlichen Bedingungen, ausgeführt wurden, sind sich so ähnlich, dass auf ihre Wiedergabe verzichtet werden kann.

In einigen Fällen konnten Belebtschlämme untersucht werden, die an die Substrate angepasst waren, weil sie aus Modellversuchen über die Reinigung von Abwässern stammten, welche die betreffenden Verbindungen als dominante Verunreinigungsstoffe enthielten. Wie aus Tabelle 6 hervorgeht, erhöht die *Substratadaptation* in den bisher untersuchten Fällen erwar-

Tabelle 6

Spezifische Elimination von reinen Substraten durch Belebtschlamm aus häuslichem Abwasser

Substrat	Temperatur °C	Endogene Atmung mg O/g TS · h	Spezifische Elimination mg Substrat/ g TS · h	Verlauf der Eliminations- kurve	Bemerkungen
Glukose	20	7,5	16,2	linear	Schlamm nicht adaptiert
Glukose	25	13,2	74,3	linear	Schlamm adaptiert an Saccharose
Saccharose	25	11,4	50,7	linear	Adaptiert an Saccharose
Saccharose	33		50-60	(kontinuierlicher Betrieb)	Modellversuch über Reinigung von Zuckerfabrikabwasser
Acetat	25	10,7	45,5	linear	Schlamm nicht adaptiert
Butyrat	25	10,7	15,6	linear	dito
Lactat	20	10,2	25,8	linear	dito
Pepton (als org. N)	25	10,1	4,3	logarithm.	dito
Aspartat (als α -NH ₂ -N)	25	7,5	0,97	linear	dito
Tryptophan (als α -NH ₂ -N)	25	7,5	0,2	linear	dito
Glutaminat (als α -NH ₂ -N)	25		2,0	linear	dito

tungsgemäss die Eliminationsgeschwindigkeit ganz beträchtlich (vgl. auch die Elimination von Aspartat, Abbildung 1*b*). In der Praxis der Reinigung industrieller Abwässer ist dies eine geläufige Erscheinung, denn es ist wohl bekannt, dass eine Belebtschlamm- oder Tropfkörperanlage unter Umständen zuerst einer Anpassungsperiode an das betreffende spezielle Abwasser bedarf, bevor sie ihre optimale Leistung erreicht.

Wir haben in einer früheren Arbeit [20] darauf hingewiesen, dass die endogene Atmung eines Schlammes einen gewissen Maßstab für seine potentielle Gärungsleistung darstellt. Vergleicht man unter Berücksichtigung dieser Tatsache die spezifischen Eliminationen bei den verschiedenen Substraten in Tabelle 6, so fallen vor allem die geringen Werte für die Aminosäuren bzw. den Polypeptid-Stickstoff (Pepton) auf. Bevor nicht weitere Experimente mit solchen Verbindungen vorliegen, möchten wir vorläufig auf Schlussfolgerungen aus diesen Beobachtungen verzichten. Auf die praktische Bedeutung der relativ geringen Eliminationsgeschwindigkeiten der bisher untersuchten Stickstoffverbindungen kommen wir weiter unten zurück.

5. Diskussion der Ergebnisse

Bei der Dimensionierung des Belüftungsraumes einer biologischen Kläranlage spielt die Wahl der Kontaktzeit zwischen biologischem Schlamm und Abwasser eine wesentliche Rolle (hydraulische Raumbelastung). Man stützt sich für diesen Parameter bisher auf empirische Werte über zulässige «Raumbelastungen mit BSB_5 » ($\text{kg } BSB_5/\text{m}_3 \cdot \text{Tag}$). Würde man für alle vorkommenden Verunreinigungsstoffe die Eliminationsgeschwindigkeiten unter den, in jedem speziellen Fall vorliegenden, äusseren Bedingungen kennen, so könnte die unbedingt notwendige Behandlungszeit eines Abwassers genau angegeben werden. Da ferner nach allen bisherigen Erfahrungen mit einem linearen Verlauf der Elimination derjenigen Verbindungen, die von den Schlammorganismen direkt aufgenommen werden können, gerechnet werden darf, ist die Kontaktzeit Schlamm/Abwasser besonders leicht zu überblicken. Nun wird es allerdings praktisch nie möglich sein, die Eliminationsgeschwindigkeiten aller Inhaltsstoffe eines Abwassers zu bestimmen. Dies ist aber auch gar nicht notwendig, denn in den meisten industriellen Abwässern dominieren einige wenige Verbindungen, nach denen sich das Reinigungsverfahren in erster Linie auszurichten hat, sei es, weil die betreffenden Substanzen in hohen Konzentrationen vorliegen oder durch geringe Eliminationsgeschwindigkeiten ausgezeichnet

sind (Beispiele: Schlachthofabwässer: Eiweisse und Eiweißspaltprodukte; Molkereiabwässer: Eiweisse, Eiweißspaltprodukte und gewisse Zucker; Fruchtekonservenindustrie, Mostereien: verschiedene organische Säuren und Zucker; Zuckerfabrikabwässer: Zucker; usw.). Aus den in Tabelle 5 zusammengestellten Eliminationswerten kann rein qualitativ sofort entnommen werden, dass Zucker, Milchsäure, Fettsäuren (und vermutlich weitere Substanzen, die vorwiegend als Energiesubstrate ausgenützt werden) einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Belüftungsdauer eines Abwassers ausüben als entsprechende Konzentrationen von organischen Stickstoffverbindungen.

Die Eliminationsgeschwindigkeit stellt eine von technischen Gegebenheiten ganz unabhängige Grösse dar, die für jedes Substrat einen maximalen Wert nicht überschreiten kann. Diese Maximalgeschwindigkeit wird dann erreicht, wenn bei vollständiger Adaptation der Organismen an das Substrat ein inniger und dauernder Kontakt zwischen Substratlösung und den einzelnen Zellen gewährleistet ist und optimale Stoffwechselbedingungen für die Schlammbiozönose herrschen (vor allem hinsichtlich Nährstoffgehalt, Temperatur, pH und Sauerstoffspannung des Schlammgemisches).

6. Zusammenfassung

Wir haben die Konzentrationsabnahme einiger reiner Substanzen in Belebtschlammuspensionen im Verlaufe der Belüftungszeit quantitativ verfolgt. Die Beobachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Die bisher untersuchten, von Belebtschlammorganismen wahrscheinlich direkt resorbierbaren Substrate werden proportional zur Belüftungszeit aus Abwasser eliminiert (eventuelle enzymatische Adaptationen unmittelbar nach Kontakt eines Schlammes mit einem Substrat sollen dabei nicht berücksichtigt werden). Misst man die Substratkonzentrationen bei Substratgemischen oder polymolekularen Verbindungen, wie Pepton, mit unspezifischen Konzentrationsparametern, wie zum Beispiel dem BSB_5 , dem organischen Stickstoff usw., so ergeben sich exponentielle Kurven für den Konzentrationsabfall, die als Resultante von mehreren, mit verschiedenen Geschwindigkeiten verlaufenden Eliminationsvorgängen zu interpretieren sind.

b) Die Eliminationsgeschwindigkeit einfacher Substrate ist in Suspensionen desselben Schlammes unabhängig von der Anfangskonzentration des Substrates und proportional zur Schlammkonzentration.

c) Die Wirkung der Sauerstoffkonzentration im Belebtschlamm auf die Eliminationsgeschwindigkeit ist von der zu eliminierenden Substanz abhängig. Es wird geschlossen, dass die in der Praxis feststellbare Abhängigkeit der Leistung einer Belebtschlammanlage vom Sauerstoffgehalt im Belüftungsbecken indirekter Art sein muss. Die beobachtbaren Leistungsänderungen sind wahrscheinlich auf Verschiebungen der *Artenzusammensetzung* des Belebtschlammes in Funktion der Sauerstoffspannung des Milieus zurückzuführen.

d) Die Eliminationsgeschwindigkeit eines Substrates ist weitgehend von der Anpassung der Artenzusammensetzung der Schlammbiozönose an das Milieu abhängig, in welchem die betrachtete Substanz vorkommt.

e) Es werden die spezifischen Eliminationen $\text{mg Substrat/g Schlamm} \cdot \text{h}$ einiger Substanzen angegeben und die praktische Bedeutung dieser Werte kurz diskutiert.

SUMMARY

The concentration decrease of various pure organic compounds added to suspensions of washed activated sludge has been measured. The following observations are reported:

(1) The substrates used in this investigation are eliminated *in proportion to the aeration time* of the substrate-sludge mixture (enzymatic adaptations not accounted for). An exponential concentration decrease is observed with polymolecular substrates like peptone or with substrate mixtures when unspecific concentration parameters such as BOD or organic nitrogen etc. are applied. Nonlinear elimination curves are interpreted as the resultant of the individual linear elimination functions characteristic for each substance present in a waste.

(2) The elimination rates of pure substances added to suspension of the same activated sludge are independent from the initial substrate concentration and are proportional to the sludge concentration.

(3) The effect of the *oxygen tension* in the sludge suspension on the elimination rate varies with the kind of substrate. It is concluded that the obvious dependance of the purification efficiency of an activated sludge plant from the oxygen tension in the aeration basin is indirect. It is probably caused by shifts of the species composition of the sludge in accordance with oxygen concentration.

(4) The elimination rate of a substrate depends largely on the degree of sociological adaptation of the sludge to the milieu in which the substrate is presented.

(5) Specific elimination rates ($\text{mg substrate/g sludge} \cdot \text{h}$) of a variety of pure substances are presented and the practical significance of such figures is discussed.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BOISSONAS, R. A., *Helv. chim. Acta* 33, 1966 (1950).
- [2] DAVIDSON, J., *J. Dairy Res.* 16, Nr. 2 (1949).
- [3] GALE, E. F., *J. gen. Microbiol.* 1, 53, 327 (1947); 3, 369 (1949).
- [4] GELLMANN, J., und HEUKELEKIAN, H., *Sewage Industr. Wastes* 25, 1196 (1953).
- [5] GRANT, S., HURWITZ, E., und MOHLMAN, F. W., *Sewage Wks. J.* 2, 228 (1930).
- [6] HELMERS, E. N., FRAME, J. D., GREENBERG, A. E., und SAWYER, C. N., *Sewage Industr. Wastes* 23, 884 (1951).
- [7] HOOVER, S. R., JASEWICZ L., und PORGES, N., *Sewage Industr. Wastes* 25, 1163 (1953).
- [8] INGOLS, R. S., *Sewage Wks. J.* 10, 458 (1938).
- [9] NELSON, N., *J. biol. Chem.* 153, 375 (1944).
- [10] PASVEER, A., *Sewage Industr. Wastes* 26, 149 (1954).
- [11] RIDENOUR, G. M., *Sewage Wks. J.* 7, 25 (1935).
- [12] RUCHHOFT, C. C., MCNAMEE, P. D., und BUTTERFIELD, C. T., *Publ. Health Rep.* 53, 1690 (1938).
- [13] RUCHHOFT, C. C., KACHMAR, J. F., und MOORE, W. A., *Publ. Health Rep.* 55, 393 (1940).
- [14] SOMOGYI, M., *J. biol. Chem.* 160, 61 (1945).
- [15] STANLEY, W. E., *Sewage Wks. J.* 21, 625 (1949).
- [16] SUNDMANN, J., SAARNIO, J., und GUSTAFSON, Ch., *Paper & Timber [B]* 44, 115 (1951).
- [17] VOELKER, R. A., *Sewage Wks. J.* 5, 947 (1933).
- [18] WIKÉN, T., RICHARD, O., und AEBI, H., *Experientia* 6, 114 (1950).
- [19] WUHRMANN, K., *Sewage Industr. Wastes* 26, 1 (1954).
- [20] WUHRMANN, K., in: *Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes* (Reinhold Publ. Corp., New York 1956).
- [21] WUHRMANN, K., *Schweiz. Z. Path. Bakt.* 20, 567 (1957).