

Dezentrale Kläranlage mit optimierter Sauerstoffversorgung

A. Boeckle, N. Späth, S. Schülien

1. Einleitung

Der Stoffkreislauf in der Biosphäre kann vereinfacht und schematisch durch die Photosynthese-Gleichung beschrieben werden



Die Pflanze nimmt Wasser über die Wurzeln und CO_2 über die Blätter auf und erzeugt daraus mit Hilfe von Sonnenenergie Biomasse (hier Glucose) und Sauerstoff, der über die Blätter an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Umkehrreaktion besteht darin, daß Sauerstoff mit der Biomasse reagiert, wobei Wasser und CO_2 entstehen sowie Energie freigesetzt wird. Dieser Vorgang spielt sich in jeder Kläranlage beim Abbau von organischen Verunreinigungen des Abwassers ab. Die Reaktion läuft mit Unterstützung von Mikroorganismen ab, die ihre Lebensenergie aus dem Prozeß (1) beziehen.

In normalen Kläranlagen wird atmosphärische Luft (78% N_2 , 21% O_2) in das verschmutzte Abwasser gepumpt, um die organischen Bestandteile abzubauen. Bei Verwendung von reinem Sauerstoff ist die Reinigungsleistung bei Normaldruck fast fünfmal größer.

Normale kommunale Kläranlagen haben das ganze Jahr hindurch gleichmäßige Schmutzfrachten zu bewältigen. Weinbaubetriebe sind Saisonbetriebe. Bei ihnen fallen während der Erntezeit und kurz danach erhebliche Abwasserbelastungen an, die nur durch ungewöhnlich große Belüftungsbecken bewältigt werden können oder durch zusätzliche Sauerstoffzufuhr. Die großen Schmutzfrachten von Weinbauabwässern ergeben sich aus den hohen hygienischen Anforderungen, die mit der Weinherstellung verknüpft sind. Dabei fallen große Mengen von, organisch verschmutztem Spülwasser an, die aus der Reinigung von Lese- und Transportgeräten, von Mühlen, Keltern, Pumpen, Flaschen, Fässern, Schläuchen, Abfüllgeräten, Filtern, Separatoren usw. stammen. Auch Trübstoffreste und Hefeanteile stellen eine starke Belastung dar /1/.

Diese Abwässer werden üblicherweise in die öffentliche Kanalisation und damit in die kommunale Kläranlage eingeleitet. Da die Abwässer saisonal stark unterschiedlich belastet sind, hat die öffentliche Kläranlage Schwierigkeiten mit der Verarbeitung. Die Belastung kann mit Hilfe einer betrieblichen Abwasservorbehandlungsanlage stark reduziert werden.

Im folgenden ist eine derartige Anlage mit neuartiger Sauerstoffversorgung beschrieben, die mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt entwickelt und gebaut worden ist.

2. Dezentrale Kläranlage

Sie besteht im wesentlichen aus einem Wasserelektrolyseur zur Herstellung von Sauerstoff ($250 \frac{1}{h}$), dem Aquainjektor (s. Abb. 2), in dem das verschmutzte Wasser bis zur Sättigung mit Sauerstoff angereichert wird, sowie dem Herzstück der Anlage, dem AquaBioreaktor. Ein Schema der Anlage ist in Abb. 1 gezeigt.

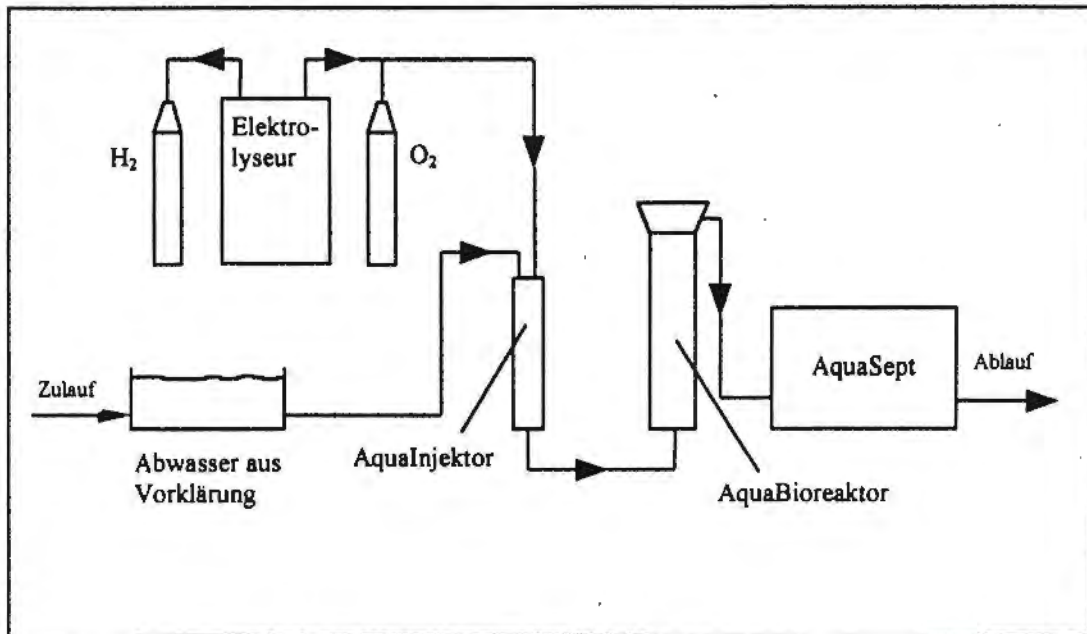


Abb. 1 Schematische Darstellung einer AquaPlan-Reinigungsstraße

/1/. Der Bioreaktor ist ein senkrecht stehendes Rohr von einem Durchmesser von 40 cm und einer Höhe von 2,30 m (s. Abb. 3). Dieses Rohr ist mit Quarzsand (Korndurchmesser ca. 0,3 mm) gefüllt. Das zu reinigende Abwasser wird von unten durch eine Düse in den Bioreaktor gepumpt und strömt an den Sandkörnern vorbei. Diese werden nach einiger Zeit von Mikroorganismen besiedelt, welche von der vorbeiströmenden Biomasse leben. Die mit Mikroorganismen besiedelte Sandoberfläche beträgt mehrere 10.000 m^2 . Der Mechanismus ihrer Energieversorgung ist durch Gleichung (1) beschrieben.

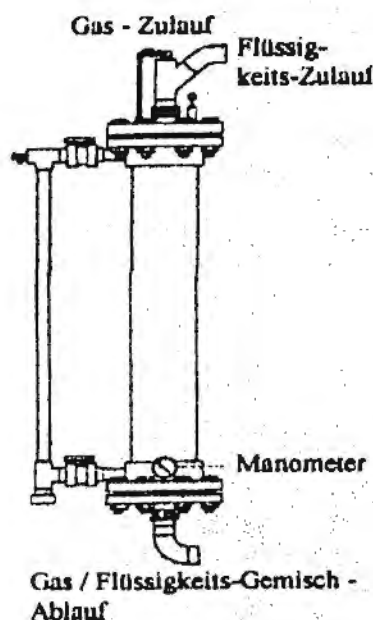


Abb. 2 Schematische Darstellung des Aquainjektors

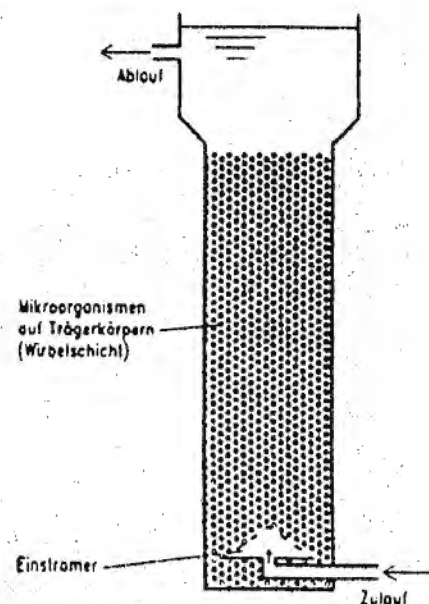


Abb. 3 Schematische Darstellung des AquaBioreaktors

Zum Wachstum benötigen sie noch Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die z. T. im Abwasser enthalten sind /2/. Als Reaktionsprodukt des Stoffwechsels treten nach Gl. (1) Wasser und CO_2 auf sowie abgestorbene Mikroorganismen und unverbrauchte Biomassepartikel. Diese gelangen in den oberen Teil des Bioreaktors und werden von dort in den Aquaseptor (Abb. 4) gepumpt, wo sie durch Flotation abgeschieden werden /1/. Um die Flotation zu bewirken, strömt das Abwasser zwischen Bioreaktor und Aquaseptor durch einen Aquainjektor, der den Abwasserstrom mit kleinen Luftbläschen anreichert. Diese Luftbläschen lagern sich an nicht abgebaute Biomassepartikel an, so daß sie im Aquaseptor noch oben steigen und von dort durch einen Abräumer in ein Schlammbecken transportiert werden. Nicht abgeschiedene Partikel sammeln sich auf dem Boden des Reaktionsraums (Abb. 4), sie müssen dort von Zeit zu Zeit abgepumpt werden. Das so geklärte Abwasser kann in die Kanalisation gegeben werden.

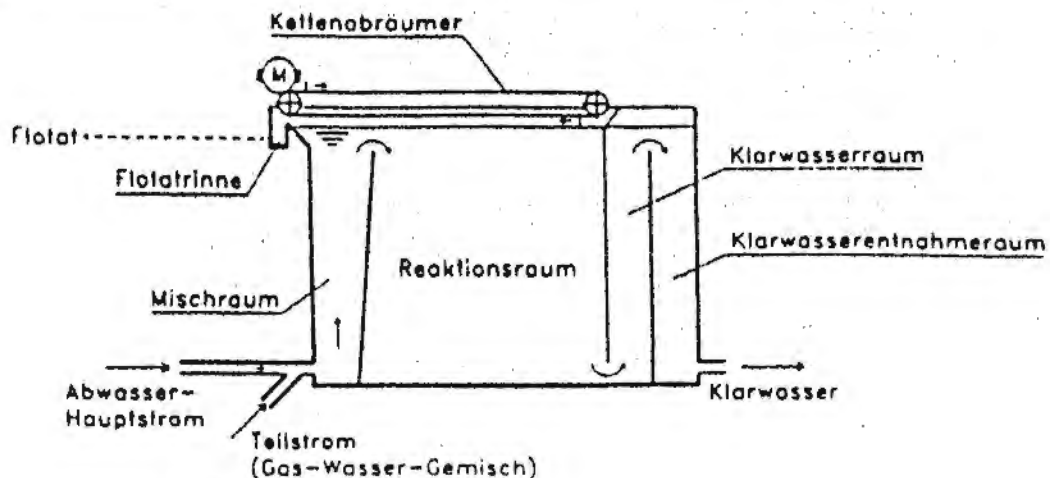


Abb. 4 Schematische Darstellung des AquaSeptors

3. Messungen an der Anlage

Die Anlage ist an der FHW gebaut und getestet worden und wird im Weinbaubetrieb „Erzeugergemeinschaft Goldenes Rheinhessen“ in Bornheim bei Alzey getestet. Diese Erzeugergemeinschaft ist ein Zusammenschluß von Winzern aus dem rheinhessischen Weinbaugebiet mit einer Weinbergfläche von ca. 1350 ha und einem Lagerraum von 13 Millionen Litern. Von den Mitgliedern werden pro Jahr 10 - 12 Millionen Liter Trauben, Most oder Wein angeliefert, die dann im Betrieb weiter verarbeitet werden. Die Abwässer des Betriebs weisen je nach Jahreszeit sehr stark schwankende Belastungen auf. Da die Abwasserbehandlung in der kommunalen Kläranlage sehr hohe Kosten verursacht hätte, hat die Erzeugergemeinschaft sich für eine eigene Abwasservorbehandlung entschieden und eine Reinigungsanlage der Firma Erich Zimmer/Ludwigshafen installiert /3/.

Diese Anlage ist seit Ende 1993 in Betrieb. Sie ist schematisch in Abb. 5 skizziert.

Das Schmutzwasser sammelt sich im Pumpensumpf und wird von dort in einem Mischbehälter gepumpt. Über eine Schlauchpumpe gelangt es in den Abbau-Reaktor, dessen Sauerstoffversorgung durch eine Belüftungspumpe mit Düsenvorrichtung gewährleistet wird. Die Belüftungspumpe wird durch einen O_2 -Sensor gesteuert. Vom Reaktor strömt das geklärte Abwasser in ein Nachklärbecken und von dort in die Kanalisation. Der Überschussschlamm wird in einem Schlammsilo zwischengespeichert, bevor er zur kommunalen Kläranlage gebracht wird. Im Herbst 1995 wurden in einer umfangreichen Meßreihe die wichtigsten Kenngrößen der Anlage bestimmt /4/. Abb. 6 zeigt die BSB_5 -Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf, Abb. 7 die CSB-Belastungen

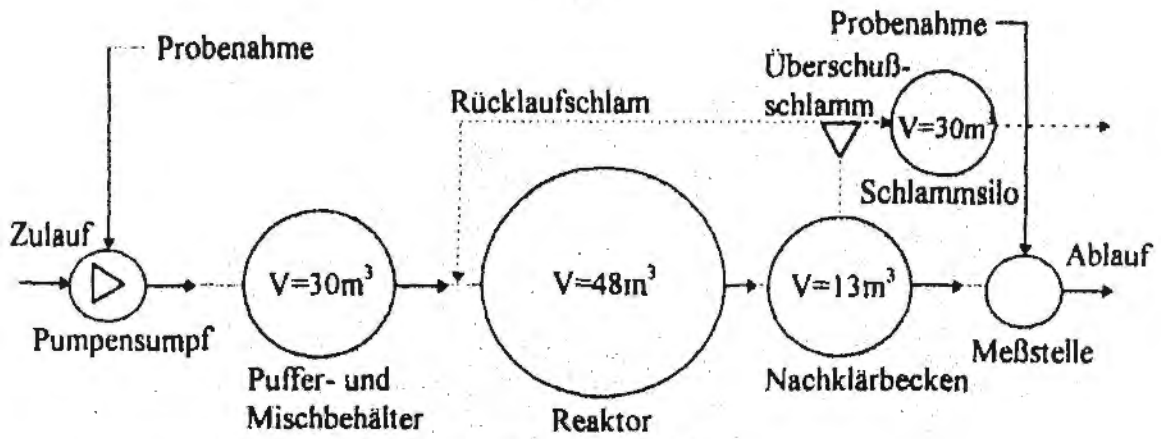


Abb. 5 Schema der Abwasservorbehandlungsanlage in Bornheim

Abwasservorreinigung Bornheim 1995

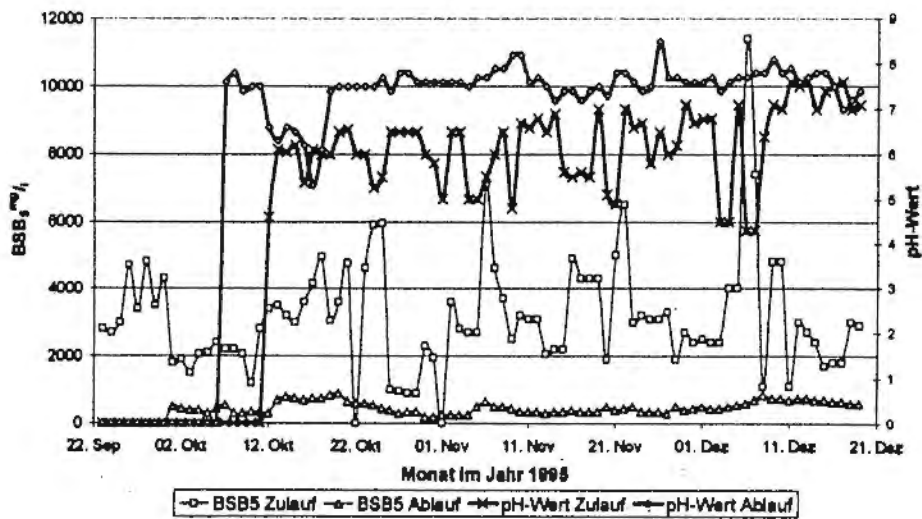


Abb. 6 zeigt die BSB₅-Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf

Abwasservorreinigung Bornheim 1995

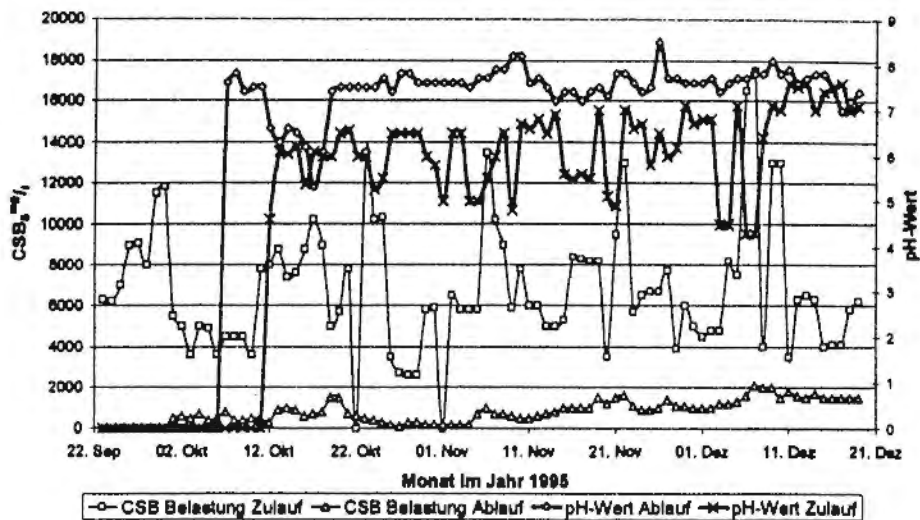


Abb. 7 zeigt die CSB₅-Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf

Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, daß die hohe organische Belastung der Weinbauabwässer in der Anlage weitgehend abgebaut wurde.

Für die neu entwickelte Anlage wurde zunächst die Sauerstoffproduktion durch Wasserelektrolyse optimiert. Anschließend wurde das Betriebsverhalten der Anlage getestet.

Zu diesem Zweck wurde sie in dem Weinbaubetrieb „Goldenes Rheinhessen“ in Bornheim bei Alzey aufgebaut. Das belastete Abwasser wurde in vorgegebenen Dosierungen (50 l/h, 100 l/h usw.) dem Pumpensumpf (s. Abb. 5) entnommen und über eine Kreiselpumpe sowie einen Durchflußmesser in die dezentrale Kläranlage eingeleitet.

Der Meßaufbau der Anlage ist in Abb. 8 dargestellt. Der prinzipielle Aufbau entspricht dem in Abb. 1. Allerdings enthält die Anlage zwei Bioreaktoren mit Vorlaufkammern, die hintereinander oder parallel geschaltet werden können. Bei den hier beschriebenen Messungen sind die Bioreaktoren hydraulisch parallel geschaltet (Abb. 8). Das im Vorratsbehälter angesammelte Abwasser wird mit einer Pumpe durch einen Durchflußmesser in die Kammer 1 befördert. Von dort wird es mit einer weiteren Pumpe in den Injektor gepumpt, wo es mit reinem Sauerstoff (Druck ca. 1 bar) angereichert wird. Die Sauerstoffinjektion erfolgt nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe. Beide Bioreaktoren werden mit diesem sauerstoffhaltigen Abwasser versorgt.

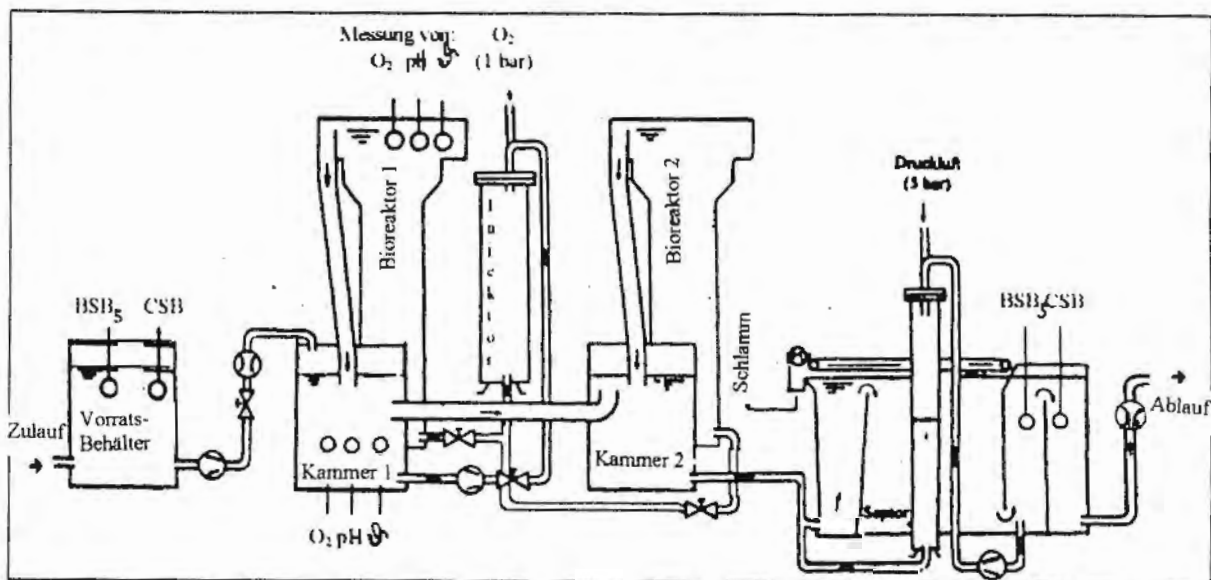


Abb. 8 Meßaufbau und Sensorikplan der dezentralen Kläranlage

Vom Bioreaktor 1 strömt das Abwasser über ein Fallrohr in die Kammer 1, vom Bioreaktor 2 in die Kammer 2. Das mit Sauerstoff versetzte Abwasser durchströmt die Bioreaktoren von unten nach oben. Es soll dort durch die Mikroorganismen, die auf dem Sand siedeln, gereinigt werden. Wenn kein weiteres Schmutzwasser aus dem Vorratsbehälter nachströmt, wird es so lange im Kreis von Kammer 1 (bzw. 2), Injektor und Bioreaktor 1 (bzw. 2) geführt, bis der Sauerstoffgehalt am Ausgang von Bioreaktor 1 größer als 4 mg/l ist. In diesem Fall kann die Förderpumpe weiteres Schmutzwasser in die Kammer 1 pumpen. Die Wasserniveaus in Kammer 1, Kammer 2, Aquaseptor und Ablauf liegen alle auf gleicher Höhe.

Die Platzierung der Sensoren geht aus Abb. 8 hervor. Sauerstoffgehalt des Abwassers, pH-Werte, Temperaturen, Abwasserzulauf sowie Elektrolyseurdaten sind kontinuierlich über eine Datenerfassungsanlage gemessen, außerdem mehrmals täglich manuell aufgezeichnet worden. BSB₅ - und CSB-Wertewurden von der SLFA in Neustadt/W bestimmt. Die Zulaufwerte sind automatisch über einen Probennehmer als 24-Stunden-Mittelwerte gemessen, die Ablaufwerte sind jeweils um acht Uhr morgens aus der letzten Kammer des Aquainjektors ermittelt worden.

Aus Vorversuchen ergab sich, daß in der Anlage eine stabile Biologie keinen Bestand hatte. Sobald sich ein biologischer Rasen auf dem Sand der Bioreaktoren aufgebaut hatte, verklumpte dieser bald durch Verkleben der Sandkörner, wenn der Durchfluß oder die Sauerstoffzufuhr zu gering waren. Der Sauerstoffinjektor konnte höchstens 100 l/h Sauerstoff eintragen. In den ungefähr faustgroßen Sandklumpen, die im Innern frei von Sauerstoff waren, trat anaerober Abbau auf. Durch die dabei freigesetzten Reaktionsprodukte wurde die Biologie zerstört. Durch höhere Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers konnte diese „Verblockung“ unterbunden werden.

Die Messungen sind in den Abbildungen 9 bis 16 dargestellt. Es werden nur die Meßergebnisse diskutiert, bei denen BSB₅ – und CSB-Werte ermittelt wurden.

Die Anlage wurde am 19.5., am 23.5. und am 27.5.1998 mit Belebtschlamm aus dem Bioreaktor der Kläranlage des Weinbaubetriebs (Abb. 5) geimpft. Am 30.5. wurde sie entleert und mit neuem Abwasser aus dem Mischbehälter des Weinbaubetriebs gefüllt. Von diesem Zeitpunkt an sank der pH-Wert des Abwassers von ca. 8 auf 4,5 am 3.6. und blieb auf diesem Wert bis zum 13.6., als Lauge, Harnstoff und Phosphat zugesetzt wurden, so daß der pH-Wert am 16.6. bis auf 8 anstieg (Abb. 11, 12).

Mit dem sinkenden pH-Wert (saurer Abwasser aus dem Weinbaubetrieb) sank einige Stunden später auch der Sauerstoff-Gehalt, d.h. die Sauerstoffzehrung nahm zu (Abb. 9, 10). Mit steigendem pH-Wert ab dem 13.6. fiel der Sauerstoffgehalt im Bioreaktor und in Kammer 1 auf Null, bei gleichbleibendem Sauerstoffeintrag in das Abwasser. Es ist wahrscheinlich, daß ab dem 13.6. 98 biologischer Abbau stattfand.

Der zeitliche Verlauf der Abwassertemperatur im Bioreaktor ist in Abb. 13 dargestellt, der Abwasserdurchfluß in Abb. 14, die BSB₅- und CSB-Werte ergeben sich aus den Abb. 15 und 16. Wie schon oben erwähnt, sind die Zulaufwerte 24-Stunden-Mittelwerte, die Ablaufwerte ergeben sich aus Messungen, die um acht Uhr des angegebenen Tages gemacht wurden.

Schlammabildung konnte nur in sehr geringem Umfang festgestellt werden.

Voraussetzung für einen nennenswerten Abbau war ein relativ niedriger pH-Wert (pH<5) und eine Mindestkonzentration von Sauerstoff (>4 mg/l). Der Sauerstoffeintrag in das Abwasser kann dadurch verfälscht worden sein, daß in den Fallrohren zwischen Bioreaktor und Kammer ein intensiver Austausch mit der umgebenden Atmosphäre stattfand.

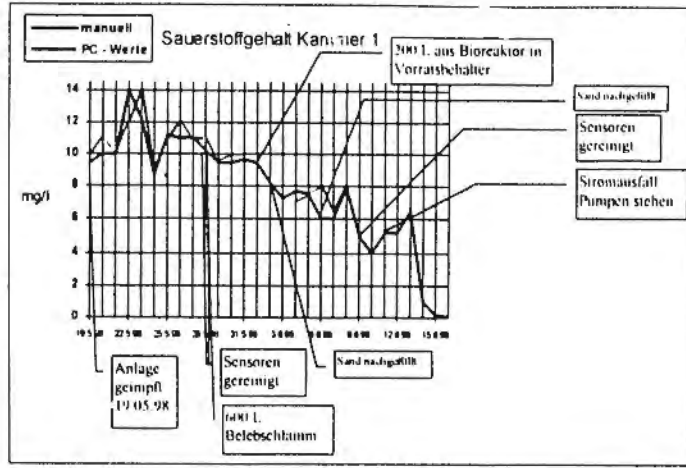


Abb. 9
Sauerstoffgehalt Kammer 1

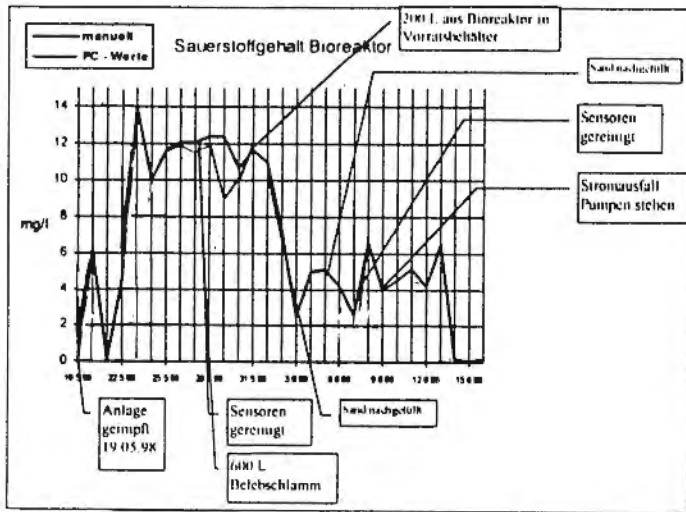


Abb. 10
Sauerstoffgehalt Bioreaktor

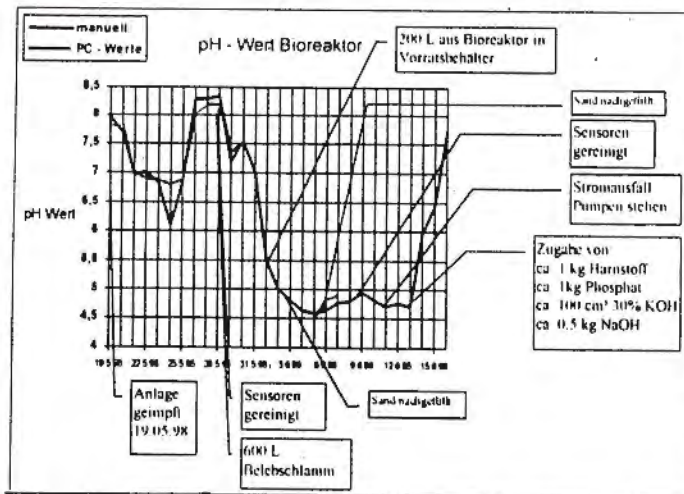


Abb. 11
pH-Wert Bioreaktor

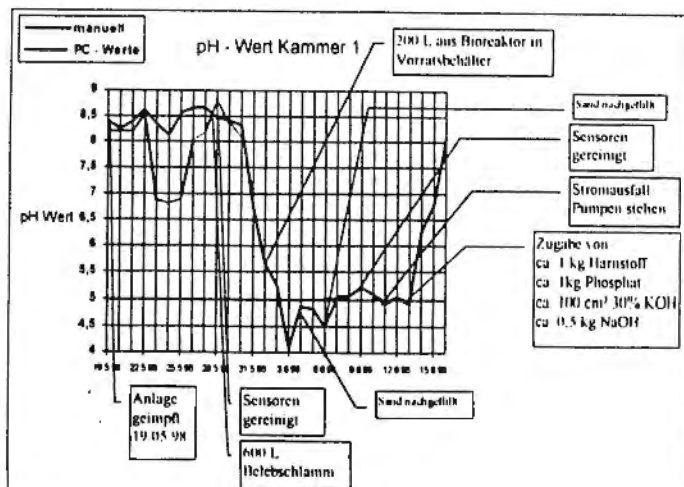


Abb. 12
pH-Wert Kammer 1

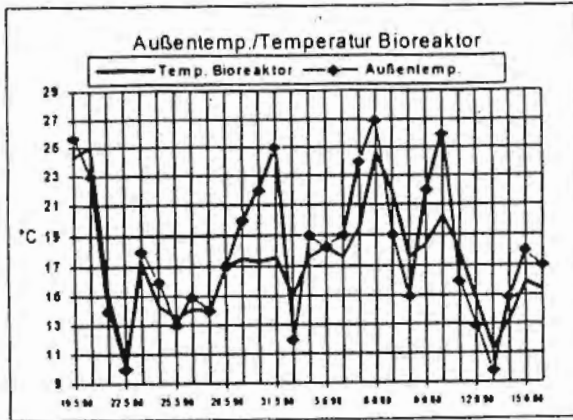


Abb. 13
Außentemperatur und
Temperatur im Bioreaktor

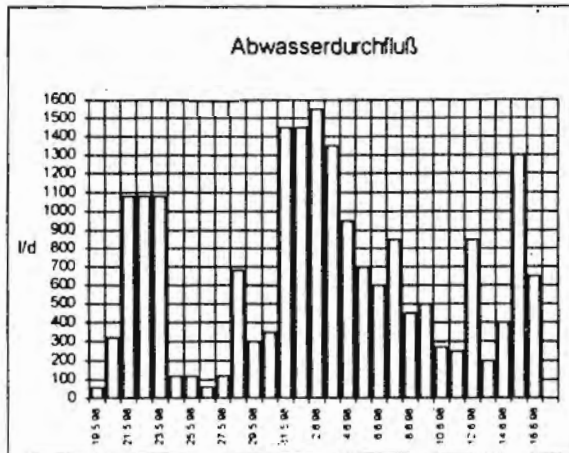


Abb. 14
Abwasserdurchfluß/Tag

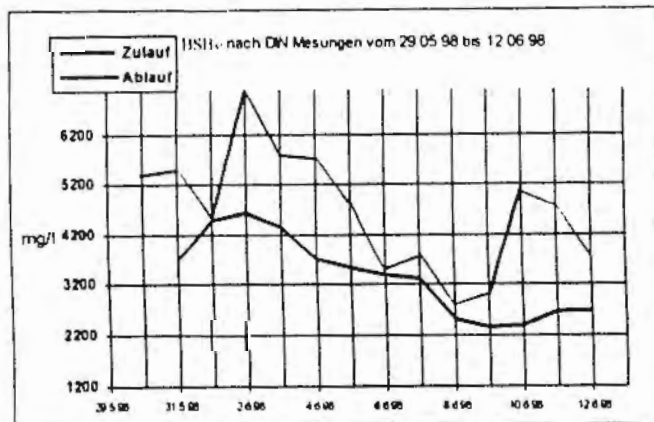


Abb. 15
BSB₅-Werte des Abwassers

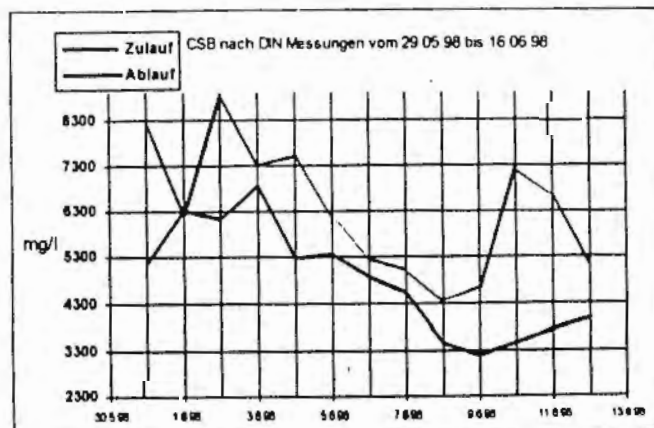


Abb. 16
CSB-Werte des Abwassers

4. Auswertung der Messungen

Aus den Messungen können nur aussagekräftige Konsequenzen für die Tage, an denen BSB₅- und CSB-Werte im Zulauf und Ablauf bestimmt worden sind, gezogen werden. Das sind die Tage vom 30.5. bis 15.6.1998. An all diesen Tagen hat ein mehr oder weniger ausgeprägter Abbau stattgefunden. Starker Abbau war am 2.6. und am 10.6.98. Das ist die Zeit, in der der Sauerstoffgehalt in Kammer 1 wie im Bioreaktor von ca. 10 mg/l auf etwa 4 mg/l abfiel. Parallel dazu fiel der pH-Wert von ca. 8 auf 4,5 im Bioreaktor und in Kammer 1. Die festgestellte Sauerstoffzehrung spricht für einen chemischen Abbau der Biomasse bei niedrigem pH-Wert. Eine Biologie konnte im Abwasser nicht nachgewiesen werden. Der Grund dafür mag einerseits der hohe Sauerstoffgehalt sein (>4 mg/l), der die sich bildende Biologie sofort oxidierte, andererseits der niedrige pH-Wert sowie zeitweise Reaktionsprodukte aus anaerobem Abbau.

Aus den Meßergebnissen kann geschlossen werden:

- Eine stationäre Biologie bildete sich auf Grund des hohen Sauerstoffgehalts nicht aus, da die sich bildende Biologie sofort oxidiert wurde.
- Es fand kräftiger chemischer Abbau statt, welcher optimiert werden könnte. Der chemische Abbau wird vermutlich durch Enzyme katalysiert, die im Abwasser enthalten sind. Diese Enzyme stammen aus dem biologischen Rasen im Zuleitungssystem der Kläranlage.
- Der Energieverbrauch der Anlage ist sehr hoch, da die Pumpen kontinuierlich laufen müssen, um die Sandschüttung in den Bioreaktoren in der Schwebe zu halten.

Die Sauerstoffversorgung durch den Elektrolyseur funktioniert einwandfrei. Sie konnte in ihrem Wirkungsgrad und Betriebsverhalten verbessert werden.

Die verwendete Kläranlage muß für die Behandlung von Weinbauabwässern umgebaut werden. Ein geeignetes System ist in Abb. 5 skizziert. Diese Kläranlage kann in ihrer Abbauleistung dadurch verbessert werden, daß das Abwasser im Pufferbehälter stark mit Sauerstoff angereichert wird – so stark, daß sich keine Biologie und damit Schlamm bilden kann, aber ein beträchtlicher chemischer Abbau stattfindet. Eine schematische Darstellung dieses Reaktors ist in Abb. 17 gegeben (W+A-Hochleistungsreaktor).

Durch die vorgeschlagene Maßnahme wird die Abbauleistung erhöht und die Störanfälligkeit reduziert, da Belastungsspitzen, die die Biologie schädigen, schnell chemisch abgebaut werden. Der Schlammfall verringert sich.

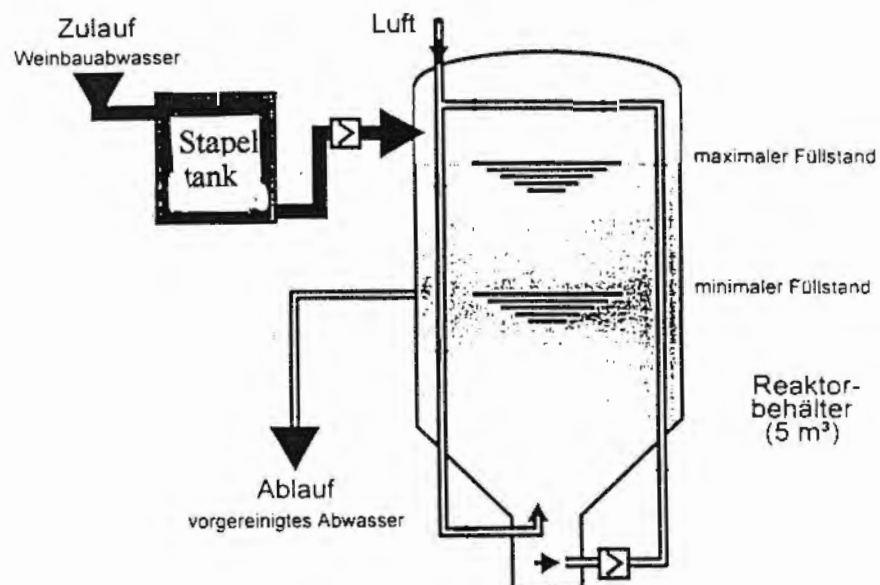


Abb. 17 Verfahrensschema Hochleistungs-Kompakt-Reaktor (W&A)

5. Verwendung des Wasserstoffs zur Heißdampferzeugung

Wie bereits beschrieben, wird zur Sauerstoffproduktion Wasserspaltung durch Elektrolyse eingesetzt. Der dabei entstandene Wasserstoff wird in die Atmosphäre abgelassen und steht somit zu keiner weiteren Verwendung zur Verfügung. Da Wasserstoff als Brenngas verwendet werden kann, bietet es sich hier an, dieses Gas zum Beheizen eines Heißdampferzeugers zu nutzen.

In Weinbaubetrieben besteht ein großer Bedarf an Heißdampf zur Reinigung und Sterilisierung von Behältern und Apparaten. Der Heißdampf wird normalerweise in speziellen Heißdampferzeugern produziert, die elektrisch oder gasbetrieben sind. Ein mit Erdgas betriebener Heißdampferzeuger kann so umgebaut werden, daß er mit Wasserstoff betrieben werden kann. Der Wasserstoff fällt als Abfallprodukt bei der Sauerstofferzeugung im Elektrolyseur an. Der Wasserstoff soll nun nicht in die Umwelt abgelassen werden, sondern zur Erzeugung des Heißdampfes verwendet werden und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage erhöhen (s. Abb. 18).

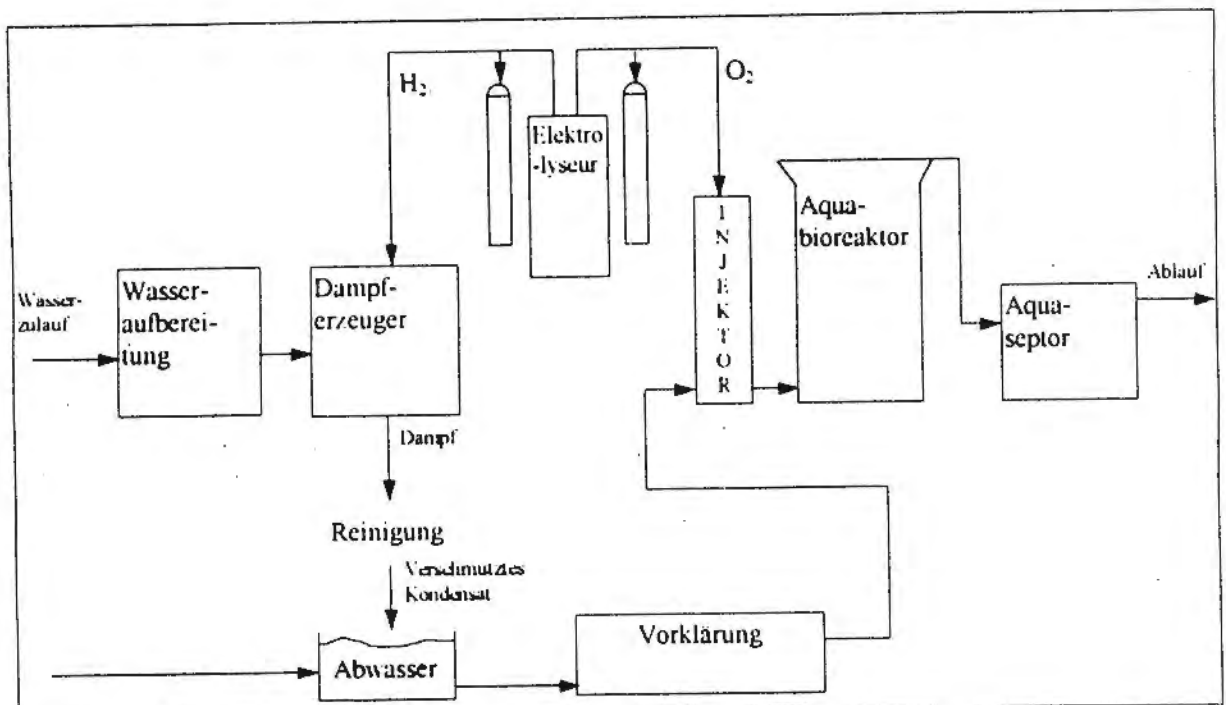


Abb. 18 Schematische Darstellung der Kläranlage mit Dampferzeuger

Da zur Reinigung nur kleine Leistungen benötigt werden, sollte der Dampferzeuger eine möglichst kleine Leistung besitzen. Der Grenzwert sollte bei $P_{II} = 30\text{kW}$ liegen. Außerdem ist darauf zu achten, daß der Dampfverbrauch nicht die Wasserstoffproduktion des Elektrolyseurs überschreitet. Die Wasserstoffproduktion liegt bei ca. 400 l/h.

Literatur

1. S. Kramer
2. GTZ
3. E. Zimmer
4. L. Coppik

Wasserstofftechnik 2/96 S. 6-60

Abwassertechnologie Springer 1988

Wasserstofftechnik 2/96 S. 106-111

*Staatl. Lehr- und Forschungsanstalt
Neustadt/W. Weinbau-Abwasser-Symposium
30.8.1996*

Diplomarbeiten Huxel (FHW 1998), Ruhe (FHW 1999), Frisch (FHW 1998)