

# Belüftungseinrichtungen für Abwässer aus landtechnischer Sicht

Rudolf Th a e r

Institut für Landmaschinenforschung, Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

## 1. Einleitung

Die Verwertung und Beseitigung von Gülle (Flüssigung) und Jauche aus großen Schweine- und Rinderbeständen wirft in immer stärkerem Maße Probleme auf. Oft fehlt eine adäquate landwirtschaftliche Nutzfläche für deren Ausbringung oder die Nutzfläche ist nur über längere Wegstrecken erreichbar. Mit der Lagerung und Ausbringung der tierischen Exkremate sind Geruchsbelästigungen verbunden, die vielerorts nicht mehr hingenommen werden. Außerdem besteht bei unzeitiger Ausbringung die Gefahr, daß Krankheitserreger über die Pflanzen auf Tiere oder Menschen übertragen werden oder daß Grund- oder Oberflächenwasser verunreinigt wird.

Aus diesen Gründen sind Überlegungen und Untersuchungen im Gange, die Schwierigkeiten bei der Landausbringung zu beseitigen oder doch zu mindern. Oder man bemüht sich um neue Wege der Beseitigung und Verwertung der tierischen Exkremate. Tafel 1 zeigt einige Möglichkeiten, die erwogen werden.

## 2. Biologische Behandlung

In mehreren Verfahrensketten der Tafel 1 taucht die aerob-biologische Behandlung auf. Dieses Verfahren ist in der Abwassertechnik gebräuchlich und sei hier kurz erklärt.

Die von Menschen oder Tieren ausgeschiedenen Stoffe, die in der Hauptsache aus unvollständig genutzten oder umgebauten Nahrungsmitteln bestehen, werden im natürlichen Kreislauf von anderen Organismen aufgenommen. Eine große Bedeutung haben hierbei Bakterien. Für ihren Energiehaushalt veratmen sie einen beträchtlichen Teil der organischen Abfallsubstanzen — „Betriebsstoffwechsel“. Den anderen Teil benutzen sie zum Aufbau neuer Körpersubstanz — „Baustoffwechsel“. Einige dieser Bakterien müssen den für die Veratmung notwendigen Sauerstoff in chemisch ungebundener Form (z. B.  $O_2$  der Luft) dargeboten bekommen — aerobe Bakterien — andere gewinnen ihn aus den ihnen zur Nahrung dienenden Stoffen — anaerobe Bakterien. Wieder andere benutzen, wenn vorhanden, ungebundenen Sauerstoff, kommen aber bei dessen Fehlen auch mit chemisch gebundenem Sauerstoff (z. B. Nitrat und Sulfat) aus — fakultativ aerobe Bakterien. Der aerobe biologische Abbau liefert in der Hauptsache  $CO_2$  und  $H_2O$  und ist geruchlos. Beim anaeroben Abbau entstehen ebenfalls Kohlensäure und Wasser, daneben aber Schwefelwasserstoff und organische Säuren, die sich durch Gestank bemerkbar machen, unter bestimmten Bedingungen auch Methan. Den anaeroben Abbau bezeichnet man als Faulung.

Diese in der Natur im oder auf dem Boden oder im Wasser weiträumig vonstatten gehenden biologischen Vorgänge verwendet man bei der Behandlung von Siedlungs- und Industrieabwässern in örtlich und zeitlich konzentrierter Form.

In der Abwassertechnik spielt die Faulung eine beträchtliche Rolle bei der Behandlung der Abwässerschlämme. In der Landwirtschaft wurde sie nach dem letzten Krieg in Deutschland zur Biogaserzeugung benutzt [44; 14] und findet in den USA in anaeroben Lagunen Anwendung [15]. Sie steht aber aus verschiedenen Gründen [41; 54] heute für die mitteleuropäische Landwirtschaft nicht im Vordergrund.

Von den aeroben Behandlungsverfahren der Klärtechnik sei zuerst das Tropfkörperverfahren als ein altes, aber auch heute noch weithin gebräuchliches genannt. Das Abwasser

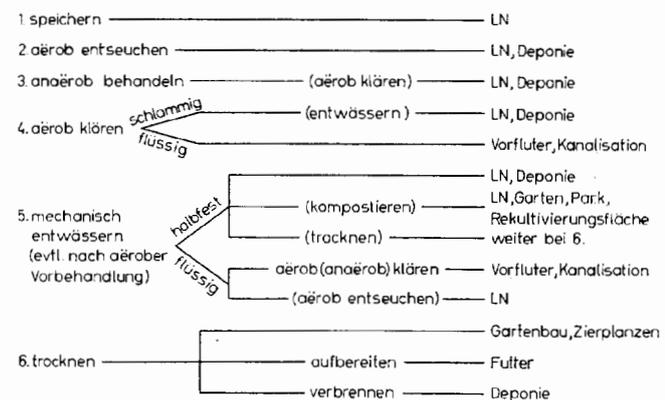
tropft durch ein großporiges Haufwerk aus Gesteinsbrocken, Schlacke, auch Kunststoffteilen, das von einem Mantel umgeben ist. In das Haufwerk hinein hat Luft reichlichen Zutritt. Nach kurzer Zeit siedelt sich auf den Haufwerkselementen ein „biologischer Rasen“ an, der von Mikroorganismen gebildet wird. Diese entziehen dem Abwasser die organischen Schmutzstoffe. Das Verfahren verlangt eine gute Vorklärung des Abwassers. In England sind beim NIAE Versuche zur Anwendung dieses Verfahrens bei Schweinegülle in Gang [17]. Trotz starker Verdünnung war der Trockensubstanzgehalt der Gülle noch so groß, daß das Verfahren erheblich abgeändert werden mußte.

Auch der „Tauchwinkel“ [12], ein anderes, aber noch wenig bekanntes aerobes Verfahren wird in der Landwirtschaft erprobt [54]. Um eine Walze, die bis zur Achshöhe ins Abwasser taucht, sind von der einen zur anderen Stirnseite Rohre spiralförmig herumgewickelt. Beim Drehen der Walze schöpfen die Rohre mit ihrem einem offenen Ende abwechselnd Wasser und Luft in sich hinein, die nach Durchlaufen der Rohre am anderen Ende wieder entweichen. In den Rohren bildet sich ein biologischer Rasen, der das Wasser reinigt.

Dieser Beitrag sei aber auf die apparativen Einrichtungen für das Belebtschlammverfahren beschränkt, das in der Klärtechnik heute vorzugsweise angewendet wird.

Beim Belebtschlammverfahren werden Bakterienflocken in einem von Abwasser durchströmten Becken durch technische Mittel — Druckluft, rotierende Kreisel und anderes mehr — in der Schwebe gehalten und mit Luftsauerstoff versorgt. Die Bakterien entziehen dem Abwasser die organischen Verschmutzungen. Dabei entstehen neue Bakterienmasse — Belebtschlamm — sowie Wasser und Kohlensäure; letztere entweicht als Gas. Dient das Verfahren nur zur Klärung des Wassers, so wird das Abwasser nach einigen Stunden in ein zweites Becken geleitet, in dem die Flocken sich als Schlamm absetzen. Ein Teil des Schlammes wird in das Belebungsbecken zurückgepumpt, wo er wiederum Schmutzstoffe aufnimmt, der andere als „Überschußschlamm“ abgetrennt und einer besonderen Schlammbehandlung unterzogen. Auf kleinen Klärwerken führt man oftmals auch die Schlammstabilisierung auf aerobem Wege im Belebungsbecken durch. Dann dürfen die Bakterien nur schwach mit Schmutzstoffen versorgt werden und müssen tage- oder wochenlang belüftet werden [18]. Die Schlammstabilisierung kann aber auch für

Tafel 1: Einige Möglichkeiten der Behandlung von Gülle und Jauche



sich allein in einem getrennten Becken aerob durchgeführt werden [33].

Es muß hier darauf hingewiesen werden, daß beim Belebtschlammverfahren ebenso wie bei anderen biologischen Verfahren im Abwasser enthaltene Phosphate und Stickstoff nur teilweise eliminiert werden.

Als ein weiteres aerobes Behandlungsverfahren ist neuerdings für hochkonzentrierte Substrate, wie es die landwirtschaftlichen Abgänge darstellen, die „Flüssigkompostierung“<sup>1)</sup> (System Fuchs) ins Gespräch gekommen [39; 40; 43; 52; 54]. Sie dient nicht der Phasentrennung des Flüssigmistes, sondern bezweckt analog zur Kompostierung von Festmist die Abtötung pathogener Organismen durch Selbsterwärmung sowie die Beseitigung oder Umwandlung des Geruchs, damit der Mist entsprechend Möglichkeit 2 (Tafel 1) schadlos und ohne Belästigung der Umwelt auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht werden kann.

Will man die Abgänge von Nutztierhaltungen mit gleichen oder ähnlichen Zielen wie kommunale Abwässer aerob behandeln, so muß man sich der großen Unterschiede bewußt sein, die ihre Beschaffenheit in mancherlei Beziehung aufweist. Abwassertechnische Kennwerte der tierischen Abgänge haben unter anderem RAGER [41] und TRAUSEN [54] aus Versuchen verschiedener Autoren zusammengestellt. Die Daten streuen stark. Die von RAGER gemittelten Werte des Trockensubstanzgehaltes (TS) und des „Biochemischen Sauerstoffbedarfes“ innerhalb von fünf Tagen (BSB<sub>5</sub>) sind in Tafel 2 entsprechenden Mittelwerten von Siedlungsabwässern gegenübergestellt. Der BSB<sub>5</sub> ist ein Maß, das in der Abwassertechnik zur Kennzeichnung der organischen Verschmutzung verwendet wird (siehe [18]).

Auch wenn die Exkremente den Stall in der Regel mit etwas Wasserzusatz verlassen, liegen ihre klärtechnischen Werte noch um eine oder mehrere Größenordnungen höher als die von Siedlungsabwässern. RAGER [41] gibt an, daß die tierischen Abgänge für eine klärtechnische Behandlung so stark zu verdünnen sind, daß der TS-Gehalt 5 Prozent und der BSB<sub>5</sub> 12 000 mg/l nicht überschreiten.

Zur Veranschaulichung der notwendigen Reinigungsleistungen sei hier bemerkt, daß der BSB<sub>5</sub> vollbiologisch gereinigten Abwasser beispielsweise 25 mg/l nicht übersteigen soll [18].

Für die Funktion der Einrichtungen für Sauerstoffeintrag und Umwälzung interessiert auch die Viskosität des zu behandelnden Materials. LOMMATZSCH [31; 32] hat mit Hilfe eines Rohrviskosimeters festgestellt, daß Rindergülle ein nicht-Newtonsches Verhalten zeigt. Der Größenordnung nach weist schwach verdünnte Rindergülle die 1000fache Zähigkeit von Wasser auf.

<sup>1)</sup> Dieser Ausdruck ist irreführend, da kein Kompost entsteht

**Tafel 2: Mittelwerte des Trockensubstanzgehaltes (TS) und des Biochemischen Sauerstoffbedarfes (BSB<sub>5</sub>) für Siedlungsabwässer und unverdünnte tierische Exkremente**

nach [18] bzw. [41]

	TS [%]	BSB <sub>5</sub> [mg/l]
Siedlungsabwässer		
ungeklärt	0,13	360
mechanisch vorgeklärt	0,09	230
Rinder		
Harn	5	13 500
Kot + Harn	11,6	15 300
Kälber		
Kot + Harn	1—1,5	11 400
Schweine		
Harn	2,1	8 800
Kot + Harn	8,4	28 600

### 3. Der künstliche Sauerstoffeintrag in Abwässer

Zum Verständnis des Sauerstoffeintrages durch eine Belüftungseinrichtung ist es zweckmäßig, sich den Weg des Sauerstoffes wie in [36; 37] vor Augen zu halten.

Sauerstoff ist in Wasser leichter löslich als Stickstoff. Nimmt Wasser aus der Luft Sauerstoff auf, so wird die Luftgrenzschicht an Sauerstoff ärmer. Infolgedessen muß zur Aufrechterhaltung der Sauerstoffaufnahme ständig O<sub>2</sub> aus der Luftmasse zur Wasseroberfläche hin diffundieren. Das geschieht aber schnell im Vergleich zur Sauerstoffaufnahme durch das Wasser, so daß die Vorgänge in der Luft nicht weiter betrachtet zu werden brauchen.

Der Sauerstoffeintrag in das Abwasser geht in seinem ersten Stadium, der Sättigung der monomolekularen Grenzschicht des Wassers, ebenfalls schnell vonstatten. Maßgebend für die Höhe der O<sub>2</sub>-Absorption ist der Sauerstofftransport ins Innere des Abwassers<sup>2)</sup>. Für die in der Zeiteinheit von Wasser absorbierte Sauerstoffmenge gilt [26; 13]:

$$\frac{dm}{dt} = K \cdot A (c_s - c) \quad (1)$$

Die Sauerstoffzufuhr ist also proportional der Summe A der Grenzflächen zwischen Luft und Wasser, dem Sättigungsdefizit des Sauerstoffs im Wasser  $c_s - c$  ( $c$  = Sauerstoffkonzentration zur Zeit  $t$ ,  $c_s$  = Sättigungskonzentration) und einem Geschwindigkeitskoeffizienten  $K$  (Dimension LT<sup>-1</sup>).

Der Koeffizient  $K$  hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die mit Sauerstoff angereicherte Oberflächenschicht des Wassers erneuert wird [37]. Die angereicherte Schicht wird vom übrigen Wasser aufgenommen, wo der Sauerstoff sich weiter ausbreiten kann. Herrscht genügend Turbulenz, ist also die Zahl  $r$  der Erneuerungen je Zeiteinheit groß genug, so gilt für Wasser annähernd

$$K = D \cdot r,$$

mit  $D$  als dem Diffusionskoeffizienten von Sauerstoff in Wasser [26]. Dieser beträgt bei 20 °C ungefähr  $2 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s [2].  $r$  nimmt in Belebungsbecken von Kläranlagen üblicherweise Werte von mehr als  $10 \text{ s}^{-1}$  an [26, Abb. 2]. PASVEER-SWEERIS [37] nennen für eine in ruhigem Wasser aufsteigende Luftblase von 2 mm Durchmesser ein  $r$  von  $100 \text{ s}^{-1}$ .

Die in einem Flüssigkeitsvolumen maximal lösliche Gasmenge, die Sättigungskonzentration  $c_s$ , nimmt mit der Temperatur ab und ist dem Partialdruck des Gases über der Flüssigkeit proportional. Für die Löslichkeit von Sauerstoff in destilliertem Wasser wurden aus Tafeln in [2] die folgenden Sättigungskonzentrationen  $c_s$  errechnet:

Temperatur [°C]	0	10	20	30	40	50	60	70
$c_s$ [mg/l]	14,6	11,4	9,3	7,85	6,9	6,2	5,8	5,5

Salzhaltiges Wasser weist niedrigere Werte auf; so bewirkt beispielsweise ein NaCl-Gehalt von 5 % bei 25 °C eine Verringerung des Sättigungswertes um 29 % [2]. Sonstige Verschmutzungen bringen nach [36] nur geringe Erniedrigungen. ROBINSON und andere [42] fanden eine sehr starke Abminderung der Sauerstoffkonzentration im Urin bei kaum vermindertem O<sub>2</sub>-Partialdruck. Sie vermuten, daß die Sättigungskonzentration in Schweineflüssigmist bei nur 1 mg/l liegt (siehe S. 145 der Diskussion hinter [42]).

Die Sauerstoffkonzentration  $c$  ist im stationären Zustand, das heißt wenn Sauerstoffzufuhr gleich Sauerstoffverbrauch, konstant. Um einen hohen Sauerstoffeintrag zu erhalten, hält man  $c$  zweckmäßigerweise niedrig. In verschiedenen Untersuchungen wurde festgestellt, daß die Reinigungswirkung der Organismen in einem Belebungsbecken nicht darunter leidet, wenn  $c$  nur 1—2 mg/l beträgt [30, S. 386] (siehe auch [16]).

<sup>2)</sup> Nach neueren Überlegungen von PASVEER und SWEERIS [37] wird bei Siedlungsabwässern der Sauerstoff schon in der Grenzschicht der Flocke verbraucht. Die Geschwindigkeit, mit der Sauerstoff in das Innere der Flocken diffundieren würde, braucht also nicht betrachtet zu werden. Anders kann es sich bei sehr nährstoffreichen Abwässern verhalten.

Differieren Sauerstoffzufuhr und Sauerstoffverbrauch, so ergibt sich für  $c$  die Beziehung

$$\frac{dc}{dt} = k(c_s - c) - OV \quad (2)$$

mit der „Belüftungskonstanten“  $k = \frac{AK}{V}$  (Dimension  $T^{-1}$ )

und  $OV$  als volumenbezogener Geschwindigkeit des Sauerstoffverbrauches. Gl. (2) geht unter Berücksichtigung des Sauerstoffverbrauches aus der durch das Wasservolumen  $V$  dividierten Gl. (1) hervor.

Bei Wasser ohne Sauerstoffverbrauch fällt  $OV$  weg, das Wasser reichert sich mit Sauerstoff an. Durch Integration von Gl. (2) ergibt sich für diesen Fall die Beziehung:

$$c = c_s - (c_s - c_0) e^{-kt}$$

mit  $c_0$  als der Sauerstoffkonzentration zur Zeit  $t = 0$ . Diesen Konzentrationsanstieg, ausgehend von  $c_0 = 0$ , zeigt Bild 1. Aus dieser Gleichung folgt

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{c_s - c_0}{c_s - c} \quad (3)$$

Gl. (3) erlaubt die Bestimmung von Belüftungskonstanten für Wasser aus Messungen der Sauerstoffkonzentrationen zu verschiedenen Zeiten.

Die Belüftungskonstante führt auf das von KESSENER und RIBBIUS [27] als Beurteilungsgröße eingeführte „Sauerstoffzufuhrvermögen“ (Oxygenation Capacity, abgekürzt OC). Nach DIN 4045 wird es kurz mit „Sauerstoffzufuhr“ bezeichnet und ist definiert als die Geschwindigkeit der Änderung der Sauerstoffkonzentration in Reinwasser bei  $c = 0$  für  $20^\circ C$  und 760 Torr. Unter den gegebenen Randbedingungen ist also

$$OC = \left[ \frac{dc}{dt} \right]_{c=0} = k_{20} \cdot c_s$$

OC wird nach DIN 4045 in  $kg O_2/(m^3 d)$  angegeben, häufig auch in  $g/(m^3 h)$ . Zur Feststellung von OC wird Wasser sauerstofffrei gemacht und aus dem Verlauf des Konzentrationsanstieges mit Hilfe Gl. (3)  $k_{20}$  bestimmt.

Bei verschmutztem Wasser können in Gl. (1), abgesehen von  $c_s$ , sowohl  $A$  als auch  $K$  andere Werte annehmen. Man bringt dies durch den Sauerstoffübertragungsfaktor  $\alpha$  zum Ausdruck. Es ist

$$\alpha = \frac{\text{Sauerstoffzufuhr Abwasser}}{\text{Sauerstoffzufuhr Reinwasser}}$$

$\alpha$  bringt unter anderem die Auswirkung abweichender Oberflächenspannung und Viskosität sowie des Entstehens einer Diffusionschranke an der Luft-Wasser-Grenzfläche zum Ausdruck [9].

Diese Einflüsse wirken sich je nach Art der Belüftung verschieden stark aus. Deshalb ist der Übertragungsfaktor nicht nur vom Abwasser, sondern auch von der Belüftungseinrichtung abhängig. Im allgemeinen liegt  $\alpha$  unter 1, es sind aber auch schon  $\alpha$ -Werte über 1 gemessen worden [50; 8].

Das Sauerstoffzufuhrvermögen muß in einem bestimmten Verhältnis zum Sauerstoffbedarf, ausgedrückt als  $BSB_5$ -Zulauf in der Zeiteinheit (load), stehen. Dies Verhältnis nennt man  $OC/load$ . Für die Behandlung von Siedlungsabwässern werden für dies Verhältnis Werte zwischen 1 und 2,3  $gO_2/g BSB_5$  empfohlen je nach Art der Reinigung [18].

Als Maß zur energetischen Beurteilung einer Belüftungseinrichtung benutzt man den „Sauerstofftrag“  $O_N$ . Er ist die auf den Energieverbrauch je Raumeinheit ( $N_R$ ) bezogene Sauerstoffzufuhr, also  $O_N = OC/N_R$ .

Bei der nun folgenden Besprechung der Belüftungseinrichtungen werden Angaben über Sauerstoffzufuhr und -ertrag gemacht, wie sie in der Literatur anzutreffen sind. Es ist

<sup>3)</sup> d = Tag

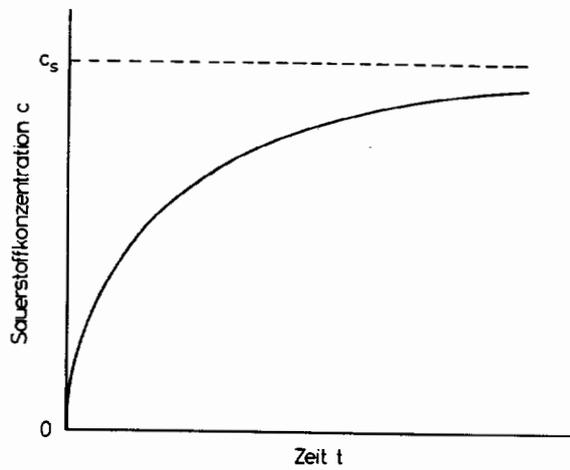


Bild 1: Anstieg der Sauerstoffkonzentration bei der Belüftung sauerstofffreien Wassers  
 $c_s$  = Sättigungskonzentration

aber zu beachten, daß die Versuchsvoraussetzungen, insbesondere die Form der benutzten Becken, auf die hier nicht eingegangen werden kann, Sauerstoffzufuhr und -ertrag, aber auch deren Abminderung durch Wasserverunreinigungen, beeinflussen [8; 10].

## 4. Belüftungseinrichtungen

### 4.1. Wichtige Gesichtspunkte

Für die Behandlung von Siedlungs- und Industrieabwässern ist eine beträchtliche Zahl unterschiedlicher Belüftungseinrichtungen entwickelt worden. Außerdem sind aus der chemischen Verfahrenstechnik Begasungseinrichtungen bekannt, die für landwirtschaftliche Abwässer ebenfalls als Belüfter in Betracht kommen.

Die Belüftungseinrichtungen werden hier im Hinblick auf ihren Einsatz in der Landwirtschaft besprochen. Aus diesem Sektor liegen aber zumeist nur wenige oder gar keine Daten vor. Deshalb werden die Aussagen zum größten Teil der Klärtechnik oder der Verfahrenstechnik entnommen. Dabei können nur einige Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Eine vollständigere Wertung der in der Abwassertechnik gängigen Belüfter ist der einschlägigen Literatur, insbesondere dem ATV-Handbuch [30] zu entnehmen. Die technischen Daten für den Einsatz in der Landwirtschaft sind zu einem beträchtlichen Teil noch zu erarbeiten, soweit dies lohnend erscheint. Hinsichtlich der landwirtschaftlich-betriebstechnischen Beurteilung einiger Systeme sei auf [54] verwiesen.

Bei der Beurteilung von Belüftungseinrichtungen sind verschiedene Kriterien zu berücksichtigen. Die erforderliche Sauerstoffmenge soll unter möglichst geringem Bau- und Wartungsaufwand, insbesondere aber geringem Energieverbrauch in das Substrat eingetragen und fein verteilt an die Bakterien herangebracht werden. Die Belüftungseinrichtung muß die im Substrat befindlichen Feststoffpartikel suspendieren und das Substrat umwälzen und homogenisieren. In tierischen Abgängen ist das Suspendieren und Homogenisieren im allgemeinen aufwendiger als in Siedlungsabwässern mit ihrem geringeren Feststoffgehalt und zumeist kleineren Partikeln. Um Aufschluß über die Umwälzleistung eines Aggregates und die Gefahr des Absetzens zu gewinnen, wird vielfach die Strömung an verschiedenen Stellen des Beckens gemessen. Insbesondere ist die Minimalgeschwindigkeit an der Beckensohle wichtig. In der Klärtechnik soll sie über 15 cm/s liegen [28]. Für die Behandlung tierischer Exkremnte sind höhere Geschwindigkeiten zu fordern. In [22] werden für landwirtschaftliche Oxidationsgräben mindestens 40 cm/s verlangt. Die Strömung ist aber nicht nur Funktion der Belüftungseinrichtung, sondern

auch des Beckens und eventueller Einbauten, was Übertragbarkeit und Vergleich erschwert.

#### 4.2. Einteilung der Belüftungseinrichtungen

In Anlehnung an VON DER EMDE [11] seien die Belüftungseinrichtungen entsprechend Tafel 3 eingeteilt.

Zur Abgrenzung innerhalb der Druckbelüftung schlägt VON DER EMDE vor, bei porösem Filtermaterial mit Porenweiten in der Größenordnung 0,1 mm von feinblasiger, bei gelochten Rohren und Platten mit Lochweiten bis zu 5 mm von mittelblasiger und bei größeren Lochweiten von grobblasiger Belüftung zu sprechen.

VON DER EMDE zählt die Saugbelüfter zu den Oberflächenbelüftern. In der Abwassertechnik haben sie bisher keine große Bedeutung erlangt. Aber in der Verfahrenstechnik sind Saugrührer ein beliebtes Werkzeug zum Begasen von Flüssigkeiten. Da sie nach einem anderen Prinzip als die Oberflächenbelüfter arbeiten und es den Anschein hat, daß sie bei der Güllebearbeitung Bedeutung erlangen, sollen sie getrennt besprochen werden. Die Ausdrücke Schildsaugrührer und Wirbelsaugrührer werden hier vorgeschlagen, um diese Saugrührer von den Hohlrührern zu unterscheiden (Beschreibung später).

#### 4.3. Druckbelüftung

##### 4.3.1. Maßgebende Faktoren

Bei der Druckbelüftung wird komprimierte Luft ins Abwasser geleitet, zumeist unten im Becken. Durch die Luft wird zugleich das Abwasser in Bewegung gesetzt und der belebte Schlamm in der Schwebe gehalten.

Die in Gl. (1) auftretende Gesamtgrenzfläche  $A$  zwischen Luft und Wasser ist von der Größe der Luftblasen abhängig. Bei gleichem Luftdurchsatz und gleicher Verweilzeit ist  $A$  umso größer, je kleiner die Luftblasen sind. Bei feinporigen Filtern ist der Blasendurchmesser stets erheblich größer als die Porenweite. Bei langsamer Blasenbildung ist er von der Porenweite abhängig, steigt aber nicht im gleichen Maße wie diese an. So betrug er in Wasser in einer Versuchsreihe bei 0,025 mm Porenweite 0,5 mm, bei 0,3 mm Porenweite gut 2 mm [49]. Mit zunehmendem Luftdurchsatz nimmt er zu bis zu einem Endwert 5 bis 6 mm, der unabhängig von der Porenweite zu sein scheint. Oberflächenaktive Zusätze

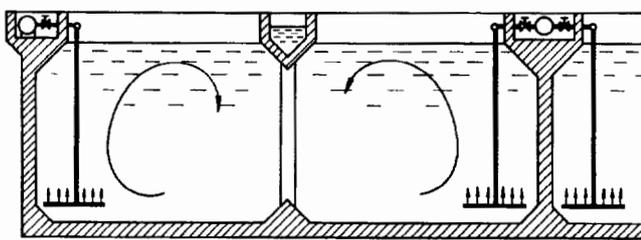


Bild 2: Feinblasige Breitbandbelüftung mit Brandol-Filterrohren [59]

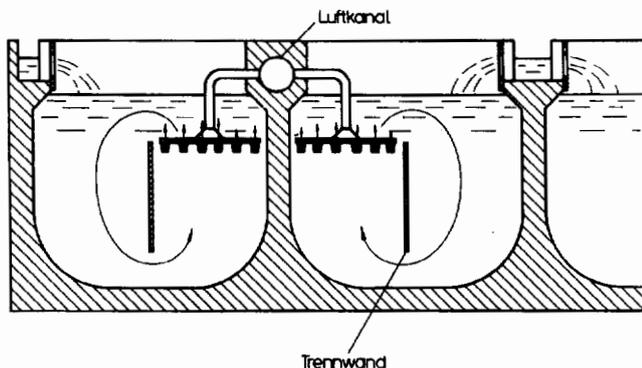


Bild 3: Hochliegende mittelblasige Belüftung (System Inka) [59]

Tafel 3: Einteilung der Belüftungseinrichtungen

Druckbelüftung	Oberflächenbelüftung	Kombinierte Belüftung	Sogbelüftung
feinblasige	Kreisbelüfter	Druckbelüfter und Rührwerk	Hohlrührer
mittelblasige	Belüftungswalzen	Mittelblasiger Drehbelüfter	Schildsaugrührer
grobblasige	Staustrahlbelüfter	Belüfter mit partieller Umwälzung Ejektoren	Wirbelsaugrührer

erniedrigen die Blasengröße stark. An Siebböden mit 0,5 mm Lochdurchmesser stellte TOTENHAUPT [53] mittlere Blasendurchmesser von 5 mm, an Einzelrohren mit 3 bis 10 mm Durchmesser mittlere Blasendurchmesser von 3 bis 4 mm fest.

Die Grenzflächengröße  $A$  ist außerdem eine Funktion der Verweilzeit der Blasen. Diese ergibt sich aus Höhe der Flüssigkeitssäule und Steiggeschwindigkeit der Blasen. Die Steiggeschwindigkeit wird hauptsächlich von Größe und Form der Blasen sowie der Flüssigkeitsbewegung bestimmt. Die Form der Blasen hängt wiederum, ebenso wie ihre Größe, von Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit ab [55].

Die Grenzsteiggeschwindigkeit in ruhendem Wasser wird schon nach wenigen Zentimetern erreicht und bewegt sich bei den in Betracht kommenden Blasendurchmessern etwa zwischen 20 und 35 cm/s [29]. Für eine 3 m hohe ruhende Wassersäule berechnete PASVEER [36] infolgedessen eine 50-prozentige Ausnutzung des in der Blase eingeschlossenen Sauerstoffs. Diese hohe Ausnutzung wird aber in der Praxis bei weitem nicht erreicht, vornehmlich weil das Wasser ebenfalls nach oben strömt. Dadurch wird die Kontaktzeit auf  $1/3$  bis  $1/4$  reduziert. Wie sehr die Sauerstoffausnutzung durch die Richtung der Wasserströmung beeinflusst wird, geht aus Versuchen hervor, in denen das Wasser horizontal über Luftdüsen hinweggeführt wurde. Die Ausnutzung stieg auf den zwei- bis dreifachen Wert [37].

Als Mittelwert der üblichen Sauerstoffausnutzung gibt IMHOFF [18] für 3 m Einblastiefe an:

feinblasige Belüftung	11 %
mittelblasige Belüftung	6,5 %
grobblasige Belüftung	5,5 %

##### 4.3.2. Ausführungsformen der Druckbelüftung

Einige typische Ausführungsformen der Druckbelüftung sind auf den Bildern 2 bis 5 dargestellt. Bild 2 zeigt eine feinblasige Belüftung mittels Filterrohren, die nahe dem Beckenboden hintereinander angeordnet sind — „Breitbandbelüftung“ — und zur Behebung von Verstopfungen hochgeschwenkt werden können. Durch die Luftblasen wird das Wasser in Pfeilrichtung umgewälzt.

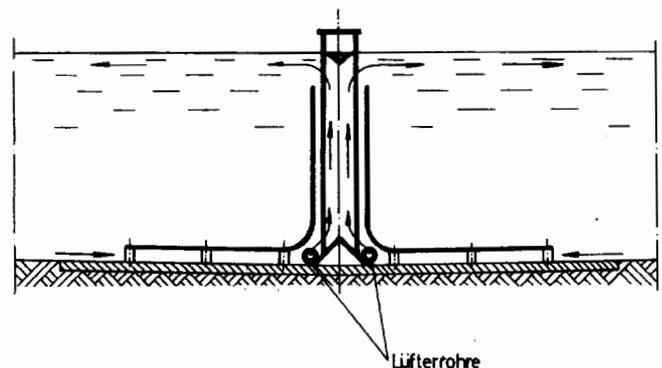


Bild 4: Linienbelüftung [12]

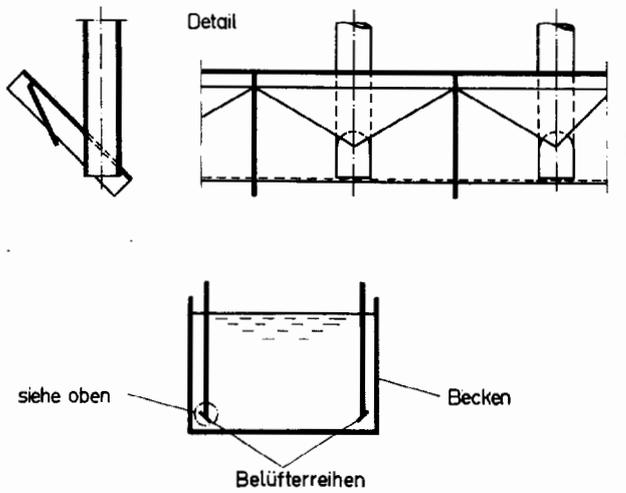


Bild 5: Grobblasige Belüftung [29]

Als mittelblasige Belüftung ist vor allem das System „Inka“ bekannt mit hochliegenden Belüftungsrohren oder Belüftungskästen (Bild 3). Eine senkrechte Trennwand im Becken bewirkt, daß die Luft das Wasser kräftig umwälzt. Auch die auf Bild 4 dargestellte Linienbelüftung erzwingt mittels Wänden eine Umwälzung.

Zur grobblasigen Belüftung werden gelochte Rohre oder Platten oder offene Rohre verwendet. Durch Verteilertafeln lassen sich die großen Luftblasen in kleinere aufteilen (Bild 5). Auch durch Bewegung des Belüfterrohres relativ zum Wasser kann die Blasengröße verringert werden [4].

Eine sehr grobblasige Belüftung in Form einer „lufthydraulischen Kanone“ (Bild 6) wird laut [42] in Lagunen für landwirtschaftliche Abwässer schon eingesetzt. Die Druckluft gelangt von unten in einen Siphon, wodurch sie einzelne große Blasen bildet. Beim Hochsteigen reißen diese Wasser mit, das durch seitliche Luken ersetzt wird. In einem anderen für die Landwirtschaft entwickelten System sind Geräte dieses Typs — hier „Turbulator“ bezeichnet — hauptsächlich zur Wasserumwälzung bestimmt, während der Sauerstoff vornehmlich durch besondere, offensichtlich mittelblasige Belüftungsrohre eingetragen wird [1].

Sauerstoffzufuhrwerte typischer Druckbelüfter, bei der Emschergerossenschaft [29] in Leitungswasser gemessen, sind in Bild 7 über dem raumbezogenen Leistungsbedarf (der Leistungsdichte) aufgetragen. Außerdem ist der für die Wirtschaftlichkeit entscheidende Sauerstofftrag ersichtlich. Als Sauerstoffübertragungsfaktoren für Wasser und biologisch gereinigtes Abwasser mit Detergentienzusatz von 3 bis 9 mg/l wurden Werte von 0,45 bis 0,81 gefunden [29]. Die Strömungsgeschwindigkeiten an der Beckensohle sind stark von der Anordnung der Belüfter (Bild 8), außerdem von Beckenform, eingeblasener Luftmenge und Eigenschaften des Abwassers abhängig.

Abgesehen von der grobblasigen Belüftung sind nach [30] alle Druckluftsysteme sehr anfällig gegen Verstopfungen durch schlecht vorgereinigtes Abwasser. Die Luftzufuhr darf nicht unterbrochen werden. Bei fein- und mittelblasiger Belüftung muß auch die Druckluft gereinigt sein. Je grobblasiger die Belüftung, desto empfindlicher ist sie gegen Ungleichmäßigkeiten des Gegendruckes an den Luftaustrittsöffnungen, infolgedessen auch gegen Differenzen in der Höhenlage dieser Öffnungen.

#### 4.4. Oberflächenbelüftung

##### 4.4.1. Maßgebende Faktoren

Oberflächenbelüfter führen dem Wasser Sauerstoff unmittelbar aus der Atmosphäre zu und aus Luftblasen, die in das Wasser hineingerissen werden. Die in der Abwassertechnik

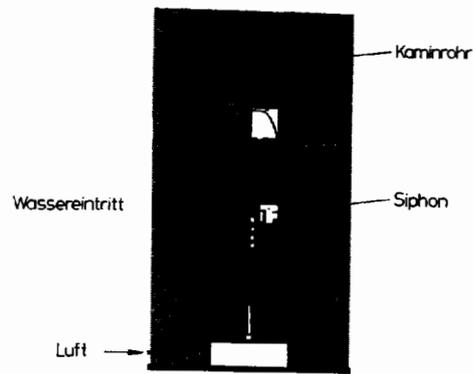


Bild 6: Lufthydraulische Kanone [42]

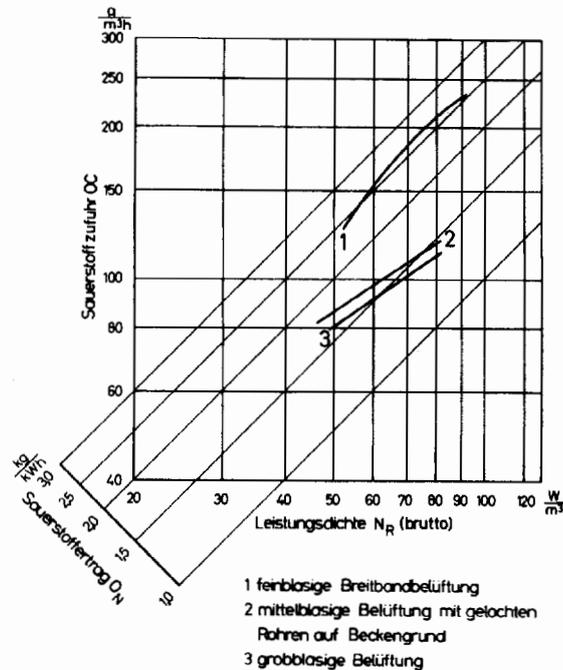


Bild 7: Sauerstoffzufuhr, Leistungsdichte und Sauerstofftrag verschiedener Druckbelüftungssysteme gemessen in Leitungswasser, nach [29]

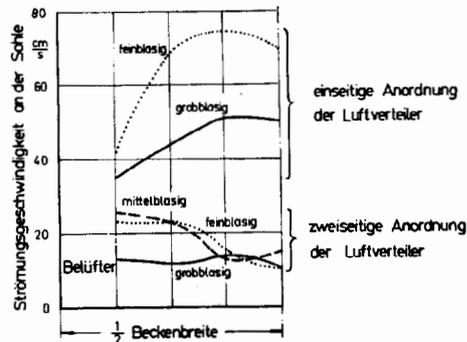


Bild 8: Strömungsgeschwindigkeiten im druckbelüfteten Becken nach [29]

zumeist benutzten Systeme werfen Abwasser in Tropfen oder Strahlen in die freie Luft, bewegen die Wasseroberfläche oder schlagen Luft in das Wasser hinein. Dadurch werden eine große Grenzfläche zwischen Abwasser und Luft, starke Umwälzung und Turbulenz erzeugt.

BURCHARD [7] stellte für die Sauerstoffaufnahme frei fallender Tropfen den Geschwindigkeitskoeffizienten  $K$  der Gl. (1) zu etwa  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s fest. Dieser Wert liegt hoch im Vergleich zum  $K$ -Wert beim Übergang aus Luftblasen, für den sich in [13] für verschiedene Blasengrößen Beträge von  $2,8 \cdot 10^{-5}$  bis  $17 \cdot 10^{-5}$  m/s finden.

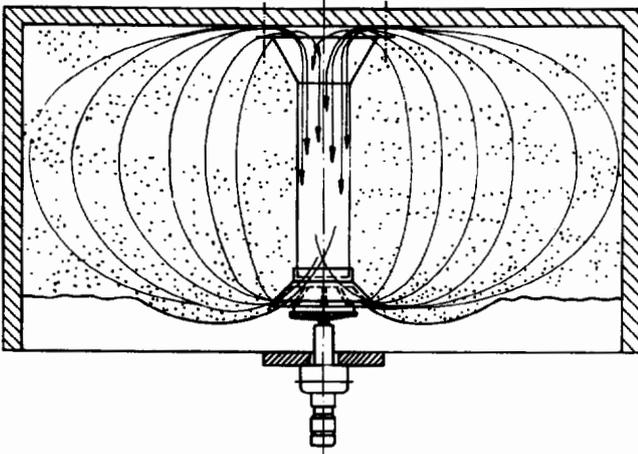


Bild 9: Simplex-Kreisel [59]

Wird ein Tropfen oder Strahl mit der Geschwindigkeit  $v_0$  unter dem Anstellwinkel  $\beta$  gegenüber dem Flüssigkeitsspiegel in die Luft geschleudert, so benötigt er bis zum Wiedereintritt in die Flüssigkeit die Zeit  $t = \frac{2 v_0}{g} \sin \beta$ .

Am längsten verweilt er in der Luft bei  $\beta = 90^\circ$ , also bei senkrecht nach oben gerichtetem Wurf. Dann wird aber nur wenig Energie zur Strömungs- und Turbulenzerzeugung zurückgewonnen. Auch werden Luftblasen nach [7] erst bei einem Einschlagwinkel wesentlich unter  $90^\circ$  in die Flüssigkeit eingezogen. In der Praxis bevorzugt man für Kreiselbelüfter und dergleichen Winkel von  $45^\circ$  oder kleiner. In einem gewissen Widerspruch zu diesen Ausführungen von BURCHARD stehen aber die Versuchsergebnisse von BÖHNKE [6] bei der Staustrahlbelüftung (dazu Bild 17).

#### 4.4.2. Ausführungsformen der Oberflächenbelüftung

##### 4.4.2.1. Kreiselbelüfter

Auf dem Markt befindet sich eine beträchtliche Zahl von Kreiselbelüfter-Konstruktionen. Eine bekannte Form, der Simplex-Kreisel, besteht aus einem konischen schaufelbestücktem Rotor und einem Steigrohr (Bild 9). Er wirft das Abwasser in die Luft (Bild 10) und saugt neues Wasser durch das Steigrohr vom Beckengrund an. Dadurch wird der Inhalt des Beckens umgewälzt. Andere Konstruktionen, wie der auf (Bild 11) gezeigte Vortair-Kreisel arbeiten ohne Ansaugrohr. Der Vortair-Kreisel arbeitet im Gegensatz zu anderen Oberflächenbelüftern unter dem Wasserspiegel, weshalb er vielleicht weniger frostgefährdet ist.

Für die Belüftung weiter Becken oder von Oxidationsteichen werden auch schwimmende Ausführungen von Oberflächenbelüftern geliefert.

Bei der Emschergenossenschaft in Leitungswasser gemessene Sauerstoffzufuhrwerte der zwei genannten Kreiselbelüfter gibt Bild 12 wieder. Detergentienzusatz brachte teilweise eine Erhöhung der Sauerstoffzufuhr bis auf  $\alpha = 1,2$ , teilweise eine Verminderung bis zu  $\alpha = 0,93$ . In biologisch gereinigtem Abwasser mit Detergentien fiel  $\alpha$  bis auf 0,84 ab [28].

Im Becken mit  $6 \times 6$  m Grundfläche und 3,8 m Wassertiefe lagen die Strömungsgeschwindigkeiten an der Beckensohle beim Simplex-Kreisel in allen Versuchseinstellungen über 15 cm/s, beim Vortair-Kreisel stellenweise nur bei knapp 10 m/s.

Für den Simplex-Kreisel wurde auch die Umwälzleistung bestimmt. Bei der Freibordhöhe Null des Kreisels mit 160 cm Durchmesser betrug die Förderleistung 400 l/s und fiel auf 160 l/s bei 20 cm Freibordhöhe ab ohne signifikante Unterschiede für die Drehzahlen 41 bis 49 U/min [28].



Bild 10: Verspritzen des Wassers durch Simplex-Kreisel

Die Kreiselbelüfter sind im allgemeinen wenig stör anfällig, verlangen aber nach [30] zumeist eine Vorklärung.

Einige Erfahrungen mit Kreiselbelüftern in tierischen Abgängen liegen aus den Niederlanden vor [38; 46]. Aufgrund ihrer Untersuchungen empfehlen SCHELTINGA und POELMA, den Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken — gegebenenfalls durch Verdünnung — auf 1 Prozent zu halten. Dann

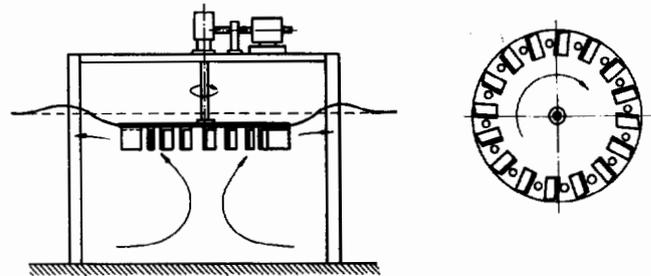
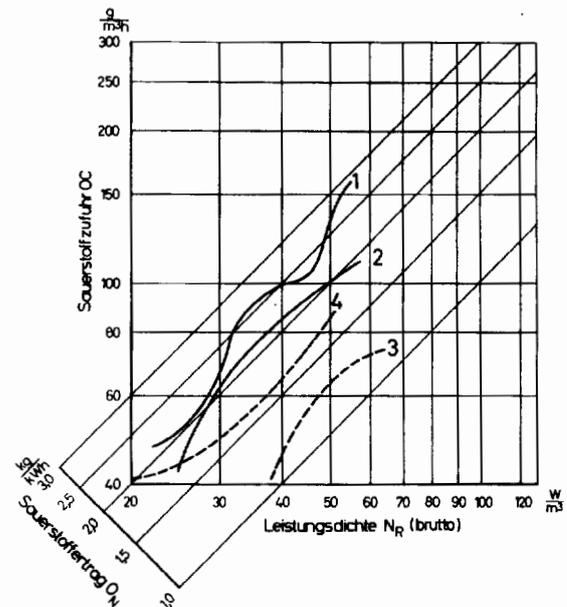


Bild 11: Vortair-Kreisel [30]



- Oberflächenbelüftung
- kombinierte Belüftung
- 1 Simplex-Hochleistungskreisel
- 2 Vortair-Kreiselbelüfter
- 3 Vogelbusch-Dispergator
- 4 Turbinen-Belüfter Dorr-Oliver

Bild 12: Sauerstoffzufuhr, Leistungsdichte und Sauerstofftrag von zwei Belüfterkreisel und zwei kombinierten Belüftungssystemen gemessen in Leitungswasser, nach [28]

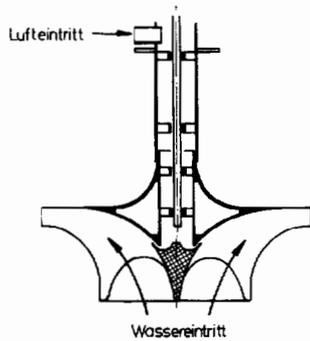


Bild 13: BSK-Turbine [50]

rechnen sie mit einem Sauerstofftrag von 1,5 kg O<sub>2</sub>/kWh. Kälbermist und Schweinejauche wurden gut abgebaut, Schweinegülle schlechter. Der BSB<sub>5</sub> des Ablaufes lag zwischen 50 und 100 mg/l. Bei nicht zu niedrigen Temperaturen wurde der Stickstoff größtenteils entfernt.

Den Einsatz eines Kreiselbelüfters im Zusammenhang mit der Trocknung von Schweinemist beschreiben SCHOLZ und SURTER [48]. Hier dient der Kreisel in erster Linie zur Förderung der Wasserverdunstung in einem beheizten Becken, zugleich aber zur Geruchsabeseitigung infolge des aeroben Abbaus.

Sowohl zu den Oberflächenbelüftern als auch zu den weiter unten besprochenen Saugbelüftern kann die BSK-Turbine (Bild 13) gezählt werden [50]. Sie wirft das Wasser wie andere Oberflächenbelüfter über die Oberfläche des Beckens hinweg, nutzt aber gleichzeitig den im Wasser entstehenden Unterdruck nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe zum Ansaugen von Luft durch die hohle Antriebswelle. Es wurden etwa OC = 150 g/(m<sup>3</sup>h) und O<sub>N</sub> = 3 kg/kWh (brutto) gemessen.

#### 4.4.2.2. Belüftungswalzen

Die von KESSNER eingeführten Belüftungswalzen werden in der Klärtechnik sowohl in Belebungsbecken als auch in Oxidationsgräben eingesetzt. Der Oxidationsgraben (Bild 14) hat eine rennbahnähnliche Gestalt, das Wasser wird von der Walze belüftet und gleichzeitig in Zirkulation versetzt. Ursprünglich mit Bürsten ausgerüstet — deshalb häufig noch als „Bürstenwalzen“ bezeichnet — werden die Walzen jetzt als „Plattenwalzen“ mit radial vom Mittelrohr nach außen weisenden Bandstahlplatten ausgeführt oder als „Käfigwalzen“ mit kürzeren Platten an Winkeleisen, die parallel zur Achse am Walzenumfang angebracht sind (Bild 15).

Der Sauerstoffeintrag je m Walzenlänge steigt in dem auf Bild 16 gezeigten Bereich sowohl mit der Eintauchtiefe als auch mit der Umfangsgeschwindigkeit. In Versuchen von SCHERB [47] wurden in Reinwasser in einem 13 m<sup>3</sup> fassenden Becken die auf Tafel 4 aufgeführten Werte gemessen. a lag zwischen 0,82 und 0,92.

Tafel 4: Sauerstoffzufuhr und Sauerstofftrag einer Plattenwalze von 50 cm Durchmesser bei 92 U/min

nach Versuchen von SCHERB [47]

Eintauchtiefe [cm]	Sauerstoffeintrag [g O <sub>2</sub> /h je m Walzenlänge]	Sauerstoffzufuhr OC [g O <sub>2</sub> /h je m <sup>3</sup> Beckenvolumen]	Sauerstofftrag O <sub>N</sub> [kg O <sub>2</sub> /kWh (brutto)]
5	620	135	1,67
8	1 330	286	2,27
11	1 650	347	1,95

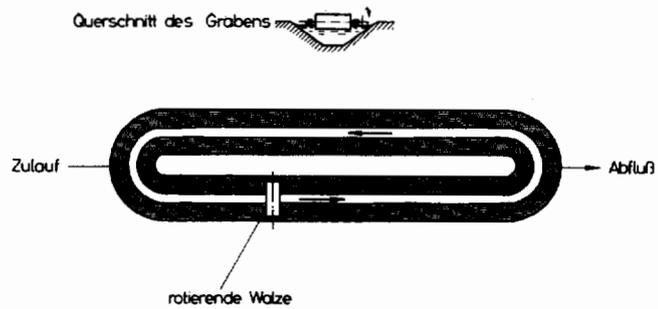


Bild 14: Grundform des Oxidationsgrabens nach PASVEER

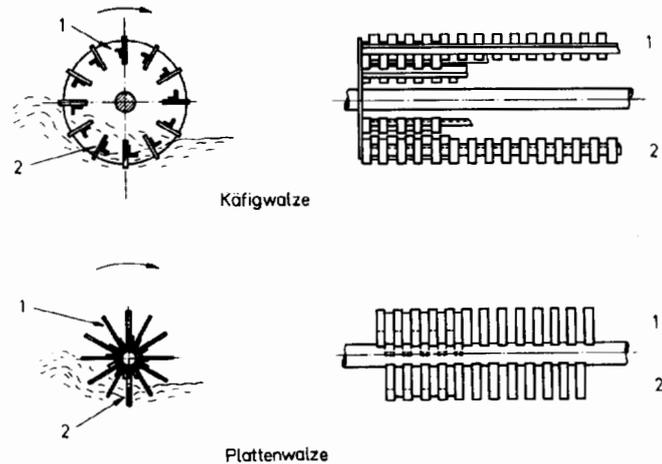


Bild 15: Rotierende Belüftungswalzen oben Käfigwalze, unten Plattenwalze [3]

BAARS und MUSKAT [3] kamen in ihren eingehenden Versuchen mit Walzen verschiedener Ausrüstung und Größe zu höheren Sauerstoffeinträgen, aber ähnlichen Sauerstoffträgen, ebenso die Emschergenossenschaft bei Versuchen in einem Oxidationsgraben [34].

JONES, DAY und DALE [22] berichten über Versuche mit einem Käfigrotor von 70 cm Durchmesser in einem landwirtschaftlichen Oxidationsgraben, ebenfalls mit Leitungswasser. Die Sauerstoffeinträge und -erträge sind bei ihnen nur etwa halb so hoch. Als Ursache hierfür ist denkbar, daß die Umfangsgeschwindigkeit 3,7 m/s, die wohl zum Erreichen einer hohen Wassergeschwindigkeit gewählt wurde, über dem Optimum für den Sauerstoffeintrag liegt [10]. Die Umwälzleistung je m Walzenlänge betrug bei 5 cm Eintauchtiefe

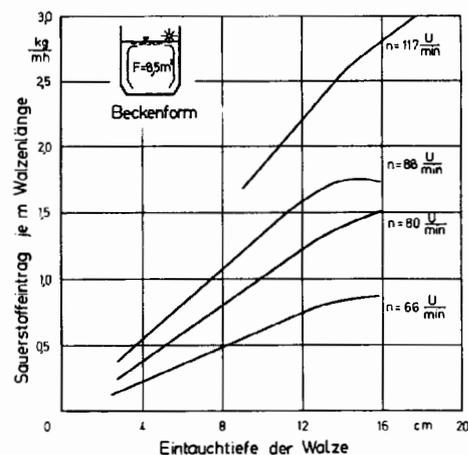


Bild 16: Sauerstoffzufuhr durch rotierende Walzen nach [10] Walzendurchmesser 52 cm; biologisch gereinigtes Abwasser mit 5–10 mg/l Detergentien

1 l/s und stieg auf etwas über 3 l/s bei 15 cm Eintauchtiefe an.

ROBINSON und andere [42] berichten von Lagerschäden infolge der stoßweisen Belastung und von unbefriedigendem Sauerstoffeintrag.

In Nutztierhaltungen der USA und der Niederlande sind Oxidationsgräben mit Belüftungswalzen schon in größerer Zahl anzutreffen [45], zumeist unter dem Spaltenboden des Stalls angeordnet. In Deutschland befindet sich im Bereich der Landwirtschaftskammer Weser-Ems ein Graben außerhalb des Stalles, wobei das Gefrieren des Abwassers ein Problem darstellt. Praktische Hinweise für Auslegung und Anwendung werden in [22] gegeben.

Die Sauerstoffzufuhr in Gülle und Jauche, die auf 1 Prozent Trockensubstanz verdünnt sind, wird in [46] auf 1 kg/(mh) geschätzt gegenüber 2 kg/(mh) in Wasser. Als Sauerstoff-ertrag wird dort 1,5 kg/kWh angegeben.

Zum Erreichen einer ausreichenden Strömung an der Beckensohle und eines ausreichenden Sauerstoffeintrages wird in [21] empfohlen, als Eintauchtiefe ein Drittel der Flüssigkeitstiefe zu wählen.

#### 4.4.2.3. Staustrahlbelüfter

Eine auch für die Güllebehandlung interessante Entwicklung stellt die Staustrahlbelüftung dar (Bild 17) [6; 24]. Der Flüssigkeitsstrahl reißt Sauerstoff in das Wasser hinein. Die Umwälzung der Flüssigkeit wird hier oftmals auf anderem Wege, beispielsweise durch Propeller, erfolgen müssen. Nach [24] ist die dafür notwendige Energie aber klein, da der Propeller das Wasser mit einem sehr viel höheren Wirkungsgrad vorwärts bewegt als ein in erster Linie auf Sauerstoffeintrag konstruiertes Belüftungsgerät.

#### 4.5. Kombinierte Belüftung

Bei der kombinierten Belüftung wird die Luft unter Druck eingeleitet, aber durch eine gesondert angetriebene zweite Einrichtung, die auch die Flüssigkeitsumwälzung übernimmt, in der Flüssigkeit verteilt. Diese Trennung der Funktionen bedingt zwar einen höheren baulichen Aufwand, erlaubt aber deren voneinander unabhängige Regelung. Dadurch wird die Anpassung an zeitlich wechselnde Bedingungen erleichtert.

Die zweite Einrichtung kann aus einem Rührwerk bestehen, das oberhalb der Luftaustrittsöffnungen rotiert; siehe als Beispiel Bild 18. Das Rührwerk vergrößert die Austauschfläche zwischen Gasblasen und Flüssigkeit und erhöht die Turbulenz. Die Verteilung von Gasen in Flüssigkeiten durch Rührer ist ein auch in der chemischen Technik übliches Verfahren, weshalb dort einige Untersuchungen vorliegen.

Laut [53] werden die Blasen mit zunehmendem Gasdurchsatz größer, aber kleiner bei Erhöhung der Drehzahl. Andere Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Sauerstoffeintrag [19; 20; 25; 58]. Zur quantitativen Bestimmung des Sauerstoffeintrages wurde in ihnen als Flüssigkeit Natriumsulfatlösung verwendet.

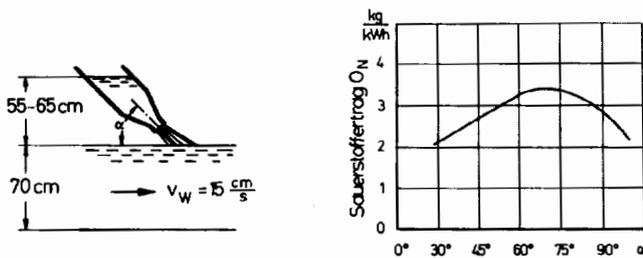


Bild 17: Staustrahlbelüftung  
Sauerstofftrag nach [6]

KARWAT [25] stellte fest, daß — abgesehen vom ungünstig abscheidenden Propellerrührwerk — nicht die Rührerform als solche, sondern die aufgewandte Rührerenergie für die Sauerstoffaufnahme entscheidend ist. Außerdem spielt die Art der Lufterführung in die Flüssigkeit eine wichtige Rolle. Bei Vorverteilung der Luft durch ein sich über den ganzen Behälterboden erstreckendes Drahtnetz wurde beispielsweise ein OC von 4 kg/(m<sup>3</sup>h) gemessen gegenüber OC = 0,8 kg/(m<sup>3</sup>h) ohne dieses. Beide Werte wurden bei einer Netto-Leistungsdichte von 0,4 kW/m<sup>3</sup> bestimmt. Es ist nicht damit zu rechnen, daß diese hohen OC-Werte auf landwirtschaftliche oder sonstige Abwässer übertragbar sind [61].

Sauerstoffzufuhrwerte eines Belüfters nach Bild 18, in Reinwasser gemessen, sind als Kurve 3 in Bild 12 enthalten. Sie liegen unter denen der Oberflächenbelüfter. Die Sauerstoffausnutzung liegt etwa ebenso hoch wie bei feinblasiger Belüftung.

Bild 19 zeigt ein anderes System, nämlich einen Drehflügel mit einem Schlitz auf der Rückseite, aus dem die Druckluft austritt. Dies in der Gärungstechnik bewährte System zeigte in Abwasser verhältnismäßig niedrige Zufuhrwerte (siehe Bild 12).

Weiter sei die Belüftung mit partieller Umwälzung (System Danjes) genannt (Bild 20). Die Druckluft wird von Belüftungsaggregaten eingeführt, die hin und her durch die Flüssigkeit fahren. Am Fahrwerk angebrachte Schürzen zwingen die Flüssigkeit zur Horizontalbewegung über die

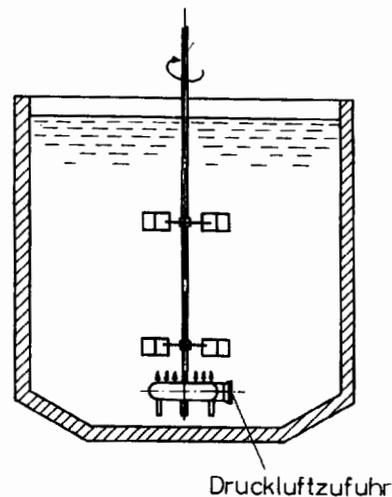


Bild 18: Turbinenbelüftung Dorr-Oliver [28]

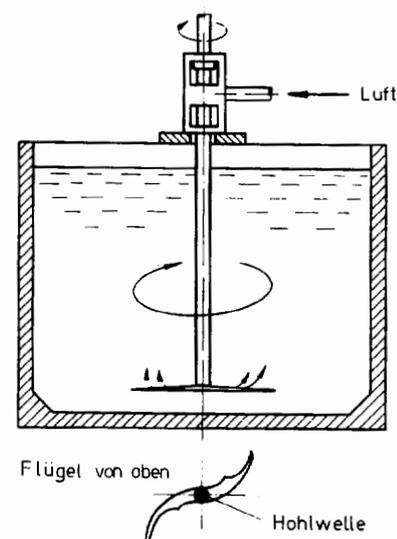


Bild 19: Vogelbusch-Dispergator [28]

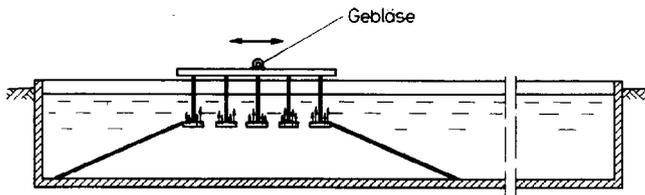


Bild 20: System Danjes [47]

Belüfter, was laut [37] für den Sauerstoffeintrag günstig ist. Versuche von SCHERB [47] bestätigten dies. Die Sauerstoffeinträge bewegten sich zwischen 3 und 5 kg O<sub>2</sub>/kWh (brutto).

Zur kombinierten Belüftung kann auch die Ejektor-Belüftung [23] gezählt werden. Die Luft wird durch ein Gebläse den Ejektoren zugeführt, die normalen Wasserstrahlpumpen gleichen. In Chemieabwässern wurde ein Sauerstoffeintrag von knapp 3 kg O<sub>2</sub>/kWh (brutto) ermittelt; der mittelblasigen Belüftung zeigte sich die Ejektorbelüftung klar überlegen.

#### 4.6. Sogbelüftung

Charakteristisch für die Sogbelüftung ist, daß ein die Flüssigkeit umwälzendes Werkzeug mit Hilfe des in der Flüssigkeit bestehenden Unterdrucks gleichzeitig Luft in die Flüssigkeit hineinsaugt. Die Sogbelüftung wird in chemischen und biochemischen Produktionsprozessen zur Begasung in Flüssigkeiten eingesetzt. In der Abwassertechnik hat sie bisher noch keine große Bedeutung erlangt. Dagegen ist sie für die Behandlung von Gülle schon mit Vorteil eingesetzt worden [43]. Das Werkzeug rührt die Flüssigkeit kräftig um, so daß Feststoffpartikel in der Schwebe bleiben. Da das Werkzeug vollständig in der Flüssigkeit untertaucht, ist die Gefahr des Einfrierens geringer als bei Oberflächenbelüftern. Der Druckbelüftung und insbesondere der kombinierten Belüftung hat sie die Einfachheit voraus, dürfte auch weniger verstopfungsanfällig sein.

Zur Sogbelüftung gehören vornehmlich die in der chemischen Technik als Hohlrührer bezeichneten Geräte. Die Luft wird durch Kanäle im Rührer und die aus einem Rohr bestehende Rührerwelle aus der Atmosphäre angesaugt. Mit tief in die Flüssigkeit eintauchenden Hohlrührern beschäftigen sich mehrere Arbeiten von ZLOKARNIK [56; 57; 58].

Nachdem er festgestellt hatte, daß Rohrrührer und Dreikantrührer (Bild 21) mehr Luft ansaugen als Turbinenrührer und zylindrische Hohlrührer, führte er seine Versuche hauptsächlich mit Dreikantrührern aus. In den von ihm verwendeten Flüssigkeiten, deren kinematische Zähigkeit zwischen 0,01 und 10 St lag, änderte sich die angesaugte Luftmenge nur wenig mit der Zähigkeit; die in das Gebiet um den Rührer hineingesaugte Luft führt zu einer weitgehenden Angleichung der Zähigkeiten. Die Luftmenge wird im wesentlichen von der Froudzahl bestimmt, die das Verhältnis der Trägheitskraft zur Gewichtskraft zum Ausdruck bringt. Ebenso ist die Leistungszahl hauptsächlich eine Funktion der Froudzahl.

Für die Messung des Sauerstoffeintrages wurde wiederum Natriumsulfidlösung verwendet. Überraschenderweise hing bei den überwiegend mit Leistungsdichten über 0,5 kW/m<sup>3</sup> durchgeführten Versuchen die Sauerstoffzufuhr nicht von der angesaugten Luftmenge ab, sondern ausschließlich von der Leistungsdichte. Erklärt wird dies damit, daß bei hohen Leistungsdichten die mittlere Verweilzeit der Gasblasen um eine Größenordnung höher liegt, als wenn Blasen durch eine nicht oder nur schwach gerührte Flüssigkeit hindurchperlen. In einer späteren Arbeit [61] stellte ZLOKARNIK mit nahe der Flüssigkeitsoberfläche arbeitenden Rohrrührern und Leistungsdichten von 10 bis 100 W/m<sup>3</sup> in Natriumsulfidlösung, also bei Chemisorption, wiederum Unabhängigkeit des Stoffaustausches von Gasdurchsatz fest. Dagegen be-

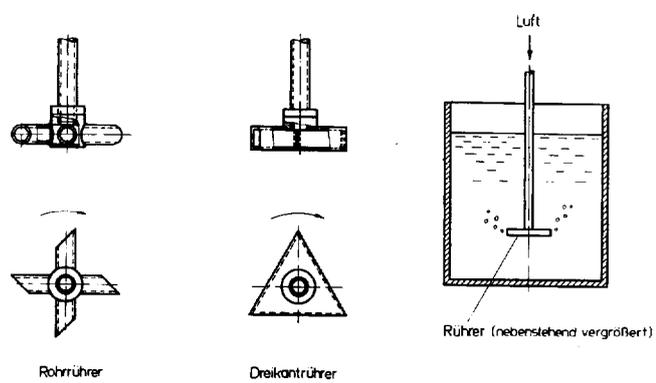


Bild 21: Hohlrührer nach [56; 58]

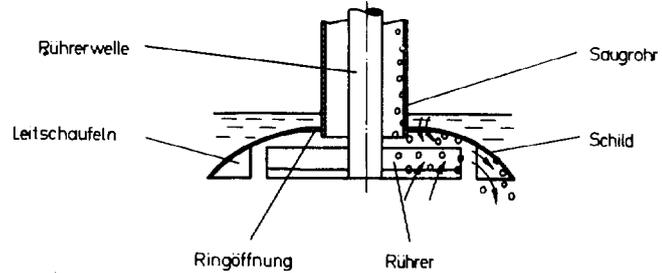


Bild 22: Turbomixer [35]

obachtete er beim Einsaugen von Luft in reines Wasser, also bei physikalischer Absorption, ein Ansteigen der Lösungsgeschwindigkeit mit dem Gasdurchsatz.

Aus der Klärtechnik sind Versuche mit dem Hohlrührer „Cavitator“ bekannt [51]. Die Rührerflügel ähneln Flugzeugtragflächen und rotieren in einem Rohr dicht über dem Beckenboden. Die Sauerstoffertragswerte lagen niedrig (bei etwa 0,4 kg O<sub>2</sub>/kWh). Interessant ist, daß die Anwesenheit von Detergentien die Sauerstoffzufuhr begünstigte.

Bei anderen Konstruktionen arbeitet der Saugrührer nahe der Flüssigkeitsoberfläche. Ein Schild über ihm hindert die Gasblasen am sofortigen Aufsteigen. Der hutförmige Schild des „Turbomixers“ [35] hat innen eine ringförmige Öffnung, in die ein Luftzuführungsrohr hineinragt und die außerdem Flüssigkeit von oben zum Rührer strömen läßt (Bild 22). Die L-Form der Rührerflügel und die am Schild befindlichen Leitschaukeln sollen die Umwälzung des Wasser-Flüssigkeitgemisches in die gewünschte Bahn lenken.

Auch der in der Landwirtschaft bekannt gewordene Fuchs-Umwälzbelüfter ist mit einem Schild ausgestattet (Bild 23). Über diesen Belüfter wurde in dieser Zeitschrift schon ausführlich berichtet [39; 40; 43; 52]. Die Flüssigkeit strömt nur von unten zur Turbine, die mit 1400 U/min umläuft [60]. Zusammen mit der durch ein Achsialrohr von oben angesaugten Luft wird sie am Leitschild entlang nach außen geführt. Aus den Angaben in [39; 40] ergibt sich ein Sauerstofftrag von ungefähr 15 kg O<sub>2</sub>/kWh, der völlig außer-

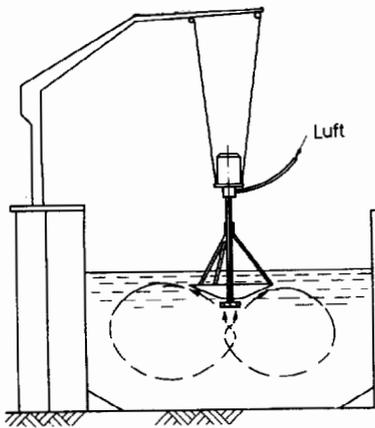


Bild 23: Umwälzbellüfter System Fuchs [39]

halb des üblichen Bereichs liegt. Über der Beckensohle wurden Flüssigkeitgeschwindigkeiten von 13 cm/s und mehr gemessen und aus den Geschwindigkeitsprofilen Umwälzleistungen von etwa 800 l/s errechnet. Über weitere Versuche mit diesem Belüfter berichtet TRAUSEN [54].

Es ist auch möglich, Rührer so zu gestalten, daß sie ohne besondere Ansaugvorrichtungen Luft von der Flüssigkeitsoberfläche her einziehen. Das zeigt der Rührer der Firma Hengen & Co. [5]. Dieser mit hoher Drehzahl rotierende Rührer besteht aus einem sich konisch nach unten erweiternden Rohr, in das spiralförmige Schaufeln eingeschweißt sind. An der Oberfläche entsteht ein Flüssigkeitswirbel, durch den die Luft in die Flüssigkeit eingesaugt und feinblasig verteilt wird. Es können mehrere Rührer in Abständen untereinander angeordnet werden. Der Sauerstofftrag liegt mit etwa 0,2 bis knapp 0,4 kg O<sub>2</sub>/kWh niedrig, so daß der Rührer nur dort in Betracht kommt, wo die Rührwirkung im Vordergrund steht. Außerdem dürfte der Rührer sich in Gülle zusetzen, eine offenere Form dürfte hier zweckmäßiger sein. Auch mit üblichen Rührern kann in einem gewissen Umfang Gas von der Flüssigkeitsoberfläche her eingebracht werden, wenn eine bis zum Rührer reichende Trombe erzeugt wird [62].

## 5. Schluß

Es wurde versucht, einen Überblick über die in der Abwasser- und Verfahrenstechnik bekannten Geräte zum Sauerstoffeintrag in Flüssigkeiten zu geben. Welche dieser Geräte für bestimmte Verfahren zur Behandlung von Gülle und Jauche geeignet sind und unter welchen Voraussetzungen und Modifikationen dies der Fall ist, muß in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

## Schrifttum

- [1] Anonym: „Sewage works“ style slurry system. Power Farming Dez. 1969, S. 82
- [2] D'ANS-LAX: Taschenbuch f. Chemiker und Physiker 3. Aufl., Bd. 1: Makroskopische physikalisch-chemische Eigenschaften. Berlin-Heidelberg-New York 1967
- [3] BAARS, J. K. u. J. MUSKAT: Der Sauerstoffeintrag in Wasser mit Hilfe rotierender Bürsten. Gesundh. Ing. 83 (1962) S. 201—206
- [4] BISCHOFBERGER, W.: Abwasserbelüftung mit schwingenden Belüftern. Techn.-wiss. Mitteilungen der Emschergenossenschaft und des Lippeverbandes (1962) H. 5, S. 85—87
- [5] BISCHOFBERGER, W. und V. STALMANN: Ein neues Belüftungssystem in der Abwassertechnik. Energie und Technik 14 (1962) S. 201—203
- [6] BÖHNKE, B.: Kompaktkläranlagen für schnell wachsende Gemeinden bis zu 25 000 Einwohnern mit großem Belastungsspielraum. „gwf“ — wasser/abwasser 111 (1970) S. 241—244
- [7] BURCHARD, C.-H.: Beitrag zur Frage der Oberflächenbelüftung in Abwasserreinigungsanlagen. Diss. Stuttgart 1968, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft H. 35
- [8] DOWNING, A. L.: Diskussionsbeitrag zum Vortrag von DER EMDE: „Belüftung, Arten und Systeme — Sauerstoffzufuhr und Energieaufwand“. Berichte der Abwassertechnischen Vereinigung, H. 13, Hamburger Tagung 1961, S. 98—103
- [9] ECKENFELDER, W. W.: Belüftungssysteme in den Vereinigten Staaten von Nordamerika. Berichte der Abwassertechnischen Vereinigung, H. 13, Hamburger Tagung 1961, S. 116—122
- [10] VON DER EMDE, W.: Belüftung, Arten und Systeme — Sauerstoffzufuhr und Energieaufwand. Berichte der Abwassertechnischen Vereinigung, H. 13, Hamburger Tagung 1961, S. 75—97
- [11] VON DER EMDE: Die Technik der Belüftung in Belebtschlammanlagen. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie 26 (1964) S. 338—361
- [12] ENGELBART, F.: Beitrag zur Entwicklung neuer Techniken auf dem Gebiet der biologischen Abwasserbehandlung. Wasser- und Abwasser-Forschung (1969) H. 4
- [13] FAIR, G. M. u. J. C. GEYER: Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung; Grundlagen, Technik und Wirtschaft. Deutsche Bearbeitung v. B. DIETERICH. Verlag R. Oldenbourg, München 1961
- [14] FELDMANN, F.: Biogas als Energiequelle. Landtechnik 9 (1954) S. 616—620
- [15] HART, S. A. u. W. HILLENDahl: Düngerteiche für die deutsche Landwirtschaft? Landtechnische Forschung 17 (1967) S. 82—86
- [16] HARTMEIER, W., BRONN, W. K. u. H. DELLWEG: Neue Erkenntnisse über den Einfluß des O<sub>2</sub>-Partialdruckes auf den Stoffwechsel von Mikroorganismen. Chem.-Ing.-Techn. 43 (1971) S. 76—78
- [17] HOPE, H.: Now a farm slurry tower. Farmers weekly (1970) 13. März Übersetzung in: Die Milchpraxis 8 (1970) Heft 8, S. 30—31 „Und nun — ein Schlamm-turm für die Landwirtschaft“
- [18] IMHOFF, K.: Taschenbuch der Stadtentwässerung 22. Auflage, München-Wien 1969
- [19] JOHN, G.: Der Einfluß der Energiedichte auf den Stoffumsatz in kontinuierlich betriebenen, begasten Rührbehältern. Chem.-Ing.-Techn. 43 (1971) S. 342—347
- [20] JOHN, G.: Der Leistungsbedarf beim Gasen von Flüssigkeiten in bewehrten Rührbehältern. Verfahrenstechnik 3 (1969) S. 393—398
- [21] JONES, D. D., CONVERSE, J. C. u. D. L. DAY: Aerobic digestion of swine waste. VII. Kongreß der Commission International du Génie Rural (CJGR) Baden-Baden 1969. Dok. 3, S. 204—211
- [22] JONES, D. D., DAY, D. L. u. A. C. DALE: Aerobic treatment of livestock wastes. Bulletin 737, Univ. of Ill. at Urbana-Champaign, College of Agriculture 1970
- [23] JÜBERMANN, O. u. G. KRAUSE: Die Zentralkläranlage der Erdölchemie GmbH und der Farbenfabrik Bayer AG in Dormagen. Ejektorbelüftung in der biologischen Abwasserreinigung. Chem.-Ing.-Techn. 40 (1968) S. 288—291
- [24] KALBSKOPF, K.-H. u. D. LONDONG: Entwicklungstendenzen bei Kläranlagen nach dem Belebungsverfahren für kleine Gemeinden. „gwf“ — wasser/abwasser 111 (1970) S. 455—459
- [25] KARWAT, H.: Verteilung von Gasen in Flüssigkeiten durch Rührer. Chem.-Ing.-Tech. 31 (1959) S. 588—598
- [26] KAYSER, R.: Ermittlung der Sauerstoffzufuhr von Abwasserbelüftern unter Betriebsbedingungen. Diss. T. H. Braunschweig 1967, Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen Heft 1
- [27] KESSENER, H. J. N. H. u. F. J. RIBBIUS: Comparison of aeration systems for the activated sludge process. Sewage Works Journ., Lancaster, Pa. 6 (1934) S. 423—443
- [28] KNOP, E., BISCHOFBERGER, W. u. V. STALMANN: Versuche mit verschiedenen Belüftungssystemen im technischen Maßstab. Teil 1: Untersuchungen an Oberflächenbelüftern und kombinierten Systemen in Reinwasser. Essen 1964
- [29] KNOP, E., BISCHOFBERGER, W. u. V. STALMANN: Versuche mit verschiedenen Belüftungssystemen im technischen Maßstab. Teil 2: Untersuchungen an Druckbelüftern in Reinwasser. Essen 1965
- [30] Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik. Herausgegeben von der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV), Bd. 2, Berlin-München 1969
- [31] LOMMATZSCH, R.: Fließeigenschaften von Rindergülle. Deutsche Agrartechnik 19 (1969) S. 318—321
- [32] LOMMATZSCH, R.: Der Einfluß von Futterresten und Wasser auf die Fließeigenschaften von Rindergülle. Deutsche Agrartechnik 19 (1969) S. 575—577
- [33] MUDRACK, K.: Die aerobe Schlammstabilisierung. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 13, München 1966, S. 290—314
- [34] MUSKAT, J.: Erfahrungen mit dem Mammutrotor in Versuch und Praxis. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 5, 2. Aufl. München-Wien 1968, S. 264—282
- [35] PARKER, N. H.: Mixing. Chemic. Eng. 71 (1964) No. 12, S. 165—220
- [36] PASVEER, A.: Über die Theorie des Sauerstoffeintrages und des Sauerstoffverbrauches beim Belebtschlammverfahren. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 5, München 1958, S. 152—163
- [37] PASVEER, A. u. S. SWEEERS: Über die Theorie des Sauerstoffeintrages und des Sauerstoffverbrauches beim Belebtschlammverfahren nach dem Stand der Kenntnisse von 1967. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 5, 2. Aufl. München 1968, S. 115—140
- [38] POELMA, H. R.: Disposal and handling of dung. VII. Kongreß der Commission Internationale du Génie Rural (CIGR), Baden-Baden 1969, Dok. 3, S. 231—235
- [39] PÖPEL, F.: Aufbau, Wirkungsweise und Förderleistung von Umwälzbelüftern. Landt. Forsch. 18 (1970) S. 138—140

- [40] PÖPEL, F.: Selbsterwärmung bei der aeroben Reinigung hochkonzentrierter Substrate mit Hilfe von Umwälzbelüftern. Landt. Forsch. 18 (1970) S. 140—142
- [41] RAGER, K. TH.: Abwassertechnische und wasserwirtschaftliche Probleme der Massentierhaltung. KTBL-Bauschriften Heft 11, Frankf./M. 1971
- [42] ROBINSON, K., BAXTER, S. H. u. J. R. SAXON: Aerobic treatment of farm wastes. Proc. Symposium on Farm Wastes. The Univ. of Newcastle upon Tyne (GB) 7.—8. Jan. 1970, S. 122—131
- [43] RÜPRICH, W.: Einsatz des Umwälzbelüfters für die Flüssigmist-Aufbereitung. Landt. Forsch. 18 (1970) S. 142—147
- [44] SAUERLANDT, W. u. C. TIETJEN: Humuswirtschaft des Ackerbaues. DLG-Verlag, Frankfurt/M. 1970
- [45] SCHELTINGA, H. M. J. u. KOORENNEF: Erfahrungen über die aerobe biologische Reinigung von Jauche und anderen Abfällen in der Landwirtschaft. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 16, München — Wien 1969, S. 49—59
- [46] SCHELTINGA, H. M. J. u. H. R. POELMA: Treatment of farm wastes. Proc. Symposium Farm Wastes, The Univ. of Newcastle upon Tyne, 7.—8. Jan. 1970, S. 138—146
- [47] SCHERB, K.: Vergleichende Untersuchungen über das Sauerstoffeintragsvermögen verschiedener Belüftungssysteme auf dem Münchner Abwasserversuchsfeld. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie (Hrg. Liebmann) Bd. 12, München 1965, S. 330—350
- [48] SCHOLZ, H. G. u. E. SUTTER: Erzeugung von Humusdünger aus dem Abwasser einer Schweinemästerei. VII. Kongreß der Commission International du Génie Rural (CIGR), Baden-Baden 1969, Dok. 3, S. 247—255
- [49] SEELIGER, R.: Gasblasen in Flüssigkeiten. Naturwiss. 36 (1949) S. 41—48
- [50] STALMANN, V.: Die BSK-Turbine — ein neues Hochleistungs-Belüftungssystem der Abwassertechnik. „gwf“-wasser/abwasser 106 (1965) S. 613—617
- [51] STALMANN, V.: Versuche mit einem Cavitator. Techn.-wiss. Mitt. der Emschergerenossenschaft und des Lippeverbandes (1964) H. 6, S. 80—83
- [52] STRAUCH, D., MÜLLER, W. u. E. BEST: Teilergebnisse der hygienisch-bakteriologischen Prüfung des Systems der Umwälzbelüftung. Landt. Forsch. 18 (1970) S. 147—150
- [53] TOTENHAUPT, E. K.: Blasengrößenverteilung in technischen Begasungsapparaten. Chem.-Ing.-Techn. 43 (1971) S. 336—342
- [54] TRAULEN, H.: Vergleichende Betrachtung von Verfahren zur Beseitigung tierischer Exkremente. Diss. Universität Kiel 1971
- [55] ZELFEL, E.: Der Druckverlust beim Durchströmen von Flüssigkeiten über zylindrische Bohrungen. Chem.-Ing. Techn. 40 (1968) S. 327—332
- [56] ZLOKARNIK, M.: Auslegung von Hohlrührern zur Flüssigkeitsbegasung. Bestimmung des Gasdurchsatzes und der Wellenleistung. Chem.-Ing. Techn. 38 (1966) S. 357—366
- [57] ZLOKARNIK, M.: Auslegung von Hohlrührern zur Flüssigkeitsbegasung. Ermittlung des erreichbaren Stoff- und Wärmeaustausches. Chem.-Ing.-Techn. 38 (1966) S. 717—723
- [58] ZLOKARNIK, M. u. H. JUDAT: Rohr- und Scheibenrührer — zwei leistungsfähige Rührer zur Flüssigkeitsbegasung. Chem.-Ing.-Techn. 39 (1967) S. 1163—1168
- [59] Unterlagen der Firmen Maschinenfabrik H. Geiger, Karlsruhe-West, Heinrich Koppers GmbH, Essen, Schumacher'sche Fabrik, Bietigheim **Bild 7: Verlauf des CSB in Abhängigkeit von der Zeit**
- [60] DLG-Maschinenprüfbericht Nr. 1971: Umwälzbelüfter für Flüssigmist und Abwasser 1,1 kW. Frankfurt/M
- [61] ZLOKARNIK, M.: Rohrrührer zum Ansaugen und Dispergieren großer Gasdurchsätze in Flüssigkeiten. Chem.-Ing.-Technik 42 (1970) S. 1310—1314
- [62] ZLOKARNIK, M.: Trombentiefe beim Rühren in unbewehrten Behältern. Chem.-Ing.-Technik 43 (1971) S. 1028—1030

# Untersuchungen über die aerobe biologische Abbaubarkeit von Schweinegülle

Dieter Bardtke und J. Sekoulov

Institut für Siedlungswasserbau und Wassergütewirtschaft der Universität Stuttgart

und

Ulrich Laur

Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel

## 1. Einleitung

Durch die starke Aufstockung der Bestände in vielen Schweinehaltungsbetrieben ist die Beseitigung der in großen Mengen anfallenden Gülle zu einem akuten Problem geworden. Gehen wir je Mastschwein von einer durchschnittlichen täglichen Güllemenge von fünf Litern aus, so fallen in einem Bestand von 1000 Schweinen 5 m<sup>3</sup> am Tag an. Die Gülle muß in der Regel längere Zeit gelagert werden, da die Ausbringung nur zu bestimmten Zeiten erfolgen kann, die durch die Art der Nutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche und durch das Klima vorgegeben sind. In Westdeutschland ist die durchschnittliche Lagerzeit ein halbes Jahr. Im Zeichen des Umweltschutzes wird die Geruchsbelästigung beim Lagern und Ausbringen tierischer Exkremente in dichter besiedelten Gegenden und Erholungsgebieten beanstandet, so daß die Geruchsbeseitigung heute eine echte Existenzfrage für viele landwirtschaftliche Betriebe darstellt.

Der aerobe biologische Abbau, der in der Klärtechnik für häusliches Abwasser mit Erfolg angewandt wird, bietet sich als Hilfe bei der Beseitigung von Schweinegülle an. Diese enthält im Vergleich zu häuslichem Abwasser sehr viel organische Substanz, wie in Tafel 1 anhand der Werte für Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor aufgezeigt ist.

Der BSB<sub>5</sub> als Maß für den Verschmutzungsgrad eines Abwassers ist also bei Schweinegülle hundertfach höher als bei häuslichem Abwasser. Weiter hat Schweinegülle die Besonderheit, daß die meisten Inhaltsstoffe in suspendierter

Form vorliegen, wobei etwa 30 bis 40 Prozent aus unverdaulichen Futterresten (hauptsächlich Zellulose, Lignin, Pektin u. a. m.) bestehen. Die nachstehend aufgeführten Versuche sollten die Vorgänge beim aeroben biologischen Abbau von Schweinegülle weiter klären helfen.

## 2. Durchführung der Versuche

Als Ausgangsmaterial für die Versuche wurde Frischgülle von einer Mästerei mit 400 Mastplätzen verwendet. Die Tiere werden im einstreulosen Dunkelstall bei Trogfütterung gehalten. Futtergrundlage sind gedämpfte Großküchenabfälle und Getreideschrot, vorwiegend Gerste. Die Entmischung erfolgt nach dem Staukanalverfahren. Von der Gülle wurden folgende Analysenwerte ermittelt: 15 Prozent Trockensubstanz, davon 79 Prozent organische Substanz und 21 Prozent Glührückstand.

**Tafel 1: Gehalt an C, N, P und BSB<sub>5</sub> von Schweinegülle und häuslichem Abwasser**

Konzentration an	Schweinegülle	Häusliches Abwasser
Kohlenstoff [mg C/l]	70 000—80 000	100—150
Stickstoff [mg N/l]	1 000—3 000	20—40
Phosphor [mg P/l]	100—500	9—15
BSB <sub>5</sub> [mg/l] *)	20 000—35 000	250—300

\*) BSB<sub>5</sub> = biologischer Sauerstoff-Bedarf innerhalb von 5 Tagen bei 20° Celsius