

**Zeitschrift:** Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft  
**Herausgeber:** St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft  
**Band:** 87 (1994)

**Artikel:** Entwicklung langzeitstabiler chemisch-physikalischer und optoelektronischer Sensor-Systeme zur Steuerung der Kohlenstoff- und Stickstoff-Elimination in Abwasserreinigungsanlagen  
**Autor:** Krause, Jörg / Züllig, Hans  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-832725>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 28.10.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Entwicklung langzeitstabiler chemisch-physikalischer und optoelektronischer Sensor-Systeme zur Steuerung der Kohlenstoff- und Stickstoff-Elimination in Abwasserreinigungsanlagen

Jörg Krause und Hans Züllig

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	249
2. Angepasste Mess- und Regelsonden. ....	250
3. Kombinierte Regelung der Kohlen- stoff- und Stickstoffelimination ...	255
Literaturverzeichnis .....	257

## 1. Einleitung

Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorelimination gehören heute zu den Hauptaufgaben der Abwasserreinigung. Bei der biologischen Reinigung, bei welcher durch Belüftung des vorgeklärten Abwassers vorhandene organische Stoffe entfernt werden, treten biochemische Abbauprozesse ein, die aus der Natur bereits bekannt sind. Dabei wandeln Mikroorganismen (Bakterien, Abwasserpilze, Protozoen) in biologischen Assimilationsprozessen *gelöste* Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen, die sie dem vorgeklärten Abwasser *zum Aufbau eigener Zellsubstanz* entziehen, in *«lebte Flocken»* um und bilden den sogenannten *Belebtschlamm*.

Für diese biochemische Verfahrenstechnik sind zur Elimination Becken und Belüftungseinrichtungen erforderlich. Mess- und Regeleinrichtungen werden benötigt, um zwischen dem sauerstoffverbrauchenden Belebtschlamm und gezieltem Lufteintrag ein Regelband zu programmieren, das den Mikroorganismen eine optimale Assimilationstätigkeit erlaubt und es dem Klärwerksbetreiber ermöglicht, mit dem Energieverbrauch einer Kläranlage hausälterisch umzugehen.

## 2. Angepasste Mess- und Regelsonden

Sauerstoff-Sonden werden zur Messung des gelösten Sauerstoffes im Belüftungsbecken, Redox-Sonden zur Messung der Redoxspannung im biochemischen System benötigt. Die dabei produzierte Biomasse wie auch die im Ablauf noch auftretende Feintrübung von organischen, suspendierten Teilchen kann mit einem *opto-elektronischen* Sensorsystem ermittelt werden.

An solche Sonden werden *spezifische Anforderungen* gestellt.

Jahrelange Betriebserfahrungen zeigen, dass der *kontinuierliche Betrieb* biologischer Reinigungsanlagen von Sonden oder Messfühlern *hohe Zuverlässigkeit* und *Verfügbarkeit*, *Langzeitstabilität* und *Robustheit* im rauen Feldbetrieb verlangten.

Zwar bietet die Industrie zahlreiche Sonden für den Laborbetrieb an, indessen handelt es sich bei diesen zwar um genauere und entsprechend empfindlichere Sonden, die jedoch kurzzeitig eine Nachkalibration erfordern. Für Kläranlagen benötigte Messfühler, sogenannte Prozess-Sonden, dürfen in der Regel weniger präzise, müssen dafür robuster gestaltet sein.

Ferner zeigt sich, dass beim kontinuierlichen Betrieb *messaktive Sonden* von *biologischen Pilz- und Algenrasen* oder gallertartigen Massenkulturen von *Infusorien*, z.B. Vorticella, überzogen werden, die zum totalen Verschluss des unteren Fühlerendes führen und die Messwerte zusammenbrechen lassen.

Während für *Laborsensoren*, deren Messelemente z.B. für die Sauerstoffmessung durch eine sauerstoffdurchlässige, störende anorganische und organische Stoffe jedoch fernhaltende *Membran* vom *Mess-Medium abgetrennt sind* und kurz- bis mittelfristig nachkalibriert werden müssen, sind für nullpunktstabile Sonden *Selbstreinigungseinrichtungen erforderlich*, mit deren Hilfe die Elektroden *oberflächlich kontinuierlich geschliffen* oder ge-

wischt werden (siehe Abb. 1). Das Auswechseln solcher Reinigungseinrichtungen alle 1–2, im Extremfall alle 3–4 Jahre, hat jeweils nur eine kurze Unterbrechung in der kontinuierlichen Messwerterfassung z.B. in einem Belüftungsbecken zur Folge.

Bisher war es nicht möglich, robuste, *schleifbare* und zugleich einen raschen Gas-Austausch ermöglichende Membranen anzuwenden, die gleichzeitig störende Stoffe fernhalten.

Deshalb wurden sogenannte *«offene» Elektroden* entwickelt, bei denen *schleifbare* Metalle direkt mit dem Messmedium in Verbindung gebracht werden und meistens direkt ins Becken tauchen.

### 2.1 Die selbstreinigende Sauerstoffsonde mit offenen Elektroden

Zwei verschieden edle Metalle, z.B. Gold oder Silber und Eisen, tauchen in das Messgut ein. Gelöster Sauerstoff reagiert physikalisch-chemisch an den Elektroden und bewirkt einen sauerstoffabhängigen Stromfluss. Dabei fließt nach folgenden chemischen Reaktionen ein Strom, der am negativen Pol Sauerstoff reduziert und am positiven ein Metall oxydiert.



Abb. 1: Belegung von Sonden mit gallertartigen Massenkulturen von Rädertierchen

rechts: Verstopfte Membran des messaktiven Fühlerteils ohne mechanische Reinigung

links: Offene Elektroden mit reinigendem Schleifstein

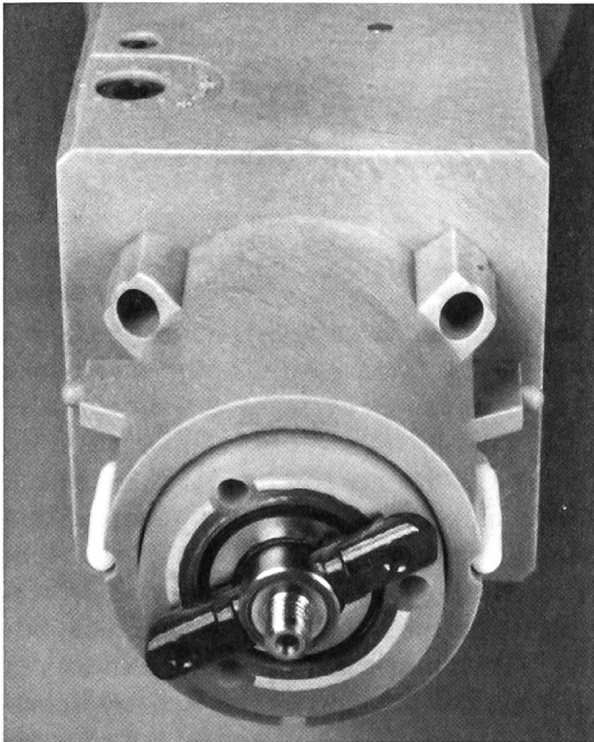
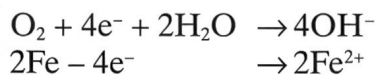


Abb. 2: Züllig Sauerstoffsonde S12 mit Selbstreinigung der Stirnseite des Elektrodenkopfes



Es entstehen Elektrolyseprodukte an den Elektroden, die mit der Belegung durch Schmutz, biologischen Rasen und Gallerten von einem motorisch angetriebenen Schleifstein kontinuierlich hauchdünn abgeschliffen werden. Als Schleifstein dient eine von Diamantsplittern besetzte «Feile». Dabei wird die messaktive Oberfläche der edleren und konzentrisch angeordneten Elektrode während des Schleifens geometrisch nicht verändert und deshalb der Nullpunkt stabil gehalten, sofern nicht z. B. störende Schwermetalle oder spezielle organische Stoffe dem Messmedium beigelegt sind (Abb. 2). Der Elektrodenkörper befindet sich in einem sich vertikal verschiebenden Pumpbecher, wodurch eine kontinuierliche Probenerneuerung und ein Schutz der Elektroden gegen aufsteigende Blasen gewährleistet ist. Es ist auch keine externe Anströmung erforderlich.

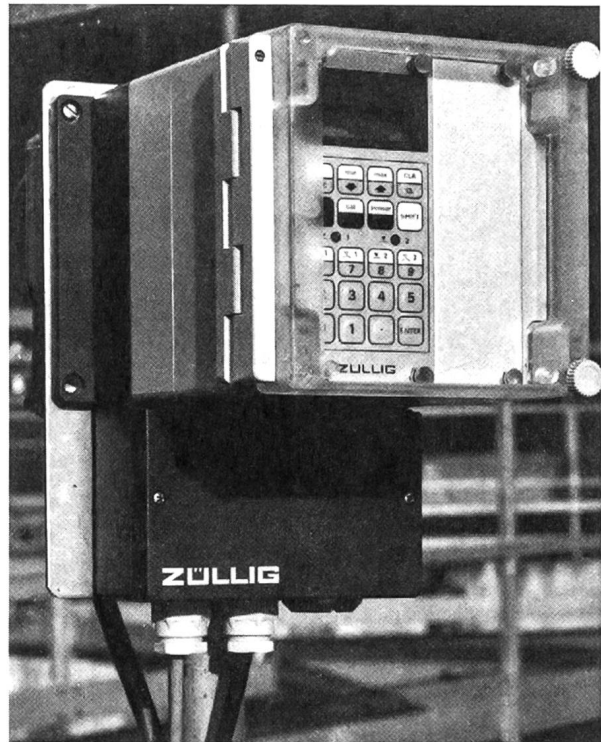


Abb. 3: Züllig Sauerstoffmessverstärker in Vorortmontage

Die eingangs erwähnte Polarisierung der Kathode erfolgt lediglich durch die sich ausbildenden Potentiale gegenüber der Anode. Dieses Potential ist jedoch nicht unbedingt definiert und unterliegt diversen Einflüssen, so dass unter Umständen das Sauerstoffsignal *quergestört* wird. *In der Regel* liegen die in Frage kommenden *Störparameter* in Oberflächenwässern und Belebtschlammanlagen *unter* den für offene Sauerstoffelektroden festgestellten *Störkonzentrationen*. Jedoch wird die Nachfrage nach einer zuverlässigen und wartungsarmen Sauerstoffmessung auch für andere als die obengenannten klassischen Bereiche immer grösser. Dies sind Einsätze z. B. bei Industriekläranlagen, bei chemisch-technischen Prozessen sowie für  $\text{O}_2$ -Konzentrationen nahe 0 ppm. Gerade hier kann der Einfluss von störenden Substanzen nicht immer ausgeschlossen werden. Um etwaige Störungen zu unterdrücken, wird nun in einem *neuen Konzept* die *Polarisierung von aussen erzwungen*.

Dabei benutzt man eine *Dreielektrodenanordnung*, die, wie in der Elektrochemie üblich, aus Arbeits-, Gegen- und Bezugselektrode besteht und potentiostatisch betrieben wird. Dadurch lassen sich beliebige Polarisierungsspannungen definiert einstellen und somit Quereinflüsse minimieren, Linearitäten verbessern und Nullpunkte stabilisieren. Dieses System gestattet ferner, neben Gold oder Silber auch andere Elektrodenmaterialien für die Arbeitselektrode einzusetzen. Dies könnten Edelmetalle, Stähle, Graphitwerkstoffe, Glaskohlenstoffe oder leitfähige Polymere sein. Auch bei der Gegenelektrode sind andere Werkstoffe als die bisherigen (Eisen/Zink) möglich, wobei bevorzugt chemisch resistente, wie Edelstähle, Edelmetalle oder Glaskohlenstoff zum Einsatz kommen.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich um eine offene, also nicht membranbedeckte Sonde handelt, kommen herkömmliche Bezugselektrodensysteme wie z.B. bei der pH- und Redoxmessung nicht in Frage. Hier wird ein *völlig neuer Weg* eingeschlagen. Dabei wird auf das Mischpotential eingewirkt, das sich an einer Metallelektrode (z.B. aus Eisen) ausbildet. Um z.B. eine *Eisenelektrode* als *Bezugselektrode* für potentiostatische Messanordnungen zu nutzen, muss ihr Potential unabhängig vom Sauerstoffgehalt der Lösung und von Begleitstoffen sein. Dies erreicht man durch Vorgabe eines anodischen Stromes, der über die Bezugselektrode fließt und den kathodischen Teilstrom bei der Mischpotentialbildung unterdrückt. Durch eine geringe Strombelastung lässt sich die Sauerstoffabhängigkeit einer solchen stromdurchflossenen Bezugselektrode auf ein Minimum reduzieren. Darüberhinaus zeigt das Potential nur geringe Empfindlichkeit gegenüber allfälligen Begleitstoffen im Belüftungsbecken, insbesondere Sulfid, Eisen und Tenside. Diese gute Potentialkonstanz gewährleistet eine potentiostatische Arbeitsweise einer offenen Dreielektroden-Anordnung.

Der Stromausgang der Sonde wird in einem Messverstärker (Abb. 3) verarbeitet und digital angezeigt. Über ein Bedienungsdisplay kann die Einpunktkalibrierung vorgenommen werden.

## 2.2 Eine angepasste Redox-Sonde zur Regelung der Stickstoffelimination

Die Redoxspannung ist allgemein ein Maß für die <Oxidations- bzw. <Reduktionskraft> eines Messgutes (Abb. 4). Die Bestimmung der Redoxspannung erfolgt durch potentiometrische Messung. Eine Redoxelektrode besteht aus einem edlen Metall, Platin oder Gold, das sich mit dem Messgut chemisch nicht umsetzt, sowie einem internen Referenzsystem, z.B. Silber/Silberchlorid/Kaliumchlorid in einem Polymerelektrolyten. Das sich zwischen der Platin- und der Referenzelektrode aufbauende Redoxpotential lässt sich hochohmig erfassen und wird direkt nach der Elektrode vorverstärkt, wodurch sich die Signale *unbeeinflusst von Störspannungen* über viele Meter bis zum nächsten Messverstärker übertragen lassen.

Eine Redoxspannung kann sowohl durch anorganische als auch durch biochemische Systeme erzeugt werden. Die *Vorgänge* bei der *Nitrifikation* und *Denitrifikation zur Stickstoffelimination* sind gera-

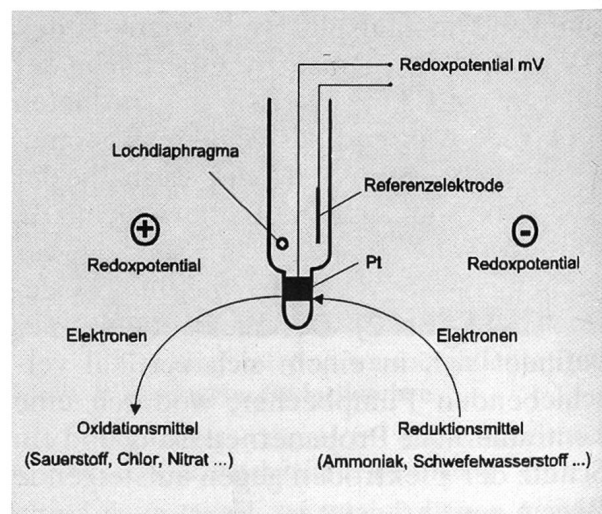


Abb. 4: Funktionsweise der Redoxelektrode



Abb. 5: Redox-Sonde, System Züllig mit Einstabelelektrode und integriertem Vorverstärker



Abb. 6: Art des Einsatzes von Redox- und Sauerstoffsonde in einem Belüftungsbecken

dezu klassische Beispiele von biochemischen Redoxsystemen, siehe Kapitel 3.

Die *Denitrifikation* läuft bei Abwesenheit von *freiem Sauerstoff* ab, wobei der im Nitrat gebundene Sauerstoff von Mikroorganismen veratmet und das *Nitrat* entsprechend abgebaut wird. Dabei lässt sich die Reduktion des Nitrats mit Hilfe einer Redox-Sonde verfolgen, um so den Prozess optimal zu steuern.

### 2.3 Die kombinierte optoelektronische Trübungs- und Feststoffsonde <COSMOS>.

Das von Züllig in Zusammenarbeit mit der AFIF (AFIF Technopark, Zürich) entwickelte Verfahren zur Messung von Feststoffgehalten in flüssigen Medien mit einer *einzig* Sonde ermöglicht die Erfassung von geringsten Trübungen in klarem Trinkwasser, ebenso wie die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes in dickem biologischem Schlamm.

Dabei kommt ein patentiertes Mehrstrahl-Wechsellichtverfahren zur Anwendung, welches in zwei Funktionsarten (je eines für Trübungs- und Feststoffmessung) betrieben werden kann. Als Lichtquellen werden dazu spezielle Leuchtdioden verwendet, die gepulstes Infrarotlicht erzeugen. Für beide Betriebsarten wurden dieselben Quellen verwendet. Neben den beiden Sendedioden sind vier Empfangsdioden vorhanden. Alle sechs optoelektronischen Elemente sind hinter Saphirfenstern positioniert und liegen in einer ebenen Fläche.

Die *Trübungsmessung* Abb. 7a erfolgt durch eine 90° Streulichtmessung. Zur erhöhten Mess-Sicherheit wird auf 2 Kanälen gemessen, welche im Wechsel aktiv sind. Die jeweils auf dem Bild dunkel erkennbaren Strahlen entsprechen dem aktiven Messkreis, die in geschwächtem Schwarz gehaltenen Strahlengänge dem inaktiven.

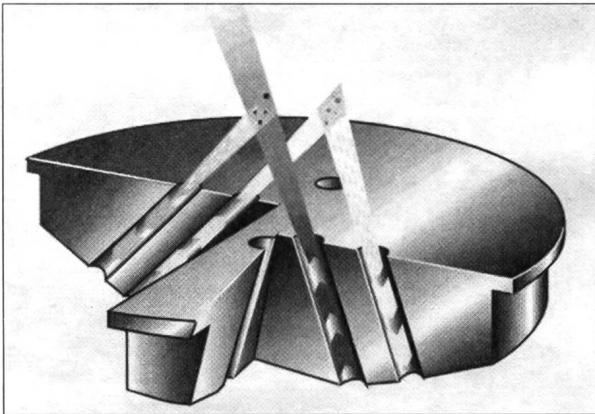


Abb. 7a: Schema der Strahlengänge:  
Trübungsmessung

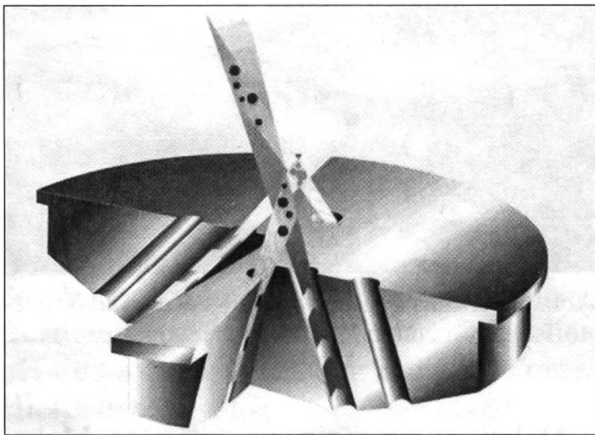


Abb. 7b: Schema der Strahlengänge:  
Feststoffmessung

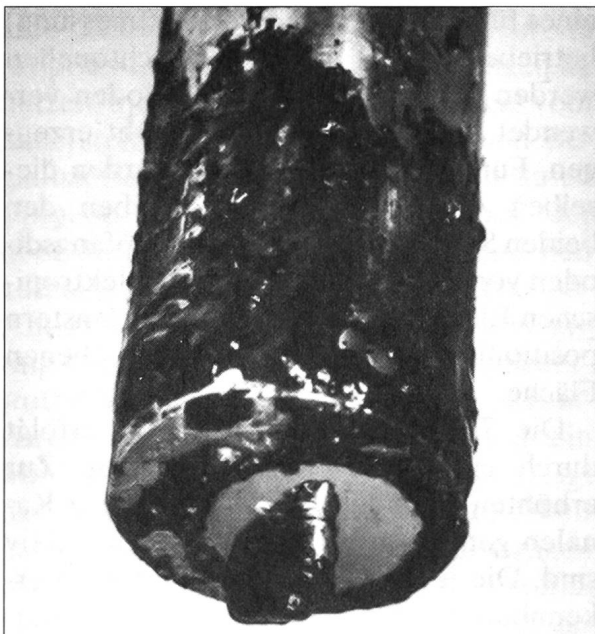


Abb. 8: Optoelektronische Trübungs- und Feststoffmesssonde mit diskontinuierlichem Wischmechanismus der Sensoroptik

Die jeweils innen liegenden Strahlen entsprechen dem Sender, die äusseren dem Empfänger. Die Impulse wurden auf der Grafik mit unterbrochenen Pfeilen dargestellt.

Im Verlaufe des Sendestrahl werden die im Messgut vorhandenen Trübungspartikel zur Emission von Streulicht angeregt. Nur das Licht, welches in Richtung des Empfangskanals abstrahlt, wird detektiert. Dabei ist das Messsignal um so grösser, je mehr streuende Teilchen vorhanden sind. Die Ausgangsintensität der Sendeelemente wird von der Sondenelektronik erfasst und in die Berechnung miteinbezogen. So werden Alterungseffekte und Temperaturabhängigkeit kompensiert.

Die *Feststoffmessung* (Abb. 7b) erfolgt durch Absorptionsmessung, also prinzipiell durch einen anderen Betriebsmodus als bei der Trübungsmessung. Es werden zwar auch hier im Verlauf des Strahlengangs der Sendediode die vorhandenen Partikel vom Licht getroffen, jedoch führt die hohe Konzentration in erster Linie zu einer Lichtschwächung (Absorption) im Verlauf des Strahles. Beobachtet man nun den Strahl an zwei verschiedenen Stellen, misst man einen um so grösseren Intensitätsunterschied, je höher die Absorption, also die Konzentration ist.

Sind z.B. sehr wenige Partikel vorhanden, wird der Strahl kaum geschwächt, und die erfasste Intensität an beiden Orten ist nahezu gleich. Die Differenz ist somit praktisch null, die Konzentration ebenfalls praktisch null. Sind viele Partikel vorhanden, hat man eine grosse Intensitätsabnahme, d.h. die Intensitäten an beiden Beobachtungspunkten sind unterschiedlich. Der nähere Punkt «leuchtet» dabei intensiver als der weiter entfernte. Somit ist die Differenz der beiden Messwerte gross, was auf eine hohe Konzentration schliessen lässt.

Während bei der Trübung der Strahl quasi von vorn betrachtet wird, erfolgt die Beobachtung bei der Feststoffmessung

von beiden Seiten. Jede Messung besteht aus zwei Messzyklen, wobei im zweiten Messzyklus nur auf die zweite Sendediode umgeschaltet wird. Durch optimierte Anordnung der optischen Elemente können die selben Empfangsdioden verwendet werden. Dabei ist die vorher näherliegende Empfangsdiode im zweiten Messzyklus die entferntere und umgekehrt. Das bedeutet, dass im Verlauf eines ganzen Messzyklus jedes Fenster immer zweimal durchstrahlt wird und somit allfällige Verschmutzungen und Temperaturabhängigkeiten kompensiert und Alterungseffekte erfasst werden. Trotzdem ist die zylindrische Sonde stirnseitig mit einem rotierenden Wischer bestückbar zur Reinigung der Sensoroptik und zur Elimination von groben Verunreinigungen, die den Strahlengang behindern könnten.

Die Signale werden in einem *Messverstärker*, mit modernster Rechnertechnologie und Messwertdisplay, verarbeitet. Die Bedienung erfolgt menügeführt über ein alphanumerisches Display mit Hilfe von nur 6 Tasten.

Die elektronische Messeinheit enthält 4 vor Ort programmierbare Kurven, welche es erlauben, den experimentellen Zusammenhang zwischen gemessenen Werten einerseits und Feststoffgehalt andererseits über den gesamten Messbereich linear anzuzeigen oder als elektrische Größen auszugeben. Die Anzeige erfolgt im Trübungsbereich in FTU oder gleichwertigen Einheiten, z.B. FNU, bei Feststoff in g/l, % oder ppm Trockensubstanz.

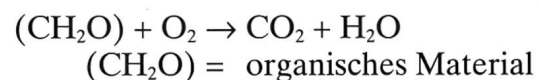
Der Sensor wird sowohl als *Prozesssonde* für feste oder pendelnde Wandmontage sowie als tragbares *Messgerät* für Kontrollzwecke gebaut und kann der Trübungsüberwachung von Quellzuläufen, Filteranlagen, zur Überwachung von Kläranlagen, Zu- und Abläufen (rund um die Uhr) dienen und zur Optimierung der Biologiestufe und des Einsatzes bei der Schlammbehandlung beitragen.

### 3. Kombinierte Regelung der Kohlenstoff- und Stickstoffelimination

Der Lufteintrag in ein Belüftungsbecken zwecks *Kohlenstoffabbau* erfolgt abhängig vom Sauerstoffgehalt, der mit der *Sauerstoffsonde* kontinuierlich gemessen wird. Im Bereich von 1,5–2 mg O<sub>2</sub>/l werden Lufteintragseinrichtungen (Gebläse, Turbinen) oft gestaffelt zu- oder abgeschaltet, um das eingestellte Regelband zwischen Sauerstoffverbrauch und Lufteintrag aufrechterhalten zu können. Dabei wird ein Teil der organischen Substanz

im Redoxbereich ~ -300 mV bis  
~ +1600 mV

nach folgender vereinfachter Reaktion in Kohlendioxid umgewandelt



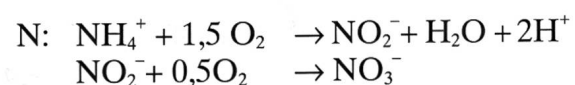
Der dabei ebenfalls erzeugte *Gehalt an Belebtschlamm* (Abb. 6) kann mit der *Feststoffsonde* (COSMOS) *laufend überwacht* und notfalls durch belebten neuentwickelten Rücklaufschlamm ergänzt werden.

Zwangsweise erfolgt aber auch eine Oxidation der Stickstoffverbindung Ammonium, aber auch, allerdings indirekt, von organischen Stickstoffverbindungen wie Harnstoff oder Eiweissen zu *Nitrat*.

Es ist die Nitrifikationsphase N (Abb. 10) welche

im Redoxbereich ~ +300 mV bis  
~ +1700 mV

2stufig durch 2 spezialisierte Bakteriengruppen Nitrosomonas und Nitrobakter abläuft, was schematisch dargestellt werden kann als



Bei einer *gezielt* betriebenen Stickstoff-Eliminations-Anlage reicht es jedoch nicht, die Stickstoffverbindungen nur in



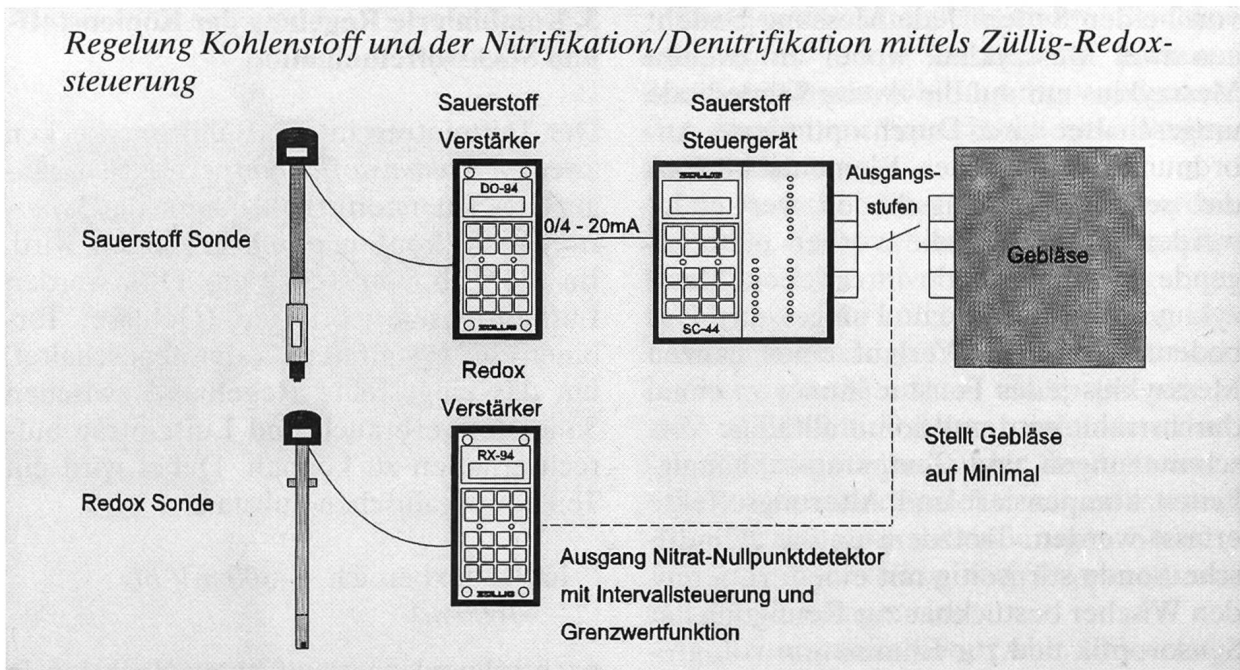


Abb. 9: Sowohl die Sauerstoff- als auch die Redoxsonden-Signale sind an entsprechende Messverstärker und Steuergeräte angeschlossen

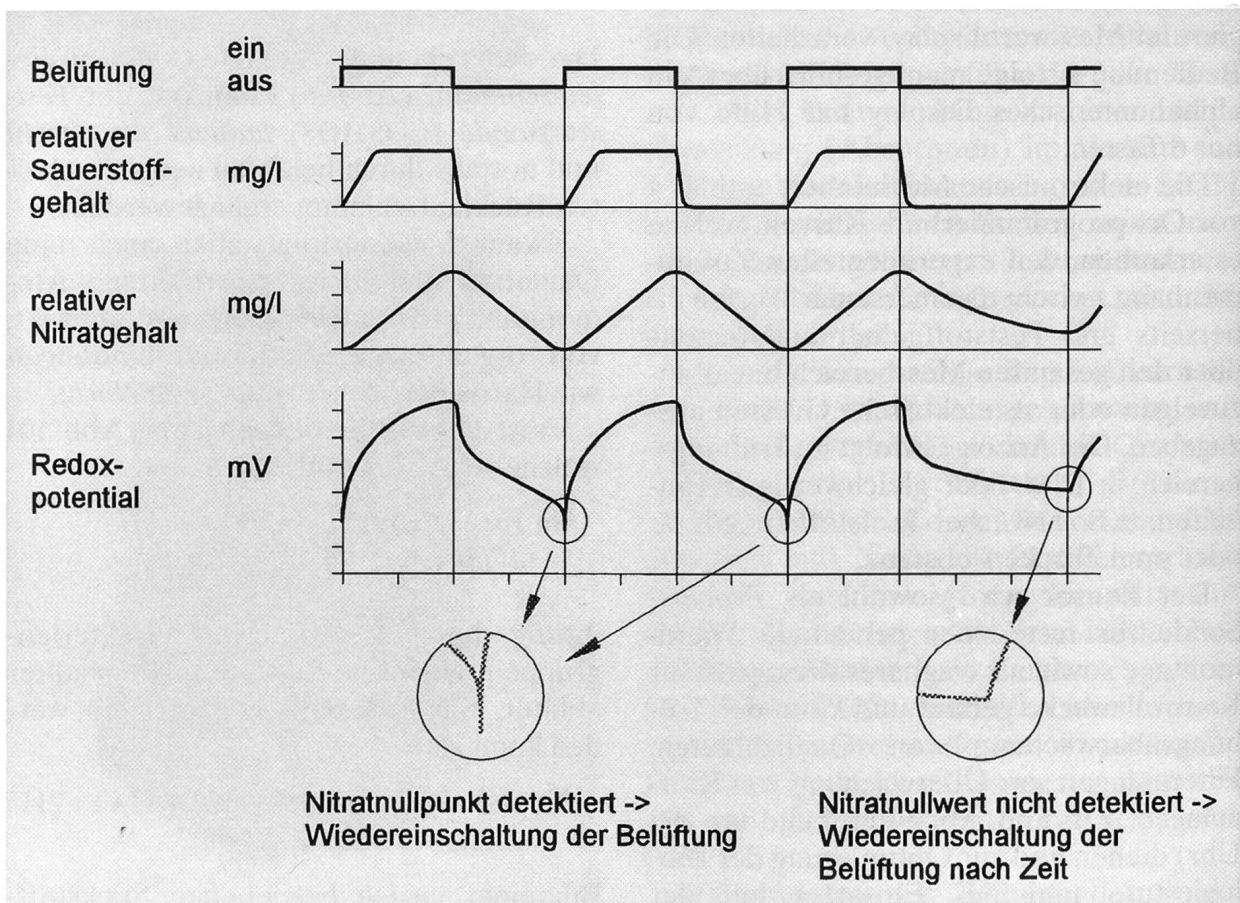
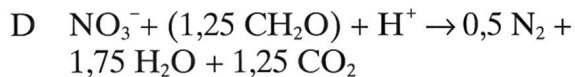


Abb. 10: Schematisch dargestellte Ganglinien der Redoxspannung, der Konzentration an Sauerstoff und Nitrat sowie der Belüftung (ein/aus): schematisierte Kurven

Nitrat umzuwandeln, sondern es muss auch dieses Nitrat entfernt werden. Dazu muss Sauerstoff abwesend sein, um die Denitrifikationsphase D einzuleiten, welche schematisch

im Redoxbereich  $\sim +600 \text{ mV}$  bis  $\sim -1200 \text{ mV}$  verläuft nach der Reaktion



Der Wechsel von Nitrifikation und Denitrifikation kann in diversen Prozessvarianten vollzogen werden. Eine dieser Varianten ist die sog. *intermittierende Denitrifikation*, wobei die *aerobe* Nitrifikation einerseits und die *anoxische* Denitrifikation andererseits trotz ihrer gegensätzlichen Bedingungen (aerob/anoxisch) im gleichen Becken ablaufen. Dies wird durch Ein- und Ausschalten der Belüftung erreicht. Die zeitliche Abfolge kann durch eine Redoxsteuerung geregelt werden.

Nach dem Verbrauch des freien Sauerstoffes stellen die Mikroorganismen auf *Nitratatmung* um. Dabei wird das Nitrat zu freiem Stickstoff abgebaut, der ebenfalls als Gas entweicht; das Redoxpotential fällt auf ein Minimum ab und lässt das Ende des Nitratverbrauches durch einen *Knickpunkt* in der *sinkenden Kurve* erkennen, der von der *Elektronik detektiert* und bei welchem die Belüftung wieder eingeschaltet wird. Bei fehlendem Knickpunkt erfolgt die Wiedereinschaltung der Belüftung entweder nach der Zeit oder nach einem Grenzwert des Redoxpotentials.

Danach steigen die Redoxwerte aufgrund des steigenden Sauerstoff- und Nitratgehaltes wieder an. Auch die Sauerstoffsonde gibt wieder zunehmend freien Sauerstoff zu erkennen. Das geschilderte Zusammenspiel der Parameter ist in Abb. 10 schematisch dargestellt. Diese Regelung hat sich in der Praxis (insbesondere in Deutschland) sehr bewährt.

## Literaturverzeichnis

- BRUGGER, A. (1992): Reduktion von Stickstoffverbindungen auf Kläranlagen. – Referat an firmainterner «Wassertagung» in Lyon.
- HUBER, E. & BRUGGER, A. (1993): Automatische Steuerung von Belebungsanlagen zur Kohlenstoff- und Stickstoff-Elimination mittels Sauerstoff und Redox-Messeinrichtungen. – Lehrgang Nr. 17079/12.139 der Technischen Akademie Esslingen, 29. Juni 1993
- ZÜLLIG, H. (1977): Messgeräte in Abwasserreinigungsanlagen, aktuelle Entwicklungen. Erfahrungen in der Wasserwirtschaft mit unbedeckten, selbstreinigenden Sauerstoffelektroden. – gwf – Wasser/Abwasser 118, 227–234
- ZÜLLIG, H. (1990): MSR – Der automatisierte Gewässerschutz? – 25. VSA-Fortbildungskurs in Engelberg,

