

Praxis der Sauerstoffzufuhrmessung an Abwasserbelüftern

G. Fröse, Braunschweig

1 Einleitung

Die Bestimmung der Sauerstoffzufuhr von Abwasser-Belüftungssystemen erfolgt heute in der weit überwiegenden Zahl der Fälle nach einer „instationären“ Methode. „Instationär“ bedeutet, dass der Sauerstoffeintrag aus der zeitlichen Veränderung des Sauerstoffgehaltes berechnet wird. Um eine solche Veränderung einzuleiten, muss die Sauerstoffkonzentration vor Beginn der eigentlichen Messung unter den jeweiligen Sättigungswert gesenkt („Absorptionsmessung“) oder über den Sättigungswert hinaus erhöht werden („Desorptionsmessung“). Die instationäre Methode hat den Vorteil des weiten Anwendungsbereiches: sie kann bei praktisch jedem Belüftungssystem und sowohl in Reinwasser als auch in Belebtschlamm angewendet werden.

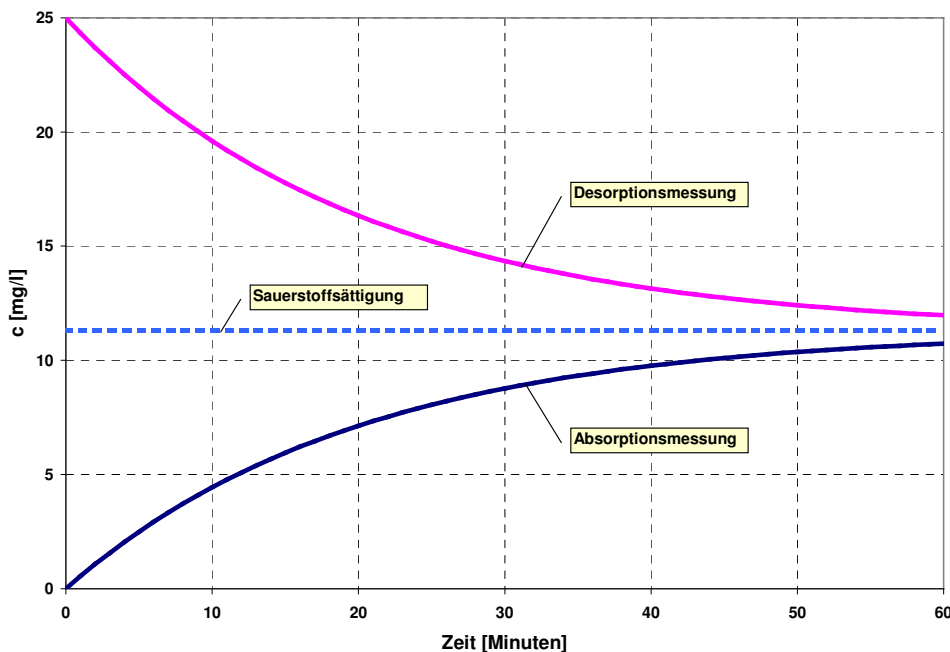


Abb. 1: Ganglinien der Sauerstoffkonzentration bei Absorptions- und Desorptionsmessungen

Eine alternative Messmethode, die allerdings nur bei Druckbelüftungssystemen und für Messungen in Belebtschlamm in Betracht kommt, ist die so genannte „Abluftmethode“, die auf einer Gasphasen-Massenbilanz der zugeführten und der aus dem Belebungsbecken austretenden Luft basiert. Gegenüber der instationären Methode hat das Abluftverfahren zwei wichtige Vorteile: es sind damit auch kontinuierliche Messungen über einen längeren Zeitraum möglich und es ist keine Änderung der Betriebsbedingungen des untersuchten Beckens erforderlich.

Um eine einheitliche und nachvollziehbare Vorgehensweise sicherzustellen, existieren Normen und Richtlinien für die Durchführung von Sauerstoffzufuhrversuchen. In Deutschland beispielsweise ist die einschlägige Richtlinie das ATV-DVWK-Merkblatt M-209 /1/, künftig die EN 12255-15, in den USA ist die US-Norm /2/ maßgebend. Durch internationale Zusammenarbeit sind diese Normen und Richtlinien im Laufe der letzten 20 Jahre zunehmend einander angeglichen worden.

In der Praxis lässt sich allerdings immer wieder feststellen, dass es zur korrekten Durchführung von Sauerstoffzufuhrversuchen nicht genügt, die einschlägigen Normen und Richtlinien wie ein Kochrezept anzuwenden, sondern dass neben fundiertem Grundlagenwissen sehr viel Erfahrung erforderlich ist, um anlagen-spezifische Probleme sowie mögliche Fehlerquellen bereits im Vorfeld zu erkennen und Fehler bzw. Unzulänglichkeiten bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung zu vermeiden. Die Messung selbst liefert auch bei fehlerhafter Vorgehensweise ein Ergebnis, dessen Unzuverlässigkeit allerdings bei oberflächlicher Betrachtung und ohne zusätzliche Informationen oft nicht zu erkennen ist. In vielen Fällen hat sich gezeigt, dass die Stellen, denen die Bewertung und Prüfung der Vorgehensweise und der Ergebnisse obliegt (z.B. Planungsbüros, Überwachungsbehörden), auf Grund fehlenden Fachwissens oder auch unzureichender Dokumentation nicht in der Lage sind, diese Bewertung und Prüfung auch tatsächlich vorzunehmen. So werden in der Folge falsche Resultate akzeptiert und es besteht sogar die Gefahr, dass diese Resultate als Grundlage nachfolgender Planungen verwendet werden.

Mit diesem Beitrag sollen vorrangig Aspekte der praktischen Umsetzung der Richtlinien sowie Probleme und typische Fehler bei instationären Sauerstoffzufuhrmessungen behandelt werden, um damit auch Beurteilungskriterien für solche Messungen aufzustellen bzw. vorhandene Kriterien weiter zu konkretisieren. Bezüglich der theoretischen Grundlagen wird auf die genannten Richtlinien und die angegebene Literatur verwiesen.

2 Anforderungen an die messtechnische Ausrüstung

Hauptbestandteile der messtechnischen Ausrüstung für Sauerstoffzufuhrversuche nach der instationären Methode sind selbstverständlich Sauerstoffelektroden. Diese sollten robust sein und müssen eine ausreichend geringe Ansprechzeit bei möglichst niedriger Anströmgeschwindigkeit haben. Entsprechende Beurteilungskriterien und Hinweise zur Überprüfung dieser Parameter finden sich beispielsweise im ATV-DVWK-Merkblatt M-209.

Um Ausfälle zu kompensieren und auch unter schwierigeren Verhältnissen aussagefähige Messungen durchführen zu können, sollte die Ausrüstung mindestens sechs Elektroden umfassen.

Unverzichtbares Zubehör sind darüber hinaus Messgeräte für Leitfähigkeit, Druck, atmosphärischen Luftdruck, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Drehzahl. Die Wassertemperatur kann meistens über die in den Sauerstoffelektroden eingebauten Temperatursensoren erfasst werden. Ist dies nicht möglich, wird ein weiteres Temperaturmessgerät benötigt.

Zur Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme sollte eine (qualitativ hochwertige) Leistungsmesszange zur Verfügung stehen. Vorzugsweise sollten zur Leistungsbestimmung jedoch geeichte Wirkleistungszähler oder sogenannte „Leistungsmesskoffer“ verwendet werden. Die Installation der letztgenannten Messeinrichtungen kann allerdings nur durch entsprechendes Fachpersonal erfolgen.

Für Messungen in belebtem Schlamm ist zusätzlich eine geeignete Zehrungsmesseinrichtung erforderlich.

Zur Aufzeichnung und Dokumentation der Messsignale sollte mindestens ein Linienschreiber mit einer für alle Sauerstoffelektroden ausreichenden Zahl von Eingangskanälen vorhanden sein. Wesentlich besser ist im Hinblick auf eine möglichst schnelle Auswertung der Messungen eine Datenerfassung mittels Datenlogger und Computer.

Um Blasenbilder dokumentieren und vergleichend bewerten zu können, ist eine Videokamera sehr nützlich. Standfotos haben im Vergleich zu Videoaufnahmen nur geringe Aussagekraft.

Zur Lösung und Verteilung von Chemikalien können – abhängig von der Größe und Art des zu untersuchenden Beckens und von der Art der Versuche – geeignete Lösebehälter, Mischer, Pumpen und Schlauchleitungen erforderlich sein.

Die gesamte Messeinrichtung muss regelmäßig auf korrekte Funktion überprüft werden. Im Falle der Sauerstoffelektroden beinhaltet dies die Kontrolle der Membranen und des Elektrolytvorrats. Außerdem sollte von Zeit zu Zeit die Ansprechgeschwindigkeit kontrolliert werden. Temperaturmessgeräte sollten mit Hilfe von Präzisionsthermometern, Leitfähigkeitsmessgeräte über Standardlösungen kalibriert werden. Geräte, für die keine „Kalibriernormale“ zur Verfügung stehen, müssen in regelmäßigen Zeitabständen durch den jeweiligen Hersteller justiert werden. Es sollte daher bei der Beschaffung der Messgeräte darauf geachtet werden, dass der Hersteller einen solchen Kalibrierdienst anbietet und auch entsprechende Zertifikate ausstellt.

Eine beispielhafte Konfiguration einer professionellen Messausrüstung für instationäre Sauerstoffzufuhrversuche zeigt Abbildung 2. Unbedingt erforderliche Bestand-

teile sind rot, optionales Zubehör grau unterlegt. Nicht dargestellt sind die zur Chemikaliendosierung erforderlichen Komponenten.

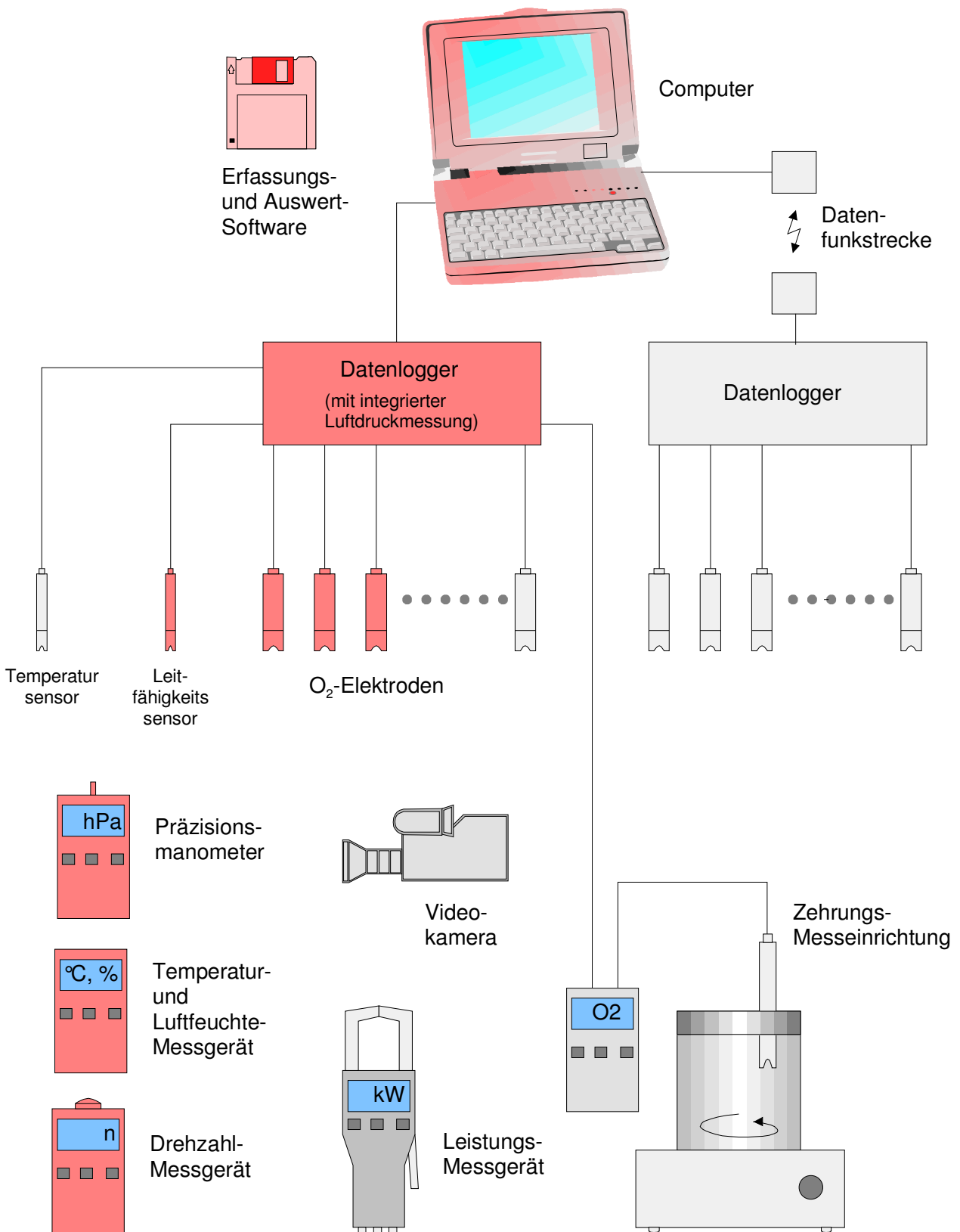


Abb. 2: Beispiel für eine professionelle Messausrüstung

3 Vorbereitung von Sauerstoffzufuhrversuchen

In der Praxis hat sich immer wieder bestätigt, dass es sinnvoll ist, eher etwas mehr Zeit und Aufwand in die Vorbereitung einer Messung zu investieren als nach einer nicht wiederholbaren Messung wochen- oder monatelang, letztlich aber doch häufig ergebnislos über Abweichungen von Randbedingungen, nicht korrekt justierte oder nur unzureichend eingearbeitete Belüfter, den Einfluss der Wasserqualität, die Zuverlässigkeit von Umrechnungen oder fehlende, weil ursprünglich nicht geforderte Daten zu diskutieren.

Die Vorbereitung beginnt mit der Beschaffung vollständiger Unterlagen. Grundsätzlich sollten alle relevanten Abschnitte des Bau-Leistungsverzeichnisses sowie eine gültige und lesbare Zeichnung des zu untersuchenden Beckens einschließlich der installierten Belüftungseinrichtung vorliegen. Darüber hinaus werden je nach Art des Belüftungssystems Daten der Belüfterelemente, der Verdichter, der Rührwerke sowie sonstiger beteiligter Antriebe, eventuell auch Angaben zu Frequenzumrichtern benötigt. Verzweigte Luftverteilungen sollten zumindest als schematische Darstellung vorliegen. Auf der Grundlage dieser Informationen ist dann ein Messprogramm aufzustellen und anschließend zwischen allen Beteiligten abzustimmen. Falls das Leistungsverzeichnis nicht bereits eindeutige und vollständige Festlegungen enthält, sind dabei die folgenden Fragen zu beantworten:

- wo und wann soll gemessen werden (Beckenstraße/Beckenabschnitt, Termin/Ausführungszeitplan) ?
- bei welchen Betriebseinstellungen sollen die Messungen durchgeführt werden ?
- sind über die allgemeinen Kriterien und Anforderungen (M-209) hinaus weitere Vereinbarungen getroffen worden ?
- Wie und wo sollen Chemikalien dosiert werden ?
- Sind alle beteiligten Komponenten betriebsbereit, ausreichend eingearbeitet und funktionieren sie auch problemlos über die Dauer des geplanten Versuchsprogrammes ?
- Sind begleitende Messungen wie z.B. Messung der Leistungsaufnahme, Bestimmung des Luftvolumenstroms, Messung des Sättigungswertes erforderlich ?
- Ist eine eindeutige Zuordnung aller Messwerte (Leistungsaufnahme bzw. Luftvolumenstrom zur Sauerstoffzufuhr im untersuchten Becken bzw. Beckenabschnitt) möglich ?
- Welche Vorbereitungen sind auf der betreffenden Anlage erforderlich ?
- Wer ist für die Vorbereitungen sowie das Herstellen der Randbedingungen und Betriebseinstellungen zuständig und verantwortlich ?
- Sind besondere Schwierigkeiten wie z.B. unvermeidbarer Wasseraustausch mit benachbarten Becken, unzureichende Durchmischung zu erwarten ?
- Ist das zu untersuchende Becken zum Zeitpunkt der Untersuchung auch für den Chemikalientransport zugänglich ?
- Werden bauseits installierte Messeinrichtungen benötigt und falls ja: erfüllen diese Messgeräte die Anforderungen im Rahmen des Messprogrammes ?
- Wird Hilfspersonal oder Mitwirkung des Anlagenpersonals benötigt ?
- Welche Auswirkungen ergeben sich auf den Betrieb der Anlage ?
- Wie soll verfahren werden, wenn sich bestimmte Randbedingungen nicht herstellen lassen (dies kann sich u.U. erst kurz vor dem Messtermin oder

während der Durchführung des Messprogrammes herausstellen. Beispiel: witterungsbedingte Wassertemperatur) ?

speziell bei Reinwassermessungen:

- Welche Beschaffenheit hat das zur Beckenfüllung vorgesehene Wasser ?
- Welche Analysen und Sonderuntersuchungen sind zur Beurteilung der Wasserqualität erforderlich und in welcher Weise werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt ?
- Besteht die Gefahr einer Sekundärverschmutzung der Beckenfüllung durch Algenbildung ?
- Ist die Entsorgung des mit Chemikalien versetzten Wassers gesichert ?

speziell bei Messungen in Belebtschlamm:

- Entspricht der Feststoffgehalt den Garantiebedingungen ?
- Bei instationärer Messung: kann der Abwasser- und Rücklaufschlammzufluss in das zu untersuchende Becken für die Dauer des Messprogrammes unterbrochen werden ?

Auf die Bedeutung einzelner Fragen wird in den nachfolgenden Abschnitten noch näher eingegangen. Die aus der Beantwortung resultierenden Maßnahmen, Vereinbarungen und Konsequenzen sollten allen Beteiligten in schriftlicher Form zur Bewertung vorgelegt werden. Falls erforderlich, ist das Messprogramm zu überarbeiten. Bei sehr aufwändigen Versuchsprogrammen oder schwer überschaubaren örtlichen Verhältnissen sollte eine Vorbesprechung in Verbindung mit einer Anlagenbesichtigung durchgeführt und protokolliert werden. Zwischen dem Besprechungs- und dem Messtermin sollte dann so viel Zeit eingeräumt werden, dass eventuell vereinbarte Maßnahmen noch vollständig realisiert werden können.

4 Durchführung von Sauerstoffzufuhrversuchen

4.1 Anordnung der Messstellen

Bei den Überlegungen zur Anzahl und Anordnung der Messpunkte für den Sauerstoffgehalt sind drei Hauptaspekte zu berücksichtigen:

1. Erwartete bzw. auch beobachtete hydraulische Verhältnisse in dem zu untersuchenden Becken,
2. Möglichkeit zur Überprüfung der korrekten Funktion von Elektroden,
3. Minimierung des finanziellen Risikos, das mit dem Fehlschlag von Messungen verbunden ist.

Auf Grund dieser Kriterien wird man auch in kleineren, annähernd vollaufgemischten Becken mindestens drei Messpunkte vorsehen: Zwei Messpunkte sind notwendig, um die korrekte Funktion der Elektroden durch Vergleich der Messreihen überprüfen zu können; ein dritter Messpunkt ist erforderlich, um den Versuch bei Ausfall einer Elektrode nicht wiederholen zu müssen.

Da das mit einem Fehlschlag verbundene Risiko mit der Beckengröße zunimmt (Chemikalienkosten), wird man sich bei größeren Becken durch eine entsprechend erhöhte Zahl von Messstellen auch gegen den Ausfall mehrerer Elektroden absichern.

Mehr als drei Messpunkte können jedoch auch bei kleinen Becken notwendig sein, wenn auf Grund der Belüfteranordnung bzw. der hydraulischen Verhältnisse Zonen mit unterschiedlichem Sauerstoffeintrag zu erwarten sind. Dabei geht es nicht nur

darum, in jeder Zone eine Messstelle zu positionieren, es sollte darüber hinaus auch möglich sein, die Ausdehnung der Zonen über die Messstellenanordnung zumindest näherungsweise zu erfassen. Die Entscheidung über die "richtige" Anzahl und Anordnung von Messstellen bleibt in solchen Fällen der Erfahrung und dem Einschätzungsvermögen des Messpersonals überlassen. Um den Ermessensspielraum einzuschränken und zumindest grobe Fehler bei der Messstellenanordnung zu vermeiden, sollte für Becken, die auf Grund ihrer Konstruktion klar abgrenzbare Bereiche mit unterschiedlicher Belüfterausstattung aufweisen, die Anordnung von mindestens zwei Messstellen pro Bereich gefordert werden. Bei Belüftungssystemen mit geringer Quervermischung wie z. B. Flächenbelüftungen sollten sicherheitshalber in kleineren Becken mindestens vier, in größeren Becken entsprechend mehr Messstellen über die Grundfläche verteilt vorgesehen werden.

4.2 Zugabe von Chemikalien

Chemikalien werden bei Sauerstoffzufuhrversuchen nach der instationären Methode zur Senkung oder Anhebung des Sauerstoffgehaltes benötigt. Im Falle der Reinwassermessung wird überwiegend Natriumsulfit zur chemischen Bindung des gelösten Sauerstoffs verwendet. Natriumsulfit wird pulverförmig geliefert und es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob eine Vorlösung erfolgen muss oder das Sulfit als Pulver zudosiert werden kann. Nach eigenen Erfahrungen ist eine Dosierung in gelöster Form erforderlich, wenn das zu untersuchende Becken nicht über Mischeinrichtungen (z.B. Rührwerke) verfügt, die unabhängig von der Belüftung betrieben werden können. Vorrangiger Zweck der Vorlösung ist dann, eine gleichmäßige Verteilung des Sulfits über die Wasseroberfläche mit Hilfe von Pumpen und Schläuchen zu ermöglichen. Zusätzlich ist gewährleistet, dass es nicht zum Absetzen und Verbacken des Salzes am Beckenboden kommt. In Becken mit leistungsfähiger Mischeinrichtung haben sich dagegen keine Probleme mit pulverförmiger Dosierung ergeben, wenn die Dosierung ausreichend langsam erfolgte und anschließend über eine Zeit von ca. 10 bis ca. 60 Minuten – je nach Becken und Leistung der Mischaggregate - gemischt wurde.

Über die Anzahl und Position der Dosierstellen bei Trockendosierung ist in jedem Einzelfall auf Grund der vorliegenden Beckenform und der Mischcharakteristik zu entscheiden. Relativ unkritisch sind in dieser Hinsicht kleinere Rundbecken, hier genügt normalerweise eine Dosierstelle. Problematisch sind dagegen größere Umlaufbecken, in denen eine unzureichende Chemikalienverteilung den ohnehin vorhandenen „wellenförmigen“ Verlauf der Sauerstoffganglinie noch erheblich verstärkt bzw. überlagert und u.U. einen Fehlschlag der Messung zur Folge haben kann. Prinzipiell kann diesem Effekt entgegengewirkt werden durch eine große Zahl von Dosierstellen oder eine einzelne Dosierstelle, an der die Dosierzeit so gewählt wird, dass sie ein Vielfaches der Umlaufzeit beträgt.

Im Zusammenhang mit der Natriumsulfitdosierung ist die sogenannte „Vorlaufzeit“ von Bedeutung. Gemeint ist die Zeit, die nach dem Ende der Dosierung bzw. nach dem Einschalten der Belüftungseinrichtung bis zum Anstieg der Sauerstoffkonzentration vergeht. Vorlaufzeiten können notwendig sein, um vollständige Verteilung der Chemikalien oder eine Stabilisierung der hydraulischen Verhältnisse vor Beginn der Messung zu erzielen. Es ist dabei aber zu berücksichtigen, dass eine wesentlich größere Chemikalienmenge benötigt wird (praktisch relevanter Bereich in Abhängigkeit vom Sauerstoffeintrag ca. 200 .. 1000 % der Menge ohne Vorlaufzeit) und dadurch auch der Salzgehalt ebenfalls erheblich zunimmt. Da sich die Größe der

Luftblasen mit zunehmender Salzkonzentration verringert (Abb. 3), werden bei hohen Salzgehalten zu hohe Sauerstoffeintragswerte ermittelt.



Abb. 3a: Blasenbild mit Trinkwasser ohne Salzzugabe



Abb. 3b: Blasenbild bei mit Salz versetztem Trinkwasser

Nach Untersuchungen der ASCE /3/ sowie von Moldt /4/ ist dieser Einfluss auch unterhalb des im ATV-DVWK-Merkblatt genannten Grenzwertes 2 g/l nicht zu vernachlässigen (Abb. 4). Geht man beispielsweise davon aus, dass mit einer 5fachen Überdosierung gearbeitet wird, um eine lange Vorlaufzeit zu erreichen, ergibt sich pro Messung eine Zunahme der Salzkonzentration um ca. 0,6 g/l. Auf der Grundlage der genannten Untersuchungen resultiert daraus eine systematisch bedingte Messwertabweichung von ca. 5% für den ersten und ca. 10% für einen zweiten Versuch. Ohne entsprechende Korrektur sind derartige Abweichungen auch im Hinblick auf die im Merkblatt M-209 genannten Messtoleranzen als nicht akzeptabel zu bezeichnen, zumal die Messtoleranzen zur Abdeckung zufälliger Einflüsse vorgesehen sind. Bei einer künftigen Überarbeitung des Merkblattes sollte der Einfluss der Salzkonzentration durch Angabe einer entsprechenden Korrekturformel differenziert berücksichtigt werden. In der Praxis sollte man grundsätzlich eine sorgfältige Abwägung zwischen Vorlaufzeit und Salzmenge vornehmen oder auf eine Sulfiddosierung ganz verzichten und statt dessen Desorptionmessungen nach Anhebung der Sauerstoffkonzentration durch temporäre Zugabe von Reinsauerstoff durchführen. Entsprechendes gilt auch, wenn in einer Beckenfüllung eine größere Zahl von Versuchen mit „normaler“ Dosierung durchzuführen sind.

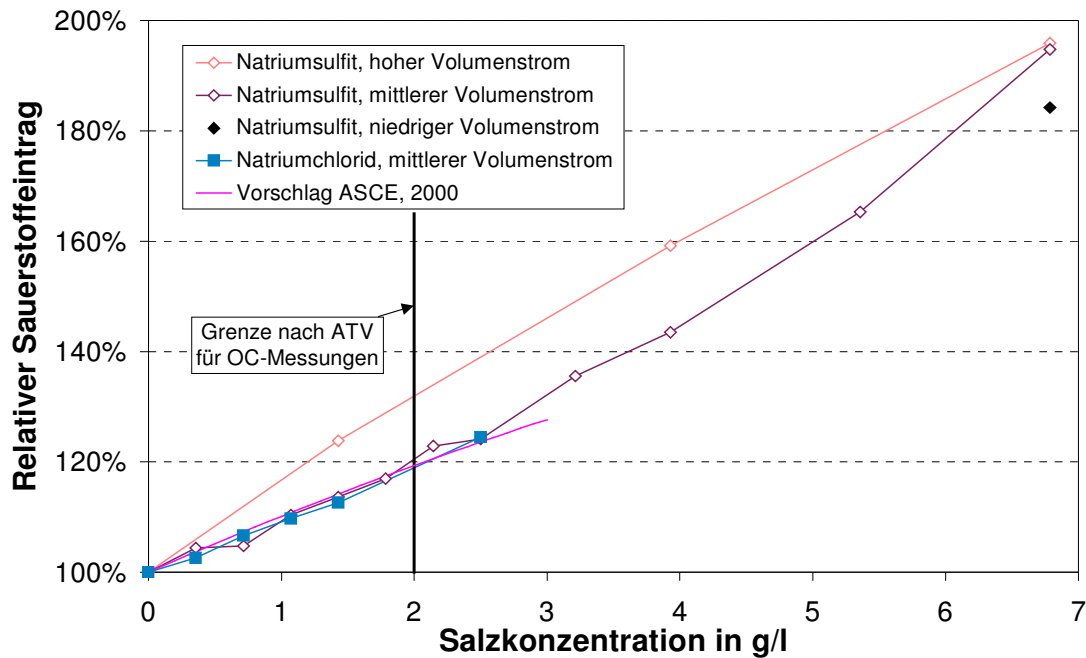


Abb. 4: Einfluss der Salzkonzentration auf den Sauerstoffeintrag /4/

Messungen in Belebtschlamm können ohne Chemikalien nach der Absorptionsmethode durchgeführt werden, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

- es muss möglich sein, die Sauerstoffkonzentration unter Ausnutzung der vorhandenen Zehrung zu senken, ohne dabei eine Entmischung des Schlammes hervorzurufen.
- Bei Betrieb der Belüftung mit der zu untersuchenden Einstellung muss eine Sauerstoffkonzentration von mindestens 5 mg/l - genauer 5 mg/l über dem Wert nach der Absenkung - erreichbar sein.

Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, müssen Desorptionsmessungen durchgeführt werden. Die Anhebung der Sauerstoffkonzentration erfolgt dann üblicherweise durch Zugabe von Wasserstoffperoxid, das durch enzymatische Reaktionen im Belebtschlamm spontan zu Wasser und Sauerstoff zerfällt. Die verschiedentlich befürchtete Beeinträchtigung der Biozönose und eventuell auch des Sauerstoffeintrags durch das Peroxid konnte bei zahlreichen Vergleichsmessungen nicht beobachtet werden, wenn das Peroxid verteilt und langsam zudosiert wurde. In der Praxis haben sich gelochte Rohre, die an mehreren Stellen im Becken installiert und über Schlauchleitungen beschickt werden, zur Verteilung des Peroxids bewährt. Grundsätzlich kann selbstverständlich auch in Belebtschlamm Reinsauerstoff statt Wasserstoffperoxid zur Anhebung der Sauerstoffkonzentration verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Durchführung von Versuchen ohne Chemikalieneinsatz besteht, wenn die Messungen bei geringer Belüftungsintensität durchzuführen sind und die verfügbare Belüftungskapazität erheblich größer ist. Bei dieser (in der Praxis allerdings eher seltenen) Konstellation kann die Sauerstoffkonzentration durch Belüften mit maximaler Leistung angehoben und anschließend bei der geringen Intensität eine Desorptionsmessung durchgeführt werden. Für eine aussagefähige

Messung sollte auch bei dieser Vorgehensweise die absolute Differenz zwischen Anfangs- und Endwert der Sauerstoffganglinie mindestens 5 mg/l betragen. Dies macht wiederum deutlich, dass bei der Entscheidung über die günstigste Vorgehensweise bei Sauerstoffzufuhrversuchen in Belebtschlamm die bei verschiedenen Belüftungseinstellungen erreichbare Sauerstoffkonzentration eine wesentliche Rolle spielt. Da sich diese Werte im Vorfeld nicht sicher bestimmen lassen, wird es in vielen Fällen erforderlich sein, vorsorglich Chemikalien bereitzuhalten und über die konkrete Vorgehensweise erst vor Ort, möglicherweise auch von Messung zu Messung zu entscheiden.

5 Begleitende Messungen

In den meisten Fällen wird neben der Bestimmung der Sauerstoffzufuhr ($\text{kg O}_2 / \text{h}$) auch die Ermittlung des Sauerstoffertrags ($\text{kg O}_2 / \text{kWh}$) und der Sauerstoffausnutzung ($\text{g O}_2 / \text{m}^3 \text{Luft}$) gefordert. Dazu ist es notwendig, im zeitlichen Zusammenhang mit der Zufuhrmessung auch die elektrische Leistungsaufnahme der beteiligten Aggregate und den in das untersuchte Becken eingeleiteten Luftvolumenstrom zu bestimmen. Diese „begleitenden“ Messungen sind auch sinnvoll, wenn sie im Leistungsverzeichnis nicht gefordert werden, da sie wichtige Plausibilitätskontrollen ermöglichen.

5.1 Leistungsaufnahme

Zur Messung der Leistungsaufnahme sollten – wie eingangs erwähnt – vorzugsweise geeichte Zähler verwendet werden. In manchen Fällen ist ein solcher Zähler vorhanden, aber so geschaltet, dass er den Verbrauch der gesamten Kläranlage erfasst. Durch gezieltes Abschalten von Verbrauchern muss dann sichergestellt werden, dass tatsächlich nur die am Versuch beteiligten Aggregate erfasst werden. Bei Zählern, die speziell für die Sauerstoffzufuhrversuche installiert werden, ist dieses normalerweise durch den Ort des Einbaus gewährleistet. Steht kein Zähler zur Verfügung, genügt es nicht, die Stromaufnahme mit einfachen Strommesszangen oder durch Ablesung vorhandener Amperemeter zu ermitteln und mit Schätzwerten für die Spannung und den Phasenwinkel ($\cos \varphi$) die Leistungsaufnahme zu berechnen (leider ist diese Vorgehensweise in der Praxis immer wieder zu beobachten).

Als brauchbare Alternative zum Zähler kann jedoch eine hochwertige Leistungsmesszange, die Strom, Spannung und Phasenwinkel simultan erfasst, verwendet werden. Die Zangenmessung ist auch sinnvoll als Ergänzung, beispielsweise um Messungen für alle Phasen durchzuführen oder kleinere Verbraucher wie Rührwerke separat zu erfassen. Es ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass Leistungsmesszangen nur bei annähernd sinusförmigem Spannungsverlauf korrekte Ergebnisse liefern und daher für Messungen am Ausgang von Frequenzumrichtern nicht unbedingt geeignet sind. Da viele Frequenzumrichter über eine ausreichend genaue Anzeige der abgegebenen Leistung verfügen, besteht in der Praxis allerdings nur selten Bedarf für eine Leistungsmessung an dieser Stelle. Unabhängig von der Art der Messeinrichtung sollten die Messgeräte während eines Sauerstoffzufuhrversuchs mehrmals abgelesen werden, um Ablesefehler bzw. Schwankungen erkennen zu können.

5.2 Luftvolumenstrom

Zur Bestimmung des Luftvolumenstroms ist eine Ablesung von Typenschildangaben am Verdichter auf keinen Fall ausreichend. Vielmehr müssen alle relevanten Betriebsparameter des Verdichters während eines Versuchs wiederholt gemessen werden. Relevante Betriebsparameter sind:

- die Drehzahl des Verdichters (und eventuell auch des Antriebsmotors)
- die Temperatur und relative Feuchte der angesaugten Luft
- der atmosphärische Luftdruck
- der Überdruck am Verdichterausgang
- die Druckdifferenz am Ansaugfilter

Um weitere Plausibilitätskontrollen durchführen zu können, ist auch eine Messung der Lufttemperatur am Verdichterausgang in Betracht zu ziehen.

An Hand dieser Messdaten läßt sich der tatsächlich geförderte Luftvolumenstrom dann aus der Verdichterkennlinie oder den der Kennlinie zu Grunde liegenden Formeln mit einer Toleranz von ca. 5 % ermitteln.

Wie die Leistungsaufnahme muss auch der Luftvolumenstrom dem untersuchten Becken eindeutig zuzuordnen sein. Werden mehrere Becken über eine gemeinsame Luftleitung versorgt, ist diese Voraussetzung nicht von vornherein erfüllt und es sind Maßnahmen zu ergreifen, die die eindeutige Zuordnung erlauben (Abschiebern benachbarter Becken). Oft ergibt sich dabei das Folgeproblem, dass Verdichter für die Versorgung mehrerer Becken ausgelegt sind und in ihrer Förderleistung nicht so weit gedrosselt werden können, dass sie die vergleichsweise geringe Menge, die auf das Versuchsbecken entfällt, tatsächlich liefern. In derartigen Situationen ist in Betracht zu ziehen, die Sauerstoffzufuhrversuche parallel auch in benachbarten Becken oder Beckenteilen durchzuführen und die Sauerstoffzufuhr „summarisch“ zu bestimmen. Die Annahme, dass sich die Luft auf mehrere Becken bei gleichen Einblastiefen anteilig entsprechend der jeweiligen Belüfterzahl verteilt, hat sich bei mehreren Überprüfungen als nicht haltbar erwiesen.

Prinzipiell besteht eine weitere Möglichkeit darin, den (anteiligen) Luftvolumenstrom in der Zweigleitung zum Versuchsbecken mit Hilfe von Anemometern, Vortex-Sonden o. ä. zu messen. Der Einsatz dieser Messgeräte ist jedoch nur möglich, wenn im Bereich der Messstelle ausreichend lange, gerade Ein- und Auslaufstrecken vorhanden sind und eine drallfreie Luftströmung vorliegt. Bleiben diese Kriterien unberücksichtigt, ist das Ergebnis eher zufällig und im Rahmen einer Sauerstoffzufuhrmessung völlig unbrauchbar. Nach eigenen Messungen und Auswertungen ist es darüber hinaus nicht ausreichend, die Sonde nur in Rohrmitte zu positionieren, sondern es muss eine vollständige Erfassung des Strömungsprofils (wie z.B. in der VDI/VDE-Richtlinie 2640, Blatt 3 beschrieben) vorgenommen werden.

5.3 Sauerstoff-Sättigungswert

Im ATV-DVWK-Merkblatt wird nahegelegt, zur Berechnung des Sauerstoffeintrags tabellierte Sättigungswerte (nach EN 25814) zu verwenden. Zur Berechnung der Übersättigung, die sich auf Grund des hydrostatischen Drucks bei Druckbelüftungen einstellt, dient die von Oldshue /5/ angegebene Gleichung:

$$C_{s,T} = C_{ss,T} \cdot \left(1 + \frac{h_E}{20,7} \right)$$

Diese Gleichung besagt, dass der Druck bei halber Einblastiefe als maßgebend angesehen wird.

Für "Becken mit größeren Einblastiefen" wird empfohlen, die Übersättigung zu messen. Die Festlegung, ob es sich im konkreten Fall um ein Becken mit größerer Einblastiefe handelt, bleibt demnach den Ausführenden überlassen. Darüber hinaus besteht im Zusammenhang mit diesen Empfehlungen das Problem, dass die genannte Formel tendenziell zu hohe Sättigungswerte liefert. Daraus resultiert, dass die Berechnung auf der Grundlage der Oldshue-Gleichung bei instationären Messungen einen zu hohen, bei Messungen nach der Abluftmethode jedoch einen zu geringen Sauerstoffeintrag ergibt. Im Hinblick auf dieses Problem ist zu empfehlen, die Übersättigung bereits bei Einblastiefen > 5 m zu messen. Ein dazu geeignetes Verfahren wird im Merkblatt M-209 beschrieben.

5.4 Schlammrockensubstanz

Nach verschiedenen Untersuchungen /4,6/ wird der Sauerstoffeintrag durch die Schlammrockensubstanz erheblich beeinflusst (Abb. 5). Bei Messungen in Belebtschlamm sollte daher angestrebt werden, die Schlammrockensubstanz so einzustellen, dass sie dem Garantie- oder Auslegungswert entspricht. Zur Kontrolle muss die Schlammrockensubstanz bestimmt werden. Für den Fall von Differenzen zwischen Soll- und Istwert sollte vorher vereinbart werden, ob und in welcher Weise Umrechnungen zulässig sind.

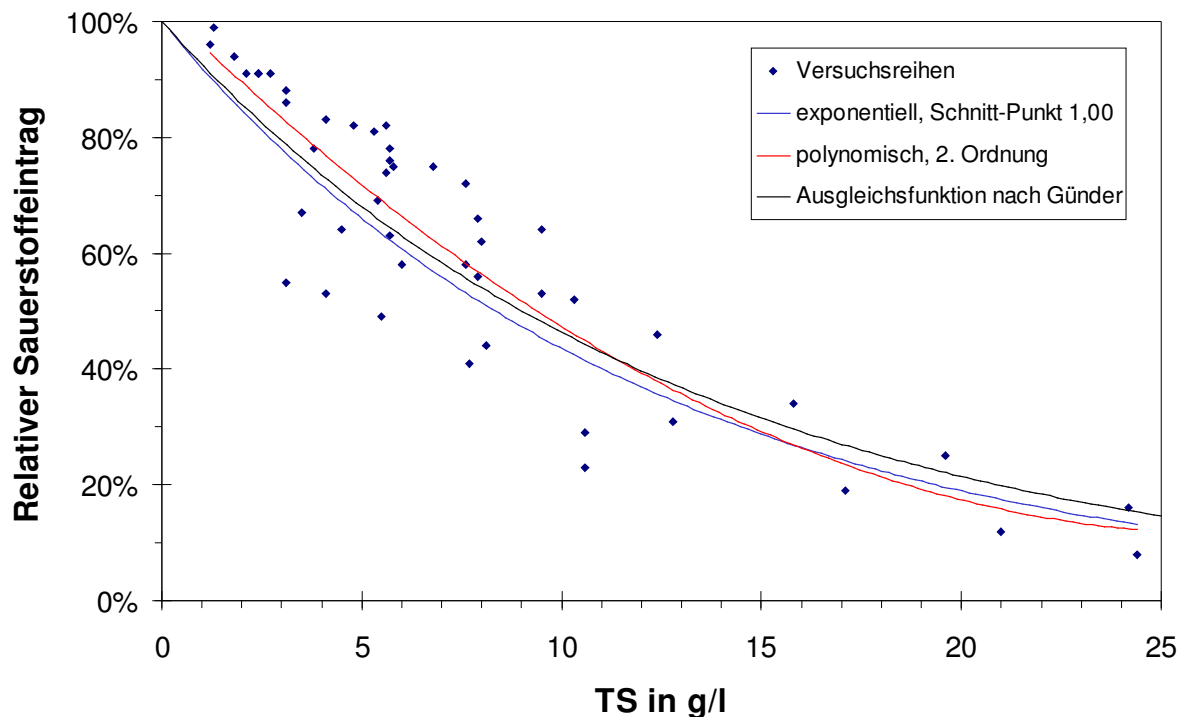


Abb. 5: Einfluss der Schlammrockensubstanz auf den Sauerstoffeintrag /4,6/

5.5 Sauerstoffzehrung

Instationäre Sauerstoffzufuhrversuche in Belebtschlamm setzen voraus, dass die Sauerstoffzehrung während der Messung konstant ist. Da sich gravierende Fehler ergeben können, wenn diese Voraussetzung nicht hinreichend erfüllt ist, werden die Messungen nach Möglichkeit ohne Abwasserzufluss durchgeführt. Schwankungen

durch Veränderungen der Abwassermenge und Abwasserzusammensetzung lassen sich auf diese Weise verhindern, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich durch die Unterbrechung des Zulaufs der Grenzflächenfaktor α erheblich verändern kann. Die Unterbrechungszeit sollte daher das notwendige Maß nicht wesentlich überschreiten. Unterbrechungszeiten von 12 h und mehr erscheinen auf jeden Fall zu lang. Um das notwendige Maß zu finden und eventuelle Zehrungsänderungen während der Messungen erkennen zu können, ist eine ständige Kontrolle der Sauerstoffzehrung erforderlich. Zu diesem Zweck hat sich ein kleines, luftdicht verschließbares Messgefäß (ca. 0,5 .. 1 l Inhalt) mit Röhreinrichtung und kalibrierter Sauerstoffelektrode bewährt. Zur Bestimmung der Zehrung wird eine Schlammprobe aus dem Belebungsbecken entnommen und in das Messgefäß gefüllt; anschließend wird bei ständiger Bewegung durch die Röhreinrichtung die Abnahme des Sauerstoffgehaltes über die Zeit aufgezeichnet und ausgewertet. Diese Messung ist häufig zu wiederholen. Darüber hinaus sollten alle weiteren Möglichkeiten zur Zehrungsbestimmung, also beispielsweise Phasen zur Absenkung des Sauerstoffgehaltes vor Absorptionsmessungen, genutzt werden.

In der Praxis wird man fast immer feststellen, dass sich eine völlig konstante Zehrung auch durch Unterbrechen des Zulaufs nicht erreichen lässt. Typisch ist im Verlauf der Messungen eine leichte und stetige Abnahme der Zehrung, bedingt durch den fortschreitenden Abbau. In einer solchen Situation ergibt die Absorptionsmessung einen zu geringen, die Desorptionsmessung dagegen einen um den gleichen Betrag zu hohen Sauerstoffeintrag. Es liegt nahe, den Fehler zu kompensieren, indem bei gleicher Betriebseinstellung abwechselnd Absorptions- und Desorptionsmessungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt werden. Eine vollständige Kompensation ist allerdings nur möglich, wenn die Änderung der Zehrung während der Dauer dieser Doppelmessung konstant ist.

6 Auswertung

Grundsätzlich sollte jeder Sauerstoffzufuhrversuch unmittelbar nach seinem Abschluss ausgewertet werden, da nur so die Möglichkeit besteht, das Ergebnis noch vor Ort mit den Beteiligten zu besprechen sowie auf Fehler oder Störungen im Versuchsverlauf zu reagieren und Abhilfemaßnahmen für nachfolgende Messungen zu ergreifen bzw. über eine eventuell notwendige Wiederholung der Messung zu entscheiden. Besser ist eine versuchsbegleitende Auswertung, da sie durch ständig aktualisierte Informationen eine noch weiter gehende Kontrolle des Versuchs ermöglicht.

Als objektives Auswertverfahren kommt nur die numerische Auswertung auf der Grundlage einer nichtlinearen Regression in Betracht. Um auch bei kurzzeitig auftretenden periodischen oder zufälligen Schwankungen in den Konzentrationsganglinien eine zuverlässige Auswertung durchführen zu können, sollten einer professionellen Auswertung mindestens 100 Messwerte pro Versuch und Elektrode zugrunde gelegt werden. *Zum Vergleich: wir erfassen bei Messungen üblicherweise mit einem Messtakt von 6 Sekunden 400 bis 1000 Messwerte pro Versuch und Elektrode.*

Die Ergebnisse der "begleitenden Messungen" sollten in der Vor-Ort-Auswertung bereits berücksichtigt werden, um die wichtigsten Plausibilitätskontrollen vornehmen zu können.

Im Rahmen der Auswertung ist die Ganglinie der Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werte (Residuen) das wichtigste Hilfsmittel zur Überprüfung der Messreihen; dieser Bedeutung entsprechend sollte sie auch in der Dokumentation in übersichtlicher, leicht lesbarer grafischer Form dargestellt werden.

Bei einem fehlerfreien Versuch in einem nahezu vordurchmischten Becken weisen die Residuen kleine Absolutbeträge sowie eine zufällige Verteilung um die Nulllinie auf (Abb. 6).

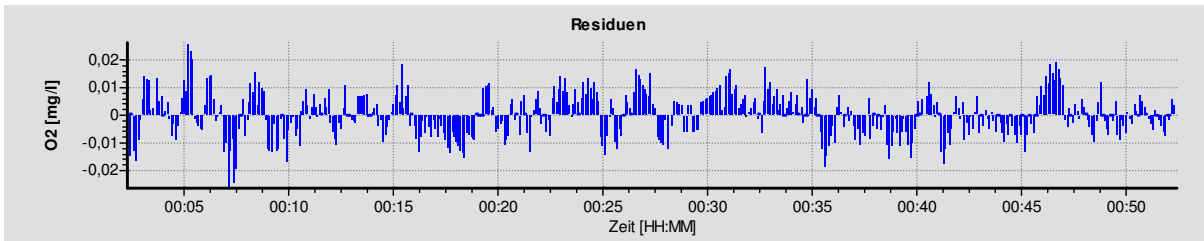


Abb. 6: Fehlerfreie Messreihe

Zeigt sich dagegen eine im Vergleich zur Versuchszeit "langwellige" Schwingung, ist dies ein Hinweis auf Fehler oder Probleme bei der Versuchsdurchführung. Es sollte dann durch gezieltes Entfernen von Anfangs- und Endwerten zunächst versucht werden, einen schwingungsfreien Residuenverlauf zu erreichen und gleichzeitig auch die Fehlerursache zu finden. Verschwindet die Schwingung nach Entfernen einiger Anfangswerte, waren häufig die Chemikalien am (willkürlich festgelegten) Beginn der Messung noch nicht ausreichend verteilt. Entsprechend sollte bei nachfolgenden Messungen die Mischzeit verlängert werden und auch eine gleichmäßigere Verteilung bereits bei der Zugabe der Chemikalien angestrebt werden. Ein sehr ähnlicher Effekt ergibt sich, wenn die hydraulischen Verhältnisse zu Beginn des Versuchs noch nicht ausreichend stabil waren. In solchen Fällen muss die Vorlaufzeit verlängert oder eine Dosierung bei laufender Belüftung in Betracht gezogen werden. Bei Messungen in Belebtschlamm führt eine Veränderung der Sauerstoffzehrung in der Regel ebenfalls zu einer Schwingung im Residuenverlauf; oft sind jedoch eher die Endwerte der Messreihe betroffen. Abbildung 7 zeigt zur Veranschaulichung ein extremes Beispiel; ein derartiger Versuch ist auf jeden Fall als nicht sinnvoll auswertbar zu bezeichnen.

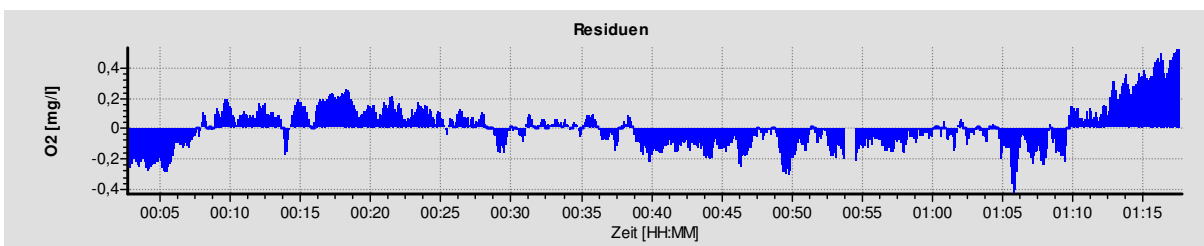


Abb. 7: Residuenganglinie bei erheblicher Veränderung der Sauerstoffzehrung

Grundsätzlich sollte man bei der Elimination von Messwerten stets die im Merkblatt M-209 aufgeführten Kriterien beachten und sich dessen bewusst sein, dass es ausschließlich darum geht, die Qualität einer Messreihe zu überprüfen und eventuell den Einfluss von Fehlern mit begrenzter Dauer zu verringern. Liegt ein Fehlereinfluss von längerer Dauer vor und läßt sich dementsprechend keine Verbesserung durch Elimination einiger Werte erzielen, ist die betreffende Messung zu verwerfen. Es ist auch zu berücksichtigen, dass sich nicht alle Fehler und Probleme einer Sauerstoffzufuhrmessung im Residuenverlauf zeigen.

Literatur:

- /1/ ATV-Merkblatt M 209: „Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm“. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef (1996)
- /2/ ASCE-Standard: "Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water", Second Edition.
American Society of Civil Engineers,
345 East 47th Street, New York,
N.Y. 10017-2300, USA (1992).
- /3/ ASCE: Entwurf zum ASCE-Standard "Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water" (2000)
- /4/ Moldt, C.: „Bestimmung des Grenzflächenfaktors α bei Belebtschlämmen unterschiedlichen Trockensubstanzgehaltes in einer Versuchsanlage“. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Ver- und Entsorgungstechnik (2001)
- /5/ Oldshue, J.Y.: "Aeration of Biological Systems Using Mixing Impellers“. Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. 1 Proceedings of the 1. Conference Manhattan College (1955)
- /6/ Günder, B.: „Rheologische Eigenschaften von belebten Schlämmen und deren Einfluß auf die Sauerstoffzufuhr“. Korrespondenz Abwasser Heft 12 (1999)

Verfasser:

Dipl.-Ing. G. Fröse
c/o Ingenieurbüro Fröse & Olderdissen
Friedrich-Seele-Str. 1b
D-38122 Braunschweig
Tel. +49 531 501839
Fax +49 531 502208
E-Mail: gf@ibfo.de