

Innovative Wasser- u. Abwasser- aufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer

C. Brunner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

75/2010

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Innovative Wasser- u. Abwasser- aufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer

DI Christoph Brunner
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
Institut für Nachhaltige Techniken und Systeme

DI Hitzfelder & DI Pillichshammer ZT – GmbH

Fritzmeier Ges.m.b.H., Abteilung Inocre Umwelttechnik

J.S. EnviTEC Umwelttechnik GmbH

Graz, Mai 2010

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Projektabriß | 7 |
| 2 | Einleitung..... | 9 |
| 2.1 | Allgemeine Einführung in die Thematik | 9 |
| 2.2 | Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema..... | 12 |
| 2.3 | Fokus/Schwerpunkte der Arbeit | 13 |
| 2.4 | Einpassung in die Programmlinie "Fabrik der Zukunft" | 14 |
| 2.5 | Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichtes | 14 |
| 3 | Ziele des Projektes..... | 15 |
| 4 | Inhalte und Ergebnisse des Projektes..... | 16 |
| 4.1 | Verwendete Methoden und Daten..... | 16 |
| 4.2 | Beschreibung des Standes der Technik und des Innovationsgehaltes der Projektes . | 18 |
| 4.3 | Beschreibung der Projektergebnisse..... | 24 |
| 4.3.1 | CO ₂ Entragsversuche (Laborversuche)..... | 25 |
| 4.3.2 | CO ₂ Entkeimungsversuche (Laborversuche) | 28 |
| 4.3.3 | O ₂ Eintragsversuche (Laborversuche)..... | 31 |
| 4.3.4 | Abbauversuche mithilfe bioaktiver Präparate (Laborversuche) | 38 |
| 4.3.5 | Fallstudie I: Papierindustrie (Pilotversuche) | 40 |
| 4.3.6 | Fallstudie II: Glasindustrie (Pilotversuche) | 43 |
| 4.3.7 | Verfahrensparameter, Key-Faktoren und Umsetzungsbeispiel (großtechnische SBR-Versuchsanlage)..... | 46 |
| 5 | Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie | 52 |
| 5.1 | Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung | 52 |
| 5.2 | Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt | 52 |

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.3 | Beschreibung der Umsetzungs-Potentiale für die Projektergebnisse | 52 |
| 5.4 | Potential für Demonstrationsvorhaben | 53 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 54 |
| 7 | Literatur-/ Abbildungs-/ Tabellenverzeichnis | 57 |
| 7.1 | Literaturverzeichnis | 57 |
| 7.2 | Abbildungsverzeichnis..... | 58 |
| 7.3 | Tabellenverzeichnis..... | 60 |

KURZFASSUNG

Mit steigender Effizienz der Wassernutzung nehmen Aufwand und Schwierigkeiten zu, entsprechende Optimierungsmaßnahmen unter Einbezug betriebswirtschaftlicher Überlegungen zu realisieren. Eine nachhaltige industrielle Wasserwirtschaft erfordert daher technische Lösungen im Ausgleich zwischen innerbetrieblichen Maßnahmen und notwendigen verfahrenstechnischen Anpassungen im Klärbetrieb, um die betriebliche Effizienz sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht zu erhöhen. Gefragt sind demnach Konzepte und verfahrenstechnische Lösungen, die eine möglichst hohe Flexibilität beim Betrieb abwassertechnischer Anlagen sicherstellen und eine Anpassung ohne aufwendige bauliche Erweiterungen bzw. Investitionen ermöglichen. Darüber hinaus besteht für spezifische Problemfelder der Bedarf, mögliche negative Wechselwirkungen zwischen der Ableitung von gewerblich/industriellen Abwässern in die öffentliche Kanalisation und der kommunalen Abwasserbehandlung durch den Einsatz geeigneter Abwasseraufbereitungstechnologien zu minimieren. Diese können einerseits bei betrieblichen Maßnahmen Verwendung finden und/oder als unterstützendes Modul in der kommunalen Endaufbereitung eingesetzt werden.

Die Zielsetzung des Projektes bestand nun in der Überprüfung der Anwendbarkeit eines Gaseintragungssystems für betriebliche Maßnahmen als auch als unterstützendes Modul im Bereich der biologischen Abwasserreinigungstechnik unter Berücksichtigung spezifischer technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen. Im Zusammenhang mit dem modularen Aufbau der Technologie wurden diesbezüglich Versuchsreihen zur effizienten Einbringung von technischem Sauerstoff (O_2), zur verbesserten Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffes, zum verbesserten Abbau organischer Substanzen durch Einsatz bioaktiver Präparate und zur bakteriziden Wirkung von Kohlendioxid (CO_2) durchgeführt. Anhand der genannten Versuche wurden neue Anwendungsfelder der Technologie im Bereich der betrieblichen und kommunalen Wasserwirtschaft evaluiert, mögliche Vorteile aufgezeigt und die der Technologie zugrunde liegenden verfahrensspezifischen Parameter verifiziert.

Die im Zuge des Projektes evaluierte Technologie zur Einbringung von Gasen in Flüssigkeiten zeigte dabei aufgrund der hohen radialen Beschleunigung des Fluids im Gaseintragungssystem (Reaktor) eine leistungsfähige Gasverteilung in wässrigen Systemen, wobei bei Einbringung von Sauerstoff über das Gaseintragungssystem dieser in Form fein verteilter Gasbläschen und mit Sauerstoff übersättigtem Wasser vorliegt. Gegenüber feinblasigen Druckluftsystemen ergibt sich dabei trotz des kleineren Grenzflächenfaktors (α -Wert) eine höhere Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffes, da die hohen Turbulenzen im Gaseintragungssystem (Reaktor) in einer stetigen Erneuerung der Grenzflächen resultieren. Des Weiteren zeigte die Einbringung von CO_2 über das Gaseintragungssystem eine durchaus potentielle Möglichkeit im Bereich der Neutralisation von alkalischen Prozesswässern. Vorteile gegenüber der Neutralisation mit Mineralsäuren werden dabei vor allem in der verminderten Salzbelastung des Prozesswassers und der Vermeidung einer Übersäuerung des Systems durch die flachere Neutralisationskurve von CO_2 gesehen.

ABSTRACT

Increasing costs for wastewater treatment and discharge and an enhancement of environmental awareness are only some reasons, which led and lead to the development of innovative technologies in order to optimise the industrial water management. A sustainable water management requires technological solutions by internal optimisation measures and technological adaptations of existing wastewater treatment systems to enhance the operational efficiency in an economical and ecological way. Concepts and technological solutions are in demand, which guarantee a high flexibility of wastewater treatment systems under operating conditions and which allow an adaption of existing systems without extensive constructional works and investments.

Therefore, the project aimed at the examination of the applicability of a technology, which allows the efficient input of gases into fluids. As an alternative to conventional systems, this technology was determined for different applications within the industrial and urban water management. The operational possibilities are ranging from measures to an optimised oxygen input within biological wastewater treatment systems, to measures for neutralisation and pH adjustment and to measures for the elimination of pathogenic bacteria in the wastewater. Therefore, laboratory and pilot test were made in connection with the modular assembling of the technology, concerning tests for the efficient input of oxygen, for the improved saturation of the dissolved oxygen, for the improved degradation of organic substances by using bioactive substances, for the neutralisation by CO₂ gassing and for the bactericidal effect of CO₂. On the basis of these tests the benefits in comparison to conventional technologies were evaluated and process parameters of large scale systems verified.

By the reason of a high radial acceleration of the fluid, the evaluated technology showed an efficient gas distribution within hydrous systems. When inserting oxygen over the technology into the fluid, the availability of this oxygen is given by fine distributed gas bubbles and over oxygenated water. Furthermore, the technology showed a potential possibility for the neutralisation of alkaline process water by inserting CO₂ over the technology into the fluid. Main advantages compared to the neutralisation over mineral acids can be seen by the reduced salt contamination and by the avoidance of hyperacidity of the system because of the flat neutralisation curve.

1 Projektabriß

Die Ressource Wasser wird in der Industrie als Rohstoff, Betriebsmittel, Reinigungsmittel, Transportmittel und als Energieträger eingesetzt, wobei sich die quantitativen und qualitativen Anforderungen an den Produktionsfaktor Wasser je nach Industriebranche, Industriebetrieb und Verwendungszweck wesentlich unterscheiden können. Erfüllt das eingesetzte Wasser in weiterer Folge nicht mehr den produktions- und prozessspezifischen Anforderungen, so muss es dem jeweiligen Prozess entzogen und einer entsprechenden Entsorgung bzw. Aufbereitung zugeführt werden. Dabei ergeben sich je nach Industrieabwasser und deren Frachten unterschiedliche Entsorgungs- und Aufbereitungswege, wobei mit steigender Effizienz der Wassernutzung Aufwand und Schwierigkeiten zur Realisierung entsprechender Optimierungsmaßnahmen unter Einbezug betriebswirtschaftlicher Überlegungen zunehmen. Eine nachhaltige industrielle Wasserwirtschaft erfordert daher technische Lösungen im Ausgleich zwischen innerbetrieblichen Maßnahmen und notwendigen verfahrenstechnischen Anpassungen bestehender Abwasseraufbereitungsanlagen, um die betriebliche Effizienz sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht zu erhöhen. Gefragt sind dabei Konzepte und verfahrenstechnische Lösungen, die eine möglichst hohe Flexibilität beim Betrieb abwassertechnischer Anlagen sicherstellen und eine Anpassung ohne aufwendige bauliche Erweiterungen bzw. Investitionen ermöglichen.

Darüber hinaus besteht für spezifische Problemfelder der Bedarf, mögliche negative Wechselwirkungen zwischen der Ableitung von gewerblich/industriellen Abwässern in die öffentliche Kanalisation und der kommunalen Abwasserbehandlung durch den Einsatz geeigneter Abwasseraufbereitungstechnologien zu minimieren. Diese können einerseits bei betrieblichen Maßnahmen Verwendung finden und/oder als unterstützendes Modul in der kommunalen Endaufbereitung eingesetzt werden.

Die Zielsetzung des Projektes bestand nun in der Überprüfung der Anwendbarkeit eines Gas-eintragsystems im Bereich der Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft unter Berücksichtigung spezifischer technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen. Die Anwendbarkeit dieser Technologie wurde dabei sowohl für betriebliche Maßnahmen als auch als unterstützendes Modul im Bereich der biologischen Abwasserreinigungstechnik wissenschaftlich im Labor- und Pilotmaßstab untersucht. Im Zusammenhang mit dem modularen Aufbau der Technologie wurden im Zuge der Projektdurchführung Versuchsreihen zur effizienten Einbringung von technischem Sauerstoff (O_2), zur verbesserten Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffes, zum verbesserten Abbau organischer Substanzen durch Einsatz bioaktiver Präparate und zur bakteriziden Wirkung von Kohlendioxid (CO_2) durchgeführt.

Anhand der genannten Versuche wurden neue Anwendungsfelder der Technologie im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft evaluiert, mögliche Vorteile aufgezeigt und die der Technologie zugrunde liegenden verfahrensspezifischen Parameter verifiziert.

Als Hauptziele des Projektes sind in diesem Zusammenhang zu nennen:

- Evaluierung einer neuartigen Technologie zum Eintrag von Gasen – im speziellen Sauerstoff – in wässrige Medien und Untersuchung bioaktiver Präparate zum verbesserten Abbau organischer Substanzen im Bereich der biologischen Abwasserreinigung
- Evaluierung der Anwendbarkeit dieser Technologie sowohl für betriebliche Maßnahmen als auch als unterstützendes Modul in der kommunalen Abwasserreinigung auf Basis von Laborversuchen bzw. halbtechnischen Pilotversuchen
- Erarbeitung von Key-Faktoren in Form einer Matrix zur Darstellung der evaluierten Anwendungsmöglichkeiten und der der Technologien zugrunde liegenden Verfahrensparameter

Die im Zuge des Projektes evaluierte Technologie zur Einbringung von Gasen in Flüssigkeiten zeigte aufgrund der hohen radialen Beschleunigung des Fluids im Gaseintragungssystem (Reaktor) eine leistungsfähige Gasverteilung in wässrigen Systemen, wobei der Sauerstoff nach erfolgter Einbringung in Form fein verteilter Gasbläschen und mit Sauerstoff übersättigtem Wasser vorliegt. Gegenüber feinblasigen Druckluftsystemen ergibt sich dabei trotz des kleineren Grenzflächenfaktors (α -Wert) eine höhere Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs, da die hohen Turbulenzen im Gaseintragungssystem (Reaktor) in einer stetigen Erneuerung der Grenzflächen resultieren. Neben den durchgeführten Versuchen zur Einbringung von Sauerstoff in Fluiden wurden im Zuge der Projektdurchführung auch alternative Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzbereiche der Technologie im Bereich der industriellen Wasserwirtschaft erprobt und evaluiert. So zeigte die Einbringung von CO_2 über das Gaseintragungssystem (Reaktor) eine durchaus potentielle Möglichkeit im Bereich der Neutralisation von alkalischen Prozesswässern. Vorteile gegenüber der Neutralisation mit Mineralsäuren werden dabei vor allem in der verminderten Salzbelastung des Prozesswassers und der Vermeidung einer Übersäuerung des Systems durch die flachere Neutralisationskurve von CO_2 gesehen. In diesem Zusammenhang ist auch auf die durchgeführten Untersuchungen zur Eliminierung seuchenhgienisch relevanter Keime durch Begasung einer Anreicherungspopulation aus Biogasgülle mittels CO_2 über das im Projekt evaluierte Gaseintragungssystem hinzuweisen. Im Gegensatz zu bereits bekannten Verfahren zur Hochdruck-Kohlendioxid-Behandlung konnte anhand der im Projekt durchgeführten Untersuchungen allerdings keine bakterizide Wirkung durch CO_2 Begasung der Versuchsmedien mittels der untersuchten Technologie festgestellt werden.

Die effektive Einbindung des Systems steht demnach im direkten Zusammenhang mit spezifischen Problemfeldern im Bereich der industriellen Wasserwirtschaft. Wesentliche Faktoren sind diesbezüglich im Prozessdesign begründet, wobei allgemein gültige Aussagen zur kosteneffektiven Einbindung in bestehende Systeme aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten nicht getroffen werden können. Nur über eine fundierte Analyse der jeweiligen Gegebenheiten können signifikante Aussagen über das notwendige Anlagendesign und der möglichen Einsparungspotentiale getroffen werden. Im Mittelpunkt der Technologieanwendung steht allerdings in allen Fällen die Bemühung einer effizienten Nutzung und Aufbereitung der Ressource Wasser bei größtmöglicher Verringerung des dafür notwendigen Energie- und Chemikalieneinsatzes, um durch nachhaltiges Wirtschaften die ökonomische als auch ökologische Effizienz im Bereich der betrieblichen- und kommunalen Wasserwirtschaft zu erhöhen.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung in die Thematik

Die Ressource Wasser wird in der Industrie als Rohstoff, Betriebsmittel, Reinigungsmittel, Transportmittel und als Energieträger eingesetzt, wobei sich die quantitativen und qualitativen Anforderungen an den „Produktionsfaktor“ Wasser je nach Industriebranche, Industriebetrieb und Verwendungszweck wesentlich unterscheiden können. Im einfachsten Fall wird die Ressource Wasser als Schwemm- oder Waschwasser z.B. in der Zuckerindustrie eingesetzt, wobei an das dafür benötigte Wasser im Allgemeinen geringe qualitative Anforderungen gestellt werden. In sensiblen Bereichen der Lebensmittelindustrie wird dagegen zu Reinigungszwecken hygienisch einwandfreies Wasser benötigt. Qualitativ höchste Anforderungen werden zB. in der Halbleiterindustrie und in der Pharmaindustrie gefordert, wo in sensiblen Bereichen zum Teil Reinstwasser zum Einsatz kommt. Wird das in der Industrie eingesetzte Wasser zur Kühlung, also zur Abführung von überschüssiger Wärme benötigt, ergeben sich je nach Ausgestaltung des Kühlsystems wiederum unterschiedliche Anforderungen an das dafür benötigte Wasser. In der Regel ist keine aufwendige Aufbereitung notwendig, dennoch können sich je nach Herkunft des Wassers und seiner Inhaltsstoffe unterschiedliche Problemstellungen ergeben, die gegebenenfalls eine Aufbereitung notwendig machen. Die Anforderungen an die Qualität kann sich also je nach Industriebranche, innerhalb eines Industriebetriebes und aufgrund der Vielzahl von Verwendungszwecken grundsätzlich unterscheiden.

Erfüllt das eingesetzte Wasser in weiterer Folge nicht mehr den produktions- und prozessspezifischen Anforderungen, so muss es dem jeweiligen Prozess entzogen und einer entsprechenden Entsorgung/Aufbereitung zugeführt werden. So betrug der gesamte kommunale Abwasseranfall, der sich aus den häuslichen Abwässern und den Abwässern aus den Bereichen Fremdenverkehr, Gewerbe und Industriebetrieben (Indirekteinleiter) zusammensetzt, im Jahr 2001 für Gesamtösterreich rd. 1.068 Mio. m³/a. Die gesamte CSB-Zulaufmenge in kommunale Kläranlagen (häusliches Abwasser und Indirekteinleiter) betrug rd. 551.486 t CSB/a, wobei der Anteil der Abwasserfracht der Indirekteinleiter mit 273.048 t CSB/a bei rd. 49,5% lag. Die gesamte CSB-Zulaufmenge der Indirekteinleiter und der industriellen Direkteinleiter in Abwasserreinigungsanlagen betrug im Jahr 2001 510.488 t CSB/a [BMLFUW, 2002]. Für Industrieabwässer und deren Frachten ergeben sich demnach unterschiedliche Entsorgungs- und Aufbereitungswege, wobei sich je nach Industriebetrieb und Betrachtungsfall die Frage erhebt, ob das Industrieabwasser

- in einer eigenen Betriebskläranlage gereinigt und danach direkt in ein Gewässer abgeleitet werden soll/kann,
- ohne Vorbehandlung der kommunalen Kläranlage zugeleitet werden soll/kann oder
- nach erfolgter Vorreinigung in das öffentliche Kanalnetz eingeleitet werden soll/kann [Nowak, 2010].

Die allgemeinen Grundsätze zur Behandlung von Abwasser und Abwasserinhaltsstoffen der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung [AAEV §2, 1996] besagen diesbezüglich, dass bei der Einleitung von Abwasser und Abwasserinhaltsstoffen in ein Fließgewässer oder in eine öffentliche Kanalisation unter Bedachtnahme auf den Stand der Abwasserreinigungstechnik und auf die Möglichkeit zur Verringerung des Abwasserabfalls, darauf geachtet werden soll, dass

1. Einbringungen von Abwasserinhaltsstoffen und Abfallenergie nur im unerlässlich notwendigen Ausmaß erfolgen;
2. Einsparung, Vermeidung und Wiederverwendung von Stoffen, die ins Abwasser gelangen können, sowie von Energie Vorrang haben vor Abwasserbehandlungsmaßnahmen;
3. die Schutzmaßnahmen für ein Fließgewässer nicht zu einer unvertretbaren Verlagerung von Belastungen auf andere Gewässer führen;
4. die an ein Fließgewässer abgegebene Abwassermenge durch Einsatz wassersparender Technologien und Methoden möglichst gering gehalten wird;
5. Abwasserinhaltsstoffe möglichst unmittelbar am Ort der Entstehung oder des Einsatzes zurück gehalten werden (Teilstrombehandlung).

Bei der Entscheidungsfindung industrieller Einleiter zu berücksichtigen sind neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen (Abwasseremissionsverordnung, Indirekteinleiterverordnung, Gewerbeordnung,) daher auch technische Entwicklungen entlang der Ursachen-Wirkungskette (Input [Bezug] – Throughput [Gebrauch] – Output [Entsorgung]). Neben den Aspekten des Emissionsschutzes erlangen demnach auch Technologien und Verfahren zur betrieblichen Wiederverwendung aufbereiteter Abwässer zunehmend an Bedeutung, um die umweltrelevanten Kosten im Bereich der Wasserver- und Abwasserentsorgung auf ein Optimum reduzieren zu können. Um eine Kostenreduktion im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft zu erreichen wurden daher in den letzten Jahrzehnten verschiedenste Lösungsansätze und Strategien entwickelt, welche sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte einer effizienten Wassernutzung vereinen. Es stehen dabei nicht mehr nur additive, also externe Maßnahmen mit der Zielsetzung bereits entstandene Umweltbelastungen zu reduzieren (End-Of-Pipe Technologien) im Vordergrund der Betrachtungsweise, sondern zunehmend integrierte (interne) Maßnahmen mit dem Ziel unerwünschte Umweltbelastungen gar nicht bzw. in einem geringeren Ausmaß entstehen zu lassen. Als interne Maßnahmen werden dabei grundsätzlich jene verstanden, die eine direkte Kopplung mit der Produktion und der Qualität der erzeugten Ware aufweisen. Eine nachhaltige industrielle Wasserwirtschaft erfordert daher technische Lösungen im Ausgleich zwischen innerbetrieblichen Maßnahmen und notwendigen verfahrenstechnischen Anpassungen bestehender Abwasseraufbereitungsanlagen, um die betriebliche Effizienz sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht zu erhöhen. Gefragt sind dabei Konzepte und verfahrenstechnische Lösungen, die eine möglichst hohe Flexibilität beim Betrieb abwassertechnischer Anlagen sicherstellen und eine Anpassung ohne aufwendige bauliche Erweiterungen bzw. Investitionen ermöglichen.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden beispielsweise 2004 1,04 Mrd. m³ Abwässer in knapp 3.000 betriebseigenen Kläranlagen im Bergbau und im verarbeitenden Gewerbe behandelt, wobei der Anteil des in biologischen Anlagen gereinigten Abwassers bei rund 67%

lag. Die weitaus größte Abwassermengen wurde dabei in der chemischen Industrie (426 Mio. m³), der Papierindustrie (260 Mio. m³) und in der Lebensmittel – und Genussmittelindustrie (119 Mio. m³) behandelt [Statistisches Bundesamt, 17.09.2009].

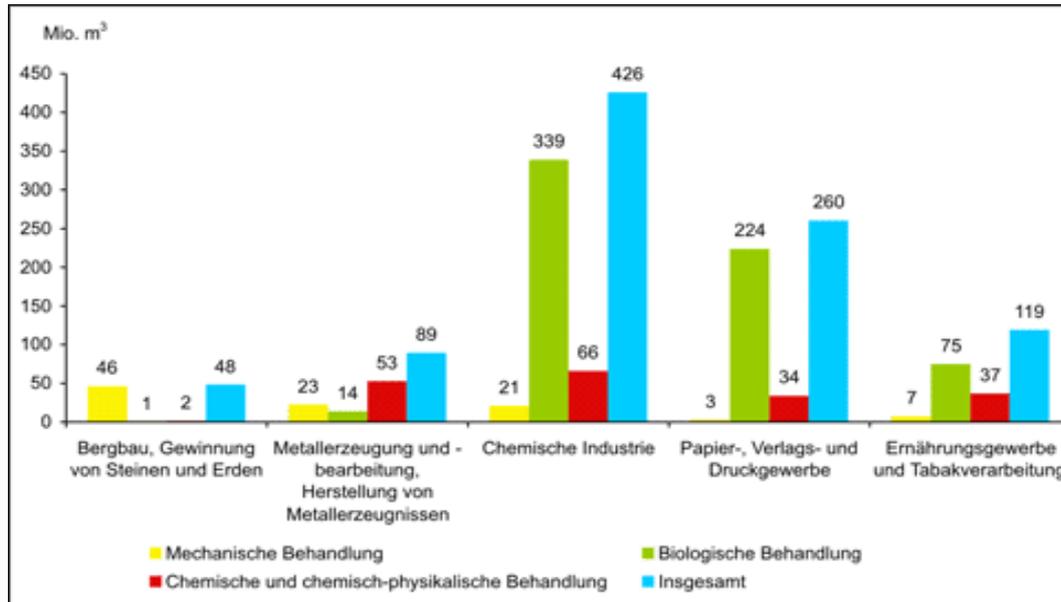


Abbildung 1: Abwasserbehandlung in betriebseigenen Behandlungsanlagen ausgewählter Branchen in Deutschland [Bildquelle: Statistisches Bundesamt, 17.09.2009]

Als gängige Verfahren zur Aufbereitung organisch verunreinigter Abwässer werden dabei biologische Aerobverfahren eingesetzt, wobei aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen zwischen dem Verfahren der suspendierten Biomasse (Belebungsverfahren) und dem Verfahren mit feststehender Biomasse (Biofilm-, bzw. Festbettverfahren) unterschieden wird. Der biologische Abbau von Schmutzstoffen erfolgt dabei über Stoffwechselprozesse der beteiligten Mikroorganismen, wobei die Wachstumskinetik durch äußere Faktoren wie Temperatur, Nährstoffangebot, Substratkonzentration(en) und Sauerstoffkonzentration beeinflusst wird. Eine wesentliche Voraussetzung für den aeroben Abbau von organischen Stoffen stellt demnach die Versorgung der Biomasse mit Sauerstoff dar, wobei beim Belebungsverfahren die Biomasse (Belebtschlamm) des weiteren durch eine ausreichende Turbulenz in Suspension / Schwebelage gehalten werden muss. In aller Regel wird dies durch das eingesetzte Belüftungssystem gewährleistet, gelegentlich wird die Sauerstoffversorgung und Durchmischung allerdings auch durch unterschiedliche Apparaturen abgedeckt. Grundsätzlich unterscheidet man bei Belüftungssystemen die Prinzipien der Oberflächenbelüftung (Sauerstoff wird aus der Luft im Belebtschlamm gelöst) und Druckbelüftung (komprimierte Luft wird feinblasig eingetragen und über aufsteigende Luftbläschen geht Sauerstoff im Belebtschlamm in Lösung), wobei die Belüftungsenergie neben der dargestellten Oxidation von Kohlenstoffverbindungen auch für die Nitrifikation benötigt wird. Eine Kostenanalyse von kommunalen Anlagen im Rahmen von Benchmarkingaktivitäten in der österreichischen Abwasserwirtschaft zeigte beispielsweise einen Energiekostenanteil an den Gesamtbetriebskosten von im Schnitt 16%, wobei der Energiebedarf zum Eintrag des erforderlichen Sauerstoffbedarfs den weit größten Verbraucher an elektrischer Energie darstellt [Lindtner et al, 2008]. Aussagen über die Wirtschaftlich-

keit eines Belüftungssystems können grundsätzlich durch Ermittlung des Sauerstofftrages O_p [kg/kWh] gemacht werden, wobei diese Wirtschaftlichkeitskennzahl den Eintrag von 1 kg Sauerstoff mit 1 kWh unter Standardbedingungen in das Wasser angibt. So liegt der Sauerstofftrag O_p im Schlamm bei Oberflächenbelüftern zwischen 1,35 und 2,5 kg/kWh und bei Druckbelüftern zwischen 1,5 und 2,8 kg/kWh [Lindtner, 2007], wohingegen im Reinwasser unter mittleren Verhältnissen Sauerstofftragswerte von 3 – 4 kg/kWh erzielbar sind [Frey, 1998].

Gaseintragsysteme wie die im Projekt untersuchte Technologie bieten nun die Möglichkeit, den Sauerstoffbedarf in aeroben Systemen durch Zufuhr von reinem Sauerstoff partiell oder vollständig abzudecken. Die partielle Zufuhr eignet sich dabei vor allem für Abwasserreinigungssysteme mit stark schwankendem Sauerstoffbedarf aufgrund schwankender Zulaufmengen und Auslastungen. Im Bereich der industriellen Wasserwirtschaft trifft dies vielfach auf Produktionsbetriebe zu, die einem Kampagnenbetrieb unterliegen und so flexibel auf Bedarfsschwankungen im Klärbetrieb reagieren müssen. Durch Nachrüstung der Technologie als unterstützendes Modul zu herkömmlichen Belüftungssystemen eröffnet sich damit die Möglichkeit, die Sauerstoffversorgung bestehender aerober Reinigungssysteme zu optimieren und temporären Sauerstoffmangel flexibel entgegenzuwirken.

Daneben bietet die untersuchte Technologie auch alternative Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Neutralisation alkalischer Abwässer mit Kohlendioxid. In diesem Zusammenhang ist auch auf die durchgeführten Untersuchungen zur Eliminierung seuchenhygienisch relevanter Keime durch Begasung einer Anreicherungspopulation aus Biogasgülle mittels Kohlendioxid über das im Projekt evaluierte Gaseintragsystem hinzuweisen. Im Gegensatz zu bereits bekannten Verfahren zur Hochdruck-Kohlendioxid-Behandlung (z.B. Autoklavenmethode, Methode nach R.E. Wildasin, Methode nach M. Sims) konnte anhand der im Projekt durchgeführten Untersuchungen allerdings keine bakterizide Wirkung durch CO_2 Begasung der Versuchsmedien mittels der untersuchten Technologie festgestellt werden. Dennoch sollen die im Projekt durchgeführten Versuchsreihen im vorliegenden Endbericht Erwähnung finden und Hintergrundinformationen zu den Möglichkeiten der Abtötung von Mikroorganismen durch verdichtetes Kohlendioxid liefern.

2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Das Projekt baut auf dem im Jahr 2005 abgeschlossenen Projekt ARAFIT (Management der Belastung aus dem Einzugsbiet von Verbandkläranlagen im Sinne eines nachhaltigen Least Cost Plannings) auf, das im Rahmen der 3. Ausschreibung der Programmlinie Fabrik der Zukunft bearbeitet wurde.

Die Ausrichtung von ARAFIT war im mehrfachen Sinne anwendungsorientiert. Es orientiert sich an der Behandlung von Teilströmen (Wasser, Brauchwasser, Wertstoffe), wird den Qualitätsansprüchen der Produktion und Produktionsbedingungen gerecht, verfolgt Optimierungspotentiale im Ausgleich industriell/gewerblicher Indirekteinleiter und des häuslichen Abwasseranfalls, ist Ressourcen schonend und umweltgerecht, orientiert sich am Grundsatz der

Verteilungsgerechtigkeit und stellt eine Unterstützung in Richtung nachhaltiger Wasserwirtschaft dar.

ARAFIT führte zum Aufbau von nachhaltigen Kooperationen zwischen Gewerbe- und Industriebetrieben und dem Abwasserverband. Maßnahmen umfassen den Austausch von Stoffströmen zwischen den Betrieben der Region (Verbringung von Konzentraten der Molkerei in den Faulurm der Abwasseranlage, Nutzung von Eisensulfat als Fällungsmittel), der zeitlichen Abstimmung der Wasserverbraucher, Nutzung von Pufferpotentialen im Einzugsgebiet und Maßnahmen zur Reduktion betrieblicher Abwasserfrachten durch innerbetriebliche Maßnahmen (Vorreinigung durch Ultrafiltration, Neukonzeption der Beize, Kreislaufführung von Konzentraten, Optimierung der Reinigung und Rückhalt von Konzentraten).

Mit dem gegenständlichen Projekt soll durch die untersuchte Technologieentwicklung mit der Patentnr.: 503643 (Vorrichtung zur Gaseinbringung in Flüssigkeiten) ein zusätzliches Instrument zur Optimierung des Wassermanagements in Einzugsgebieten erarbeitet und spezifische Anwendungsfälle hinsichtlich der effizienten Nutzung/Einbindung dieser Technologie evaluiert werden.

2.3 Fokus/Schwerpunkte der Arbeit

Die Hauptstoßrichtung des Projektes INNOWATEC – Innovative Wasser- und Abwasseraufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer – bestand in der Erprobung und Verifizierung einer Vorrichtung zum Eintrag von Gasen – im speziellen Sauerstoff – in Flüssigkeiten und der Evaluierung möglicher Anwendungen sowohl für betriebliche Maßnahmen als auch als unterstützendes Modul in der kommunalen Abwassertechnik. Schwerpunktmäßig wurden hierzu im Rahmen von Labor- und Pilotversuchen nachstehende Arbeiten durchgeführt:

- Untersuchungen zum Eintrag von Sauerstoff in Flüssigkeiten anhand von Absorptionsversuchen und Desorptionsversuchen
- Untersuchungen zum Eintrag von Kohlendioxid in Flüssigkeiten anhand von Desorptionsversuchen
- Untersuchungen zur bakteriziden Wirkung von CO₂ bzw. der Eliminierung seuchenhygienisch relevanter Keime im Abwasser
- Überprüfung der Technologieanwendung zu den angeführten Fragestellungen in der betrieblichen Praxis

Die Durchführung und Ergebnisse der Tests im Labor- und Pilotmaßstab wurden dokumentiert und insbesondere die Verfahrensweise und Verfahrensparameter der Technologie evaluiert. Die verfahrenstechnischen Anwendungen wurden in Form einer Matrix visualisiert und Key-Faktoren für einen effizienten Einsatz der Technologie definiert.

2.4 Einpassung in die Programmlinie “Fabrik der Zukunft”

Das Projekt INNOWATEC – Innovative Wasser- und Abwasseraufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer – entspricht den Zielsetzungen der Programmlinie “Fabrik der Zukunft”, wobei das Projekt dem Schwerpunkt „Technologie und Innovationen bei Produktionsprozessen“ zuordenbar ist. Ziel der Programmlinie ist die Entwicklung und Demonstration von Konzepten und Technologien zur Produktion und Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen in einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaft. Eine „Fabrik der Zukunft“ wird in diesem Sinn darauf ausgerichtet sein, Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung weitestgehend zu reduzieren und dabei einen möglichst hohen ökonomischen als auch ökologischen Nutzen zu erzielen. Ziel der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ ist es, für Unternehmen in Österreich innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential zu initiieren und zu realisieren, die die konkrete Umsetzbarkeit nachhaltigen Wirtschaftens beispielhaft nachweisen.

Gegenständliches Projekt baut auf diese Philosophie auf: So soll höchstmöglicher Nutzen bei minimaler Umweltbelastung in einem partizipativen Prozess der Nutzer gemeinsam erreicht werden.

2.5 Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichtes

Der vorliegende Endbericht zum Projekt INNOWATEC – Innovative Wasser- und Abwasseraufbereitungstechnologie für kommunale und industrielle Abwässer und Prozesswässer entspricht den Hinweisen zur Berichtslegung und projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit für Projekte im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig wirtschaften. Diese umfasst nachstehende Gliederung:

Kapitel 2 – Allgemeine Einführung in die Thematik des Projektes INNOWATEC

Kapitel 3 – Darstellung der Ziele des Projektes INNOWATEC

Kapitel 4 – Darstellung der Ergebnisse aus dem Projekt INNOWATEC

Kapitel 5 - Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

Kapitel 6 - Schlussfolgerungen und Ausblick

3 Ziele des Projektes

Die prioritäre Zielsetzung des Projektes bestand in der Erprobung und Verifizierung einer Vorrichtung zum Eintrag von Gasen – im speziellen Sauerstoff – in Flüssigkeiten und der Evaluierung möglicher Anwendungen sowohl für betriebliche Maßnahmen, als auch als unterstützendes Modul in der kommunalen Abwassertechnik. Hierzu wurde diese Vorrichtung im Rahmen von Labor- und Pilotversuchen auf Grundlage der vorab ermittelten Anwendungsfelder untersucht, verfahrenstechnische Anwendungen der Technologie in Form einer Matrix visualisiert und Key-Faktoren für einen effizienten Einsatz der Technologie definiert. Inhalt und Zielsetzung der Arbeiten im Rahmen des Projektes INNOWATEC umfassten dabei:

- Definition potentieller Einsatzgebiete der Technologie im Bereich der Abwassertechnik und der betrieblichen Wasserwirtschaft
- Durchführung von Laborversuchen zur Evaluierung der dargestellten Anwendungsmöglichkeiten und Konzeption der Versuchsanlagen für die Pilotanwendungen
- Durchführung von Pilotversuchen und Darstellung der Einsetzbarkeit in Abhängigkeit zu den jeweiligen produktions- und prozessspezifischen Bedingungen
- Visualisierung der Ergebnisse aus den Labor- und Pilotversuchen in Form einer Matrix und Darstellung der Möglichkeiten zur Einbindung der untersuchten Vorrichtung in bestehende Wassermanagementkonzepte
- Darstellung von Lösungskonzepten im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft

Grundsätzlich ist im Bereich der industriellen und kommunalen Behandlung von Abwässern im Sinne eines nachhaltigen Gewässerschutzes der Einsatz effizienter und stabiler Verfahren zur Aufbereitung anfallender Abwasserströme notwendig. Abwasserreinigungsanlagen unterliegen dabei wechselnden Einflüssen, wie Zulaufbedingungen, Witterungsverhältnissen/ Temperaturen oder auch planmäßigen und störungsbedingten Außerbetriebnahmen von ganzen Anlagen oder Anlagenteilen. Trotz der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren auf den Wirkungsgrad einer Anlage ist ein Höchstmaß an Betriebsstabilität zur Einhaltung vorgeschriebener Emissionsgrenzen einerseits, aber auch eine Optimierung unter dem Aspekt der Kostenminimierung andererseits anzustreben. Zur Verifizierung der Ergebnisse der durchgeführten Versuche wurde diese daher auch einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen, um sowohl die ökonomischen als auch ökologischen Vorteile bei Einsatz der Technologie beurteilen zu können.

4 Inhalte und Ergebnisse des Projektes

4.1 Verwendete Methoden und Daten

Die Zielsetzung des Projektes bestand in der Überprüfung der Anwendbarkeit der nachfolgend beschriebenen Technologie im Bereich der Siedlungs- und Industrierwasserversorgung unter Berücksichtigung spezifischer technologischer und wirtschaftlicher Randbedingungen. Die Anwendbarkeit dieser Technologie wurde dabei sowohl für betriebliche Maßnahmen als auch als unterstützendes Modul im Bereich der biologischen Abwasserreinigungstechnik wissenschaftlich im Labor- und Pilotmaßstab untersucht.

Die im Rahmen des Projektes evaluierte Technologie mit der Patentnummer AT 503643 (A4) besteht aus einem schlauchförmigen Filtergewebe (17), welches über ein Innenrohr (2) mit Gasdurchtrittsöffnungen lose umschlossen ist. Zur Erzeugung einer Rotationsbewegung der Flüssigkeit ist das schlauchförmige Filtergewebe mit einer schraubenförmigen Spirale (18) umschlossen. Die Anreicherung der Flüssigkeit mit dem eingetragenen Gas erfolgt im schraubenförmigen Strömungskanal (20), wobei das Gas über Gaseintrittsöffnungen (15) im Innenrohr über das Filtergewebe in die Flüssigkeit eingebracht wird. Laut Patentinhaber beruht das Verfahrensprinzip auf Kavitation, wodurch eine effiziente Anreicherung von Gasen in Flüssigkeiten ermöglicht wird.

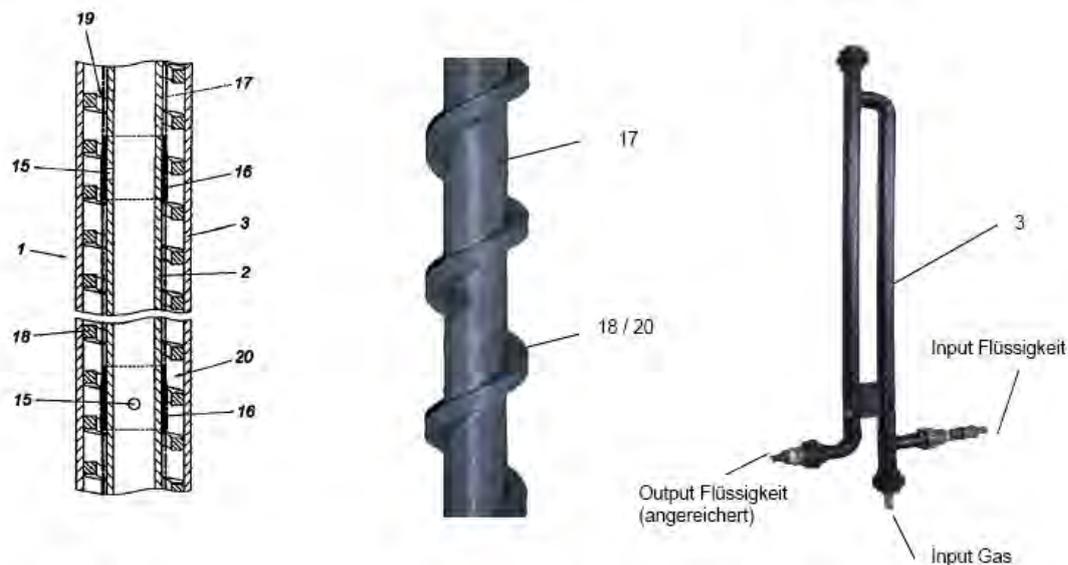


Abbildung 2: Vorrichtung zur Einbringung von Gasen in Fluiden – Gaseintragsystem (PNr.:503643)

Im Zusammenhang mit dem modularen Aufbau der Technologie wurden im Zuge der Projektdurchführung Versuchsreihen zur effizienten Einbringung von Sauerstoff, zur verbesserten Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffes, zum verbesserten Abbau organischer Substanzen durch Einsatz bioaktiver Präparate und zur bakteriziden Wirkung von CO₂ durchgeführt. Anhand der genannten Versuche sollten einerseits die Vorteile gegenüber konventionellen Technologien dargestellt werden, andererseits sollten alternative Anwendungsmöglichkeiten

evaluiert und notwendige verfahrenstechnischen Parameter zur Auslegung großtechnischer Anlagen verifiziert werden.

Die im Rahmen des Projektes verwendete Methodik / Vorgehensweise lässt sich daher in folgende Teile untergliedern:

- Evaluierung möglicher Einsatzgebiete des Gaseintragsystems und Analyse daraus ableitbarer Optimierungspotentiale in ausgewählten Industriebranchen
- Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab
- Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen im Pilotmaßstab in ausgewählten Industriebetrieben

Zu Beginn des Projektes wurden Einsatzmöglichkeiten des Gaseintragsystems im betrieblichen Wassermanagement evaluiert und die dem System lt. Patentinhaber zugrunde liegende Wirkweise einer näheren Betrachtung unterzogen. Darauf aufbauend wurden mögliche Optimierungspotentiale für ausgewählte Industriebranchen definiert und entsprechende Versuche zur Verifizierung der prozessspezifischen Eignung der Technologie durchgeführt. Die Versuche wurden durch Erfassung/Auswertung definierter Parameter (Einzelparame-ter, Summenparameter) analytisch begleitet. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse wurden in weiterer Folge in einer Matrix visualisiert und Key-Faktoren für eine erfolgreiche Integration der Technologie im betrieblichen und kommunalen Wassermanagement definiert.

Zur Evaluierung und Erprobung der Technologie wurden Sauerstoffeintragsversuche und Versuche zur Eliminierung seuchenhygienisch relevanter Keime durchgeführt. Bei den Sauerstoffeintragsversuchen wurden Absorptions- und Desorptionsversuche mit technischem Sauerstoff und Luftsauerstoff in Reinwasser und Abwässern aus der Papierindustrie durchgeführt. Bei der Absorptionsmessung wurde dabei die Sauerstoffzufuhr aus dem Anstieg des zuvor zur Begasung mit Stickstoff künstlich abgesenkten Sauerstoffgehaltes bestimmt, wobei über das Gaseintragssystem technischer Sauerstoff und Luftsauerstoff unter identen Bedingungen in das wässrige Medium eingebracht wurde. Bei der Desorptionsmessung wurde die Sauerstoffzufuhr aus der Abnahme des zuvor künstlich erhöhten Sauerstoffgehaltes bestimmt, wobei lediglich technischer Sauerstoff bis zu einer vorab definierten Sättigung eingebracht wurde. Die Sauerstoffgehalte wurden mittels Sauerstoffelektroden kontinuierlich über eine Dauer von > 60 min aufgezeichnet und ausgewertet.

Zur Überprüfung der bakteriziden Wirkung von CO₂ wurden Versuchsreihen mit Indikatorkeimen durchgeführt, wobei bei der Austestung des hemmenden Effektes in einer ersten Versuchsreihe unterschiedliche CO₂ Konzentrationen angereichert mit einem Vollmedium (Standart-I-Nährbouillon MERCK) herangezogen wurde. Die jeweiligen Verdünnungsstufen wurden mit Vorkulturen aus einer Anreicherung einer Biogasgülle bzw. E-coli beimpft und in einem Schüttelinkubator über 24 Stunden bei Raumtemperatur inkubiert. Nach Inkubationszeiten von 0,5 bzw. 24 Stunden wurden die Keimkonzentrationen bestimmt, wobei diese mittels eines Bac Trac Impedanzanalysators erfolgte. Dabei handelt es sich um ein mikrobiologisches Detektionssystem basierend auf der elektrischen Impedanzmessung. Durch mikrobiologische Stoffwechselvorgänge kommt es dabei zu einer Veränderung der Ionenkonzentration

im Kulturmedium und an der Oberfläche der Messelektroden, wobei das Messgerät in spezifischer Weise die daraus resultierenden zeitlichen Änderungen der Impedanz registriert.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden zwei Kulturen aus einer Anreicherung aus Biogasgülle über 24 Stunden durch Belüften mit Luftsauerstoff inkubiert, wobei in weiterer Folge eine Kultur über das Gaseintragsystem mit CO₂ begast wurde. Die zweite Kultur wurde zum Zwecke der Referenzmessung weiterhin mit Luftsauerstoff begast. Die Probenahme erfolgte kontinuierlich, um die zeitliche Abnahme der Keimkonzentration zu bestimmen.

Im Zuge der Durchführung der halbtechnischen Versuche wurden Versuche zum oxidativen Abbau organischer Substanzen durch Begasung mit technischem Sauerstoff durchgeführt. Mit dem Verfahren der chemischen Oxidation können verschiedene, vornehmlich organische Abwasserinhaltsstoffe vollständig oder teilweise oxidiert werden. Bei der vollständigen Oxidation wird der organische Kohlenstoff zu CO₂ oxidiert, die unvollständige Oxidation dient vor allem dazu, biologisch schwer abbaubare Verbindungen in biologisch leichter abbaubare Verbindungen umzuwandeln, um diese in weiterer Folge in einer biologischen Stufe weitgehend abzubauen. Um die oxidative Wirkung durch Begasung mit technischem Sauerstoff und der im Reaktor ablaufenden chemischen Oxidation zu untersuchen, wurden im Rahmen von Pilotversuchen (Fallstudie I) definierte Abwassermengen und -frachten über eine Zirkulationspumpe über das Gaseintragsystem im Kreislauf geführt und mit technischem Sauerstoff angereichert. Des Weiteren wurde in diesem Zusammenhang Sauerstoffeintragsversuche und Abbauprobversuche in einer Technikumsanlage mit Abwasser einer Papierfabrik (Ablauf Anaerobie) durchgeführt.

4.2 Beschreibung des Standes der Technik und des Innovationsgehaltes der Projektes

Laut Patentinhaber beruht das der Technologie zugrunde liegende Verfahrensprinzip auf Kavitation, wodurch eine effiziente Anreicherung von Gasen in Flüssigkeiten ermöglicht wird.

Grundsätzlich versteht man unter Kavitation das Entstehen und Implodieren von Gasblasen in einer Flüssigkeit, wobei diese bei lokalem Unterdruck in einer Flüssigkeit, beispielsweise in stark beschleunigten Strömungen oder in der Unterdruckphase einer Schallwelle, entstehen. Bei höherem Druck fallen diese Kavitationsblasen wieder in sich zusammen, wobei erhebliche Kräfte auftreten können. So tritt die Kavitation in Hochdruckhomogenisatoren durch die starke radiale Beschleunigung des Fluids auf, wodurch eine starke Durchmischung disperser Systeme¹ erzielt werden kann [Schubert, 2005]. Bei der Rückbildung des homogenen Zustandes (Entmischung) zeigt die kavitierte Flüssigkeit eine mehr oder weniger lang andauernde Trübe und einen Tyndall-Effekt². Dies bedeutet in anderen Worten, dass die Dissolutions-Geschwindigkeit der Gase geringer ist als es ihre Entbindungs-Geschwindigkeit aufgrund der Kavitation war. In der Verfahrenstechnik kann die Kavitation zum Mischen, Emulgieren, Ent-

¹ Als disperses System wird ein Stoffgemisch aus mindestens zwei nicht oder nur kaum ineinander löslichen festen, flüssigen oder gasförmigen Phasen bezeichnet.

² Der Tyndall-Effekt beschreibt die Streuung von Licht an submikroskopischen Schwebeteilchen, mit Abmessungen ähnlich der Lichtwellenlänge.

gasen etc. angewandt werden und dabei bis zu einem gewissen Grade entsprechende Ultraschall-Anordnungen ersetzen [Auerbach, 1950].

Die im Projekt untersuchte Vorrichtung zur Gaseinbringung in Flüssigkeiten wurde vom Patentinhaber bis dato im Bereich der Getränkeindustrie zur Abfüllung O₂-haltiger Getränke bzw. im Bereich von Fischzuchtanlagen zur Anreicherung der Aquakultur mit Sauerstoff eingesetzt. Da im Zuge des Projektes neue Anwendungsmöglichkeiten der Technologie im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft durch Anreicherung von flüssigen Medien mit O₂ und CO₂ und deren Einfluss auf diese Medien untersucht wurde, soll nachstehend auf ausgewählte Technologienentwicklungen in vergleichbaren/ähnlichen Anwendungsfeldern eingegangen werden.

So entwickelte beispielsweise R.E. Wildasin im Jahre 1999 ein kontinuierliches Verfahren, bei dem eine zu entkeimende Flüssigkeit und CO₂ auf Prozessdruck verdichtet und in einem statischen Mischer miteinander vermischt werden. Zur Verlängerung der Behandlungszeit wird die Mischung durch eine mehrere Meter lange Rohrspirale gefördert, bis diese über ein Ventil entspannt wird. Durch Einsatz der Technologie wurden Enterohämorrhagische E. coli, Listeria monocytogenes, Salmonella typhimurium, Bierhefe oder natürliche Keime in Orangensaft von 5 bis 10 Minuten um bis zu 6 Zehnerpotenzen abgetötet [Daiminger, 2005].

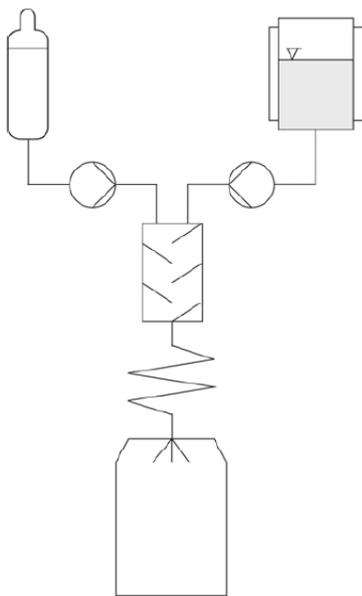


Abbildung 3: Schema des Verfahrens nach R.E. Wildasin [Bildquelle: Daiminger, 2005]

Im Gegensatz dazu entwickelte M. Sims im Jahre 2000 ein Verfahren, bei dem die Entkeimung in einem Hochdruck-Hohlfaser-Reaktor mit kohlendioxiddurchlässiger Membran erfolgt. Die zu entkeimende Flüssigkeit und das CO₂ strömen dabei durch eine Membran getrennt durch den Reaktor, wobei aufgrund von Konzentrations- oder Druckunterschieden CO₂ durch die Poren der Membran in die Flüssigkeit diffundiert. E.coli und L.plantarum werden dabei bei 15 MPa innerhalb von 10 Minuten um mehr als 8 Zehnerpotenzen abgetötet [Daiminger, 2005].

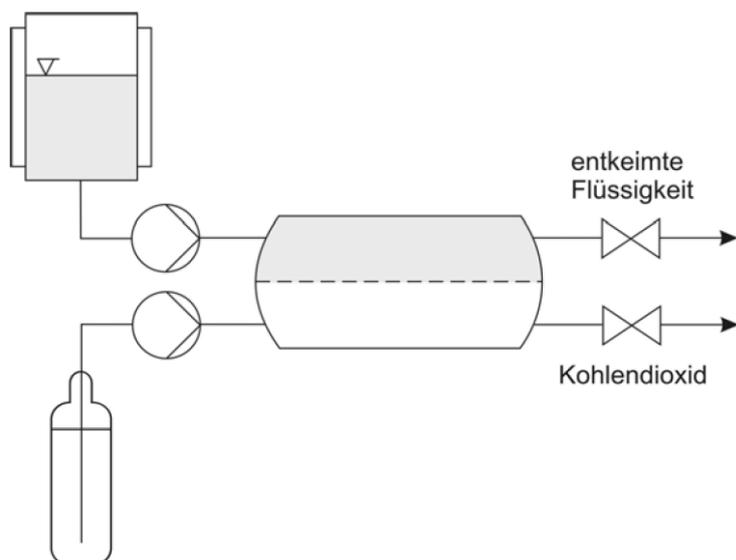


Abbildung 4: Schema des Verfahrens nach M.Sims [Bildquelle: Daiminger, 2005]

Die Anwendungen im Hochdruckbereich erfolgen dabei vor dem Hintergrund der erhöhten Löslichkeit von Gasen bei hohen Drücken. Statische Mischer wie bei der Technologieentwicklung von R.E. Wildasin, werden zur leistungsfähigen Gasverteilung in unterschiedlichen Anwendungsgebieten der Verfahrenstechnik eingesetzt. Dabei steht die effektive Durchmischung/ Vermischung des Gases (CO_2 , O_2 , O_3 , etc.) mit der Wasserströmung bzw. dem flüssigen Medium im Vordergrund. Im Gegensatz zu dynamischen Mixern findet demnach kein Rühren statt, sondern das zu mischende Medium wird kontinuierlich über Pumpen zu einem Mischrohr gefördert.

Ferner wurden für den Bereich der biologischen Abwasserreinigung spezielle Vorrichtungen und Technologien entwickelt, die lt. Herstellerangaben eine besonders intensive Sauerstoff-Begasung und eine feine Verteilung des Sauerstoffs im Abwasser/Belebtschlammgemisch gewährleisten. Beim Einsatz von reinem Sauerstoff haben sich dabei Begasungsschläuche, Membranbelüfter, Tellerbelüfter, Injektoren oder statische Mischer bewährt, wobei die Wahl des Systems wesentlich von der Anwendung und den örtlichen Gegebenheiten bestimmt wird. Als wichtige Parameter im Bereich der biologischen Abwasserreinigung werden diesbezüglich die Parameter Beckengeometrie sowie die Kosten zur Energiebereitstellung genannt. Nicht zu vernachlässigen sind in diesem Zusammenhang allerdings zusätzlich anfallende Kosten durch die Bereitstellung von Rein-Sauerstoff und notwendiger Sicherheitsvorkehrungen (Lagerung, Verwendung öl- und fettfreier Armaturen, Ventile, etc.) im Betrieb.

In der Literatur finden sich unzählige Beispiele von Sauerstoffeintrags-Konzepten auf Basis von Rein-Sauerstoff Begasungssystemen. Im Vordergrund steht dabei vielfach die nachträgliche Integration dieser Systeme zur Abdeckung von Spitzenlasten bzw. dem gezielten Einsatz von Reinsauerstoff-Begasungssystemen zur Erhöhung der Kapazität vorhandener biologischer Abwasserreinigungsanlagen. Diese Begasungssysteme sind vielfach für den kurzfristigen, teilweise aber auch für den permanenten Betrieb als Einzel- und Zusatzbegasungssystemen konzipiert.

So stellt beispielsweise das LINDOX[®] Verfahren ein modifiziertes Belebungsverfahren dar, bei dem die Sauerstoffzufuhr durch Zufuhr von reinem Sauerstoff im permanenten Betrieb abgedeckt wird. Um eine maximale Sauerstoffausnutzung sicherzustellen, werden zudem geschlossene Bioreaktoren in Kaskadenbauweise verwendet. Gasförmiger Sauerstoff wird dabei im Gasraum über dem Flüssigkeitsspiegel der ersten Kaskade eingespeist und mit Oberflächenbelüftern in die Flüssigphase eingetragen.

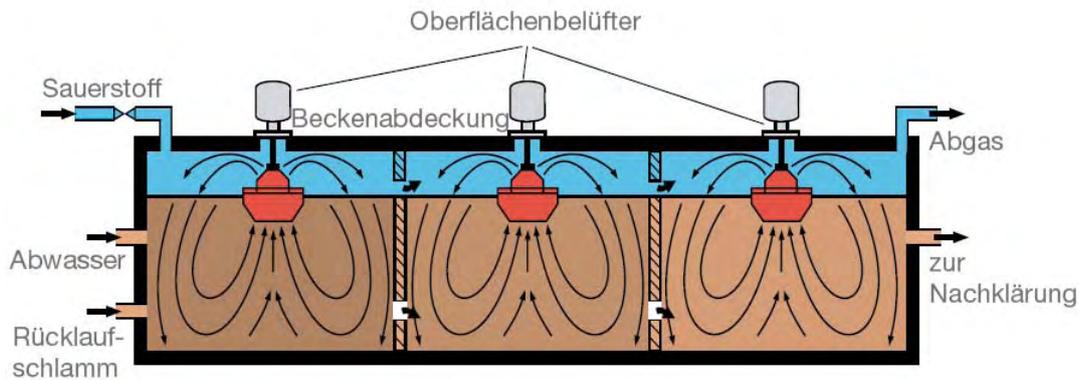


Abbildung 5: Schema des LINDOX[®] Verfahrens [Bildquelle: Strabag Umwelthanlagen GmbH, 20.11.2008]

Als Vorteile des Verfahrens werden die höhere Belebtschlammkonzentration und einer gegenüber herkömmlichen Belebungsanlagen geringeren Reaktorvolumens genannt [Strabag Umwelthanlagen GmbH, 20.11.2008].

Mit dem Ventoxal-System wird demgegenüber ein Belüftungssystem durch Installation direkt im Abwasserbecken angeboten. Der Sauerstoff wird dabei über eine spezielle Zweiphasen-Düse feinblasig in dem vor der Pumpe beschleunigten Wasserstroms eingebracht. Der Primärstrom des sauerstoffangereicherten Wassers vermischt sich über das Ejektorsystem mit einem etwa vierfachen Sekundärstrom. Durch die dabei erzeugte hohe Turbulenz lassen sich große Sauerstoffmengen in das Belebungsbecken effizient eintragen.

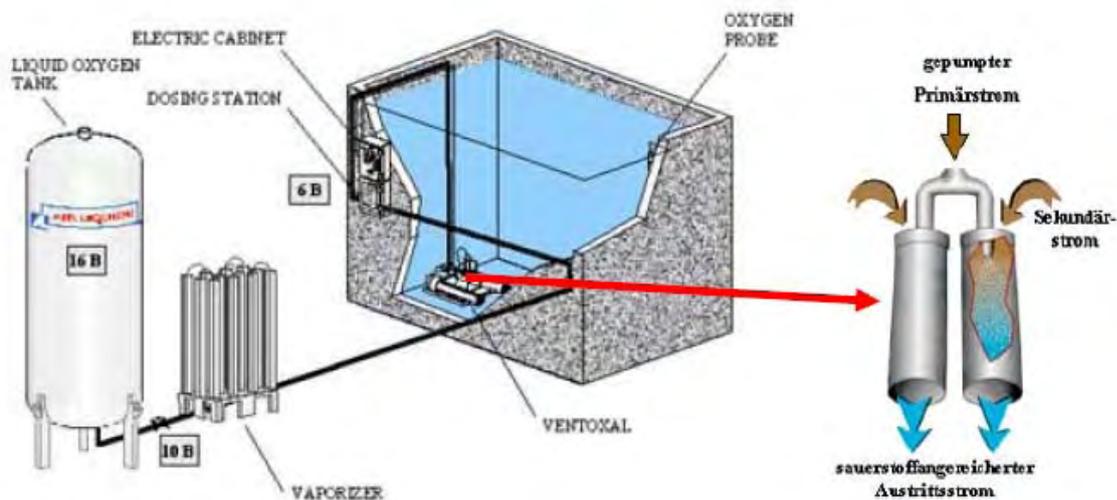


Abbildung 6: Schema des Ventoxal-Systems [Bildquelle: Airliquide, 05.05.2011]

Der erforderliche Sauerstoff wird durch das System auf zwei Arten eingetragen: Zum einen in Form von mit Sauerstoff übersättigtem Wasser, zum anderen als fein verteilte Sauerstoffbläschen. Als Vorteile dieses Systems werden u.a. die einfache Installation bei laufendem Betrieb, die hohe Sauerstoffeintragskapazität, gute Durchmischung des Beckens und effiziente Sauerstoffausnutzung genannt [Airliquide, 05.05.2011].

In den letzten Jahren wurden also Technologien und Anwendungssysteme entwickelt, die der im Rahmen des Projektes INNOWATEC untersuchten Technologie in vielen belangen ähneln

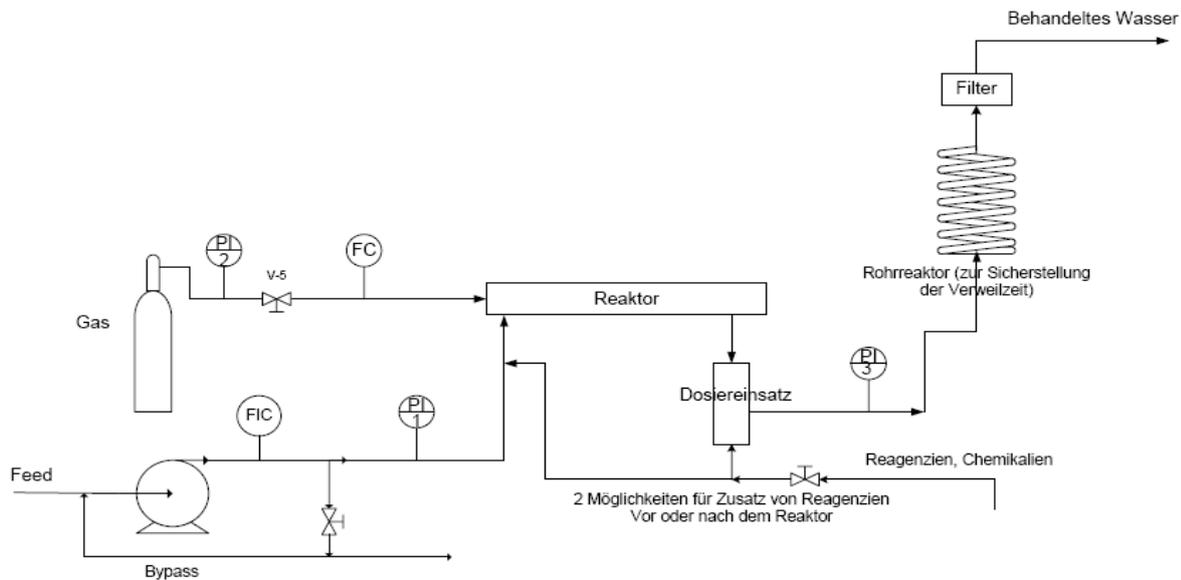


Abbildung 7: Verfahrensschema Laboranlage inkl. Gaseintragsystem (Reaktor)

So ist wie bei der Technologie von R.E. Wildasin (siehe Abbildung 3) entwickelten Technologie eine Anlagenkomponente zur Erhöhung der Behandlungszeit/Verweilzeit im System integriert. Mittels des im untersuchten System integrierten Rohrreaktors soll eine hohe Verweilzeit und demnach eine bestmögliche Einbindung des in das flüssige Medium eingetragenen Gases garantiert werden. Des Weiteren wird im Gaseintragsystem (Reaktor) aufgrund der schraubenförmigen Spirale eine Rotationsbewegung mit einer daraus resultierenden hohen Strömungsgeschwindigkeit des eingebrachten flüssigen Mediums erzeugt. Durch die starke radiale Beschleunigung des Fluids kann von einer starken Durchmischung nach erfolgter Anreicherung der Fluids mit dem Gas über die Membran ausgegangen werden. Dadurch wird das Fluid bei Einsatz von technischem Sauerstoff einerseits mit Sauerstoff übersättigt, zum anderen erfolgt eine feine Verteilung des eingebrachten Sauerstoffes in der Form von Gasbläschen.

Grundsätzlich ist die Löslichkeit eines Gases, das mit Wasser nicht chemisch reagiert, proportional dem Partialdruck des Gases über die Flüssigkeit. Die Flüssigkeit ist also gesättigt, wenn der Partialdruck des Gases in Luft und Flüssigkeit gleich ist. Die Löslichkeit ist des Weiteren von der Wassertemperatur abhängig und nimmt mit steigender Temperatur des Fluids ab. Für die sich einstellende Sättigungskonzentration $C_{ss,T}$ des Gases gilt das Henrysche Gesetz ($C_{ss,T} = k_{ss,t} \cdot p_T$)³.

³ $C_{ss,T}$ = Sättigungskonzentration; $k_{ss,t}$ = temperaturabhängiger Löslichkeitskoeffizient; p_T = Partialdruck des Gases

Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist die Löslichkeit der Gase im Wasser sehr unterschiedlich, wobei diese im Allgemeinen umso leichter löslich sind, je höher deren Siedepunkt ist [Grombach et al, 2000].

| | Absorptionskoeffizient in ml Gas/l Wasser bei | | | | ρ_0 Dich- te* in g/l | Löslichkeit** in g m ⁻³ bei | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------------|----------------------------------------|-------|------|------|
| | 0°C | 10°C | 20°C | 30°C | | 0°C | 10°C | 20°C | 30°C |
| Stickstoff | 0,023 | 0,019 | 0,016 | 0,014 | 1,25 | 28,8 | 22,6 | 18,6 | 15,9 |
| Sauerstoff | 0,049 | 0,038 | 0,031 | 0,027 | 1,43 | 69,5 | 53,7 | 43,3 | 35,9 |
| Kohlendioxid | 1,71 | 1,19 | 0,88 | 0,67 | 1,98 | 3350 | 2320 | 1690 | 1260 |
| Wasserstoff | 0,022 | 0,020 | 0,018 | 0,017 | 0,09 | 1,92 | 1,74 | 1,60 | 1,47 |
| Ammoniak | 1,30 | 0,91 | 0,71 | - | 0,77 | 1000 | 690 | 540 | - |
| Schwefel- wasserstoff | 4,69 | 3,52 | 2,67 | - | 1,52 | 7100 | 5300 | 4000 | - |
| Chlor | 4,61 | 3,10 | 2,26 | 1,77 | 3,17 | 14600 | 9700 | 7000 | 5370 |
| Ozon | 0,64 | 0,52 | 0,37 | 0,23 | 2,14 | 1360 | 1100 | 7700 | 470 |
| Luft | 0,029 | 0,033 | 0,019 | 0,016 | 1,29 | | | | |
| davon | | | | | | | | | |
| 78,0 Vol.-% Stickstoff | | | | | | 22,4 | 17,45 | 14,2 | 11,9 |
| 20,99 Vol.-% Sauerstoff | | | | | | 14,5 | 11,1 | 8,9 | 7,2 |
| 0,03 Vol.-% Kohlendioxid | | | | | | 1,0 | 0,70 | 0,51 | 0,38 |

Tabelle 1: Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von Gasen [Quelle: Grombach et al, 2000]

In der nachstehenden Graphik (Abbildung 8) sind die Sättigungskonzentrationen [mg/l] von luftgesättigtem (Luftsauerstoff) und sauerstoffgesättigten (techn. Sauerstoff) Wasser im Gleichgewicht mit wasserdampfgesättigter Luft bei einem Atmosphärendruck von 1.013 hPa und in Abhängigkeit von der Wassertemperatur dargestellt.⁴ Die anteilmäßig höhere Sättigungskonzentration von sauerstoffgesättigten Wasser gegenüber luftgesättigtem Wasser resultiert aus der Einbringung von technischem Sauerstoff mit $\geq 99,5$ Vol.% O₂.

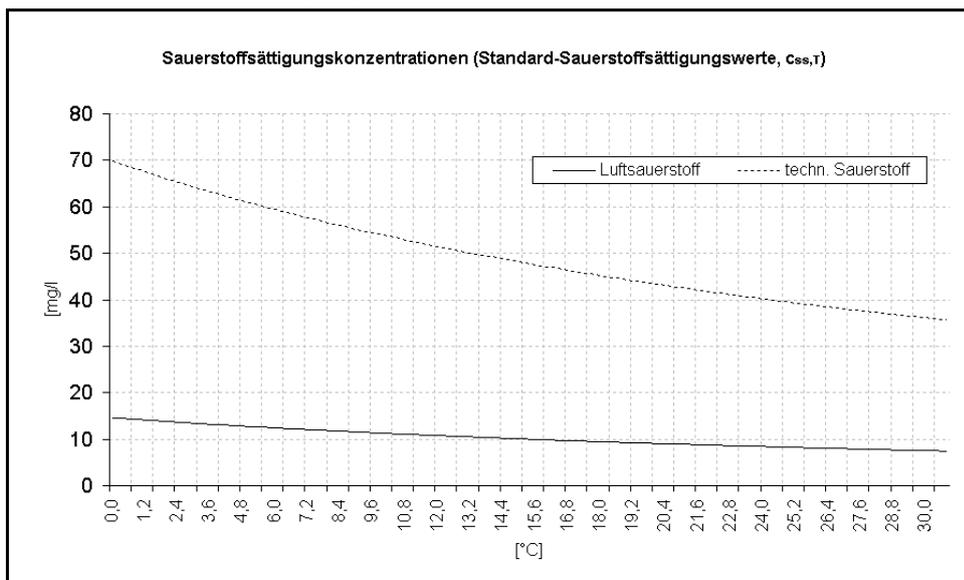


Abbildung 8: Sauerstoffsättigungskonzentration nach DIN EN 25814

⁴ Die Sättigungskonzentrationen für Luftsauerstoff entsprechen den Werten aus EN 25814 (1992) bzw. DIN 38408, Teil 23 (Quelle: ATV-M 209, 1996)

In der Regel wird bei fast allen Belüftungssystemen der für die Lebenstätigkeit der aeroben Mikroorganismen in biologischen Reinigungsanlagen notwendige Sauerstoff allerdings durch atmosphärische Luft in das Wasser eingetragen. Reinsauerstoff-Verfahren finden primär Verwendung, wenn bei hochkonzentrierten Abwässern lediglich die Reduktion der organischen Verbindungen gefordert wird. Um den daraus hohen Sauerstoffbedarf zu decken, kann eine Reinsauerstoffbegasung günstig sein, auch vor dem Hintergrund wenn aufgrund von Geruchsproblemen eine geringe Abluftmenge gewünscht ist. Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen ist jedoch wegen des hohen Energieaufwandes kritisch zu prüfen (der Energieaufwand für den Sauerstoffeintrag beträgt ca. 0,25 – 0,3 kWh/kg O₂ und für die Sauerstofferzeugung ca. 0,4 – 0,45 kWh/kg O₂) [Görner et al, 1999].

Zusammenfassend sollen Belüftungssysteme nach v.d. Emde folgende Forderungen erfüllen [v.d. Emde aus Frey, 1998]

- Ausreichende Sauerstoffzufuhr, um den Sauerstoffbedarf zu decken. Eine den Belastungsverhältnissen entsprechende Regelbarkeit der Sauerstoffzufuhr.
- Intensive Durchmischung des Abwasser-Schlamm-Gemisches zur gleichmäßigen Verteilung des Sauerstoffes in der Flüssigkeit bei einem angestrebten Sauerstoffgehalt von 2 mg/l.
- Ausreichende Turbulenz, um Ablagerungen zu vermeiden und um die Schlammflocken mit den festen und gelösten Stoffen des Abwassers intensiv zu durchmischen.
- Große Betriebssicherheit, geringe Verstopfungsanfälligkeit der Poren oder Bohrungen bei Druckbelüftern. Freihalten der Schaufeln und Leitkanäle der Kreisbelüfter von Faserstoffen.
- Keine Belästigung durch Gerüche, Aerosole und Lärm.
- Niedrige Herstellungskosten für die Belebungsbecken und das dazugehörige Belüftungssystem. Geringer Energieaufwand für Sauerstoffeintrag, Umwälzung und Durchmischung.
- Beständigkeit gegen mechanischen und chemischen Angriff. Geringer Wartungsaufwand für Belüfter, Gebläse und Motoren.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuche wurden daher unter Berücksichtigung der vorab angeführten Ausführungen ausgerichtet, um das untersuchte Gaseintragsystem hinsichtlich seiner Tauglichkeit zur Optimierung spezifischer Anwendungsfelder im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft zu evaluieren und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Anwendungsmöglichkeiten waren dabei vor allem in Bereichen zu erwarten, die eine flexible Anpassung bestehender Systeme und eine leistungsfähige Gasverteilung in Fluiden fordern

4.3 Beschreibung der Projektergebnisse

Neben der Evaluierung möglicher Einsatzgebiete des Gaseintragsystems und der Analyse daraus ableitbarer Optimierungspotentiale wurden auf Basis unterschiedlicher Versuchs- und Technologieanordnungen Versuche zur Verifizierung der vorab identifizierten Anwendungsmöglichkeiten im Labormaßstab bzw. großtechnischen Maßstab durchgeführt. Schwerpunktmäßig wurden hierzu Versuchsreihen hinsichtlich der Einbringung von Sauerstoff in biologi-

sche Abwasserreinigungssysteme, zur verbesserten Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs, zum verbesserten Abbau organischer Substanzen durch Einsatz bioaktiver Präparate, zur Neutralisation mittels CO₂-Begasung und zur bakteriziden Wirkung von CO₂ durchgeführt.

4.3.1 CO₂ Eintragsversuche (Laborversuche)

Zur Bestimmung der durch Begasung über das Gaseintragsystem in das Leitungswasser dissoziierten Menge an CO₂, wurden die Parameter TC (Total Carbon) und TOC (Total Organic Carbon) über einen Carbon – Analyser (Shimadzu 5050A) analysiert. Auf Basis der beiden Summenparameter TC und TOC wurde in weiterer Folge der anorganische Kohlenstoffanteil (TIC) in der Probe mathematisch bestimmt. In Abhängigkeit der chemisch-physikalischen Bedingungen kann anorganischer Kohlenstoff in unterschiedlichen Formen vorliegen. Zum einen dissoziiert gelöstes CO₂ in Hydrogenkarbonat (HCO₃⁻) und Karbonat (CO₃²⁻), zum anderen besteht ein Gleichgewicht zwischen CO₂ in der Gasphase und der flüssigen Phase. Bei der Ermittlung der max. CO₂ Anreicherung wurden drei Versuche auf Basis unterschiedlicher Versuchsanordnungen durchgeführt.

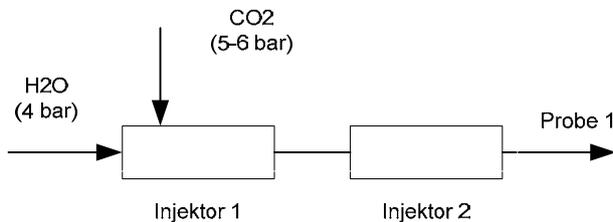


Abbildung 9: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 1

Bei Versuchsanordnung 1 (siehe Abbildung 9) wurden dabei zwei CO₂ – Injektoren (siehe Abbildung 10) eingesetzt, wobei über den ersten Injektor Leitungswasser (Grazer Stadtwasser) mit einem durchschnittlichen Gasdruck von 5 [bar] mit CO₂ begast wurde. Injektor 2 wurde zur besseren Durchmischung des mit CO₂ angereicherten Wassers dem Injektor 1 nachgeschaltet.



Abbildung 10: CO₂-Injektor

Bei Versuchsanordnung 2 (siehe Abbildung 11) wurde Leitungswasser (Grazer Stadtwasser) über das Gaseintragsystem (siehe Abbildung 12) mit einem durchschnittlichen Gasdruck von 6 [bar] mit CO₂ begast. Dem Gaseintragsystem wurde zur besseren Einmischung des eingebrachten CO₂ ein Einbindemodul nachgeschaltet.

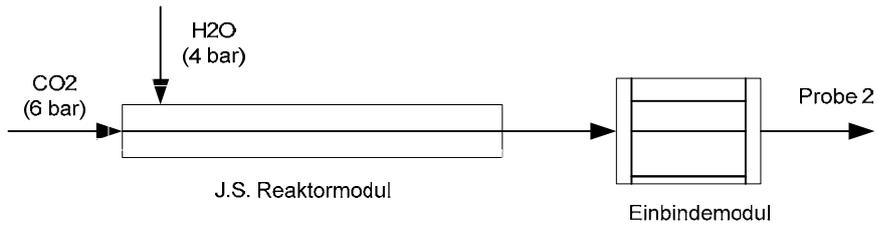


Abbildung 11: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 2



Abbildung 12: Vorrichtung zur Gaseinbringung in Flüssigkeiten - Gaseintragsystem

Bei Versuchsvariante 3 (siehe Abbildung 13) wurden die beiden Injektoren als auch das Gaseintragsystem zur Begasung von Probe 3 eingesetzt. Dabei wurde das Leitungswasser (Grazer Stadtwasser) über Injektor 1 mit einem Gasdruck von 6 [bar] mit CO₂ begast. Injektor 2, das Gaseintragsystem als auch das Einbindemodul wurden Injektor 1 zur besseren Durchmischung des angereicherten Wassers nachgeschaltet.

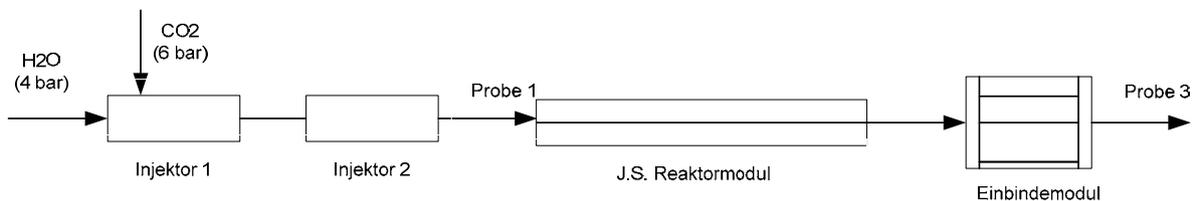


Abbildung 13: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 3

Um den Zeitpunkt bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes in den mit CO₂ übersättigten Proben zu bestimmen, wurden in weiterer Folge Untersuchungen zum Ausgasverhalten der jeweiligen Probe durchgeführt. Auf Basis der Versuchsanordnung 1 konnte durch CO₂ Begasung (Ausgangskonzentration TC = 59,53 [mg/l]) der Kohlenstoffanteil (TC) auf 132 [mg/l] erhöht werden.

Abzüglich des als organischer Kohlenstoff vorliegenden Anteils in der Probe (TOC < 1,5 [mg/l]) konnte über die beiden Injektoren der TIC (Total Inorganic Carbon) um rund 72 [mg/l] erhöht werden. Die in der Probe vorkommende anorganische gelöste Kohlenstoffformen sind wie bereits erwähnt Kohlenstoffdioxid (CO₂), Hydrogenkarbonat (HCO₃⁻), Karbonat (CO₃²⁻) und Kohlensäure (H₂CO₃), wobei der Anteil an Kohlensäure vernachlässigt werden kann, da nur ein geringer Anteil (~ 0,3% in Abhängigkeit von der Temperatur) des CO₂ mit H₂O zu Kohlensäure reagiert.

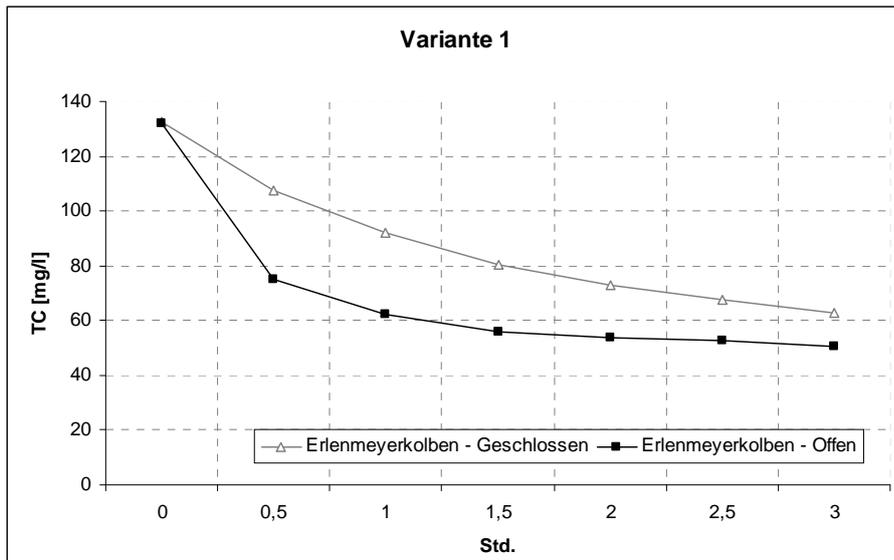


Abbildung 14: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 1

Da der pH-Wert vom aktuellen CO_2 Gehalt im Wasser bestimmt wird, können über den nach der Begasung ermittelten pH-Wert von $\sim 5,8$ (pH-Wert Absenkung von 7,4 auf 5,8) Rückschlüsse auf den in der flüssigen Phase vorliegenden Anteil an CO_2 gezogen werden. Des Weiteren ist im vorliegenden pH-Bereich von 5,8 – 7,4 das Dissoziationsgleichgewicht zwischen HCO_3^- und CO_2 als der bestimmende Zusammenhang zu nennen. Bei der ermittelten Ausgangskonzentration von $\text{TIC} = 58 \text{ [mg/l]}$ und einem pH-Wert von 7,4 kann in der vorliegenden Probe von einem Anteil von rund 90% an Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) in gelöster Form ausgegangen werden.

Nach Begasung der Probe mit CO_2 verschiebt sich das Dissoziationsgleichgewicht zu Gunsten des CO_2 - Anteils, wobei beim ermittelten pH-Wert von 5,8 mit einem CO_2 - Anteil (flüssige Phase) von rund 80% gerechnet werden kann. Somit kann in der betrachteten Probe von $> 105 \text{ [mg/l]}$ an Kohlendioxid in dissoziierter Form ausgegangen werden.

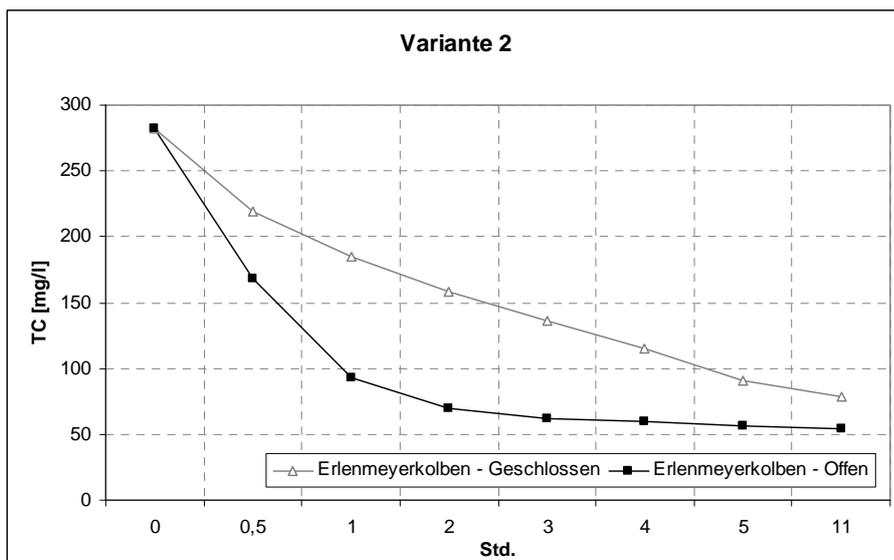


Abbildung 15: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 2

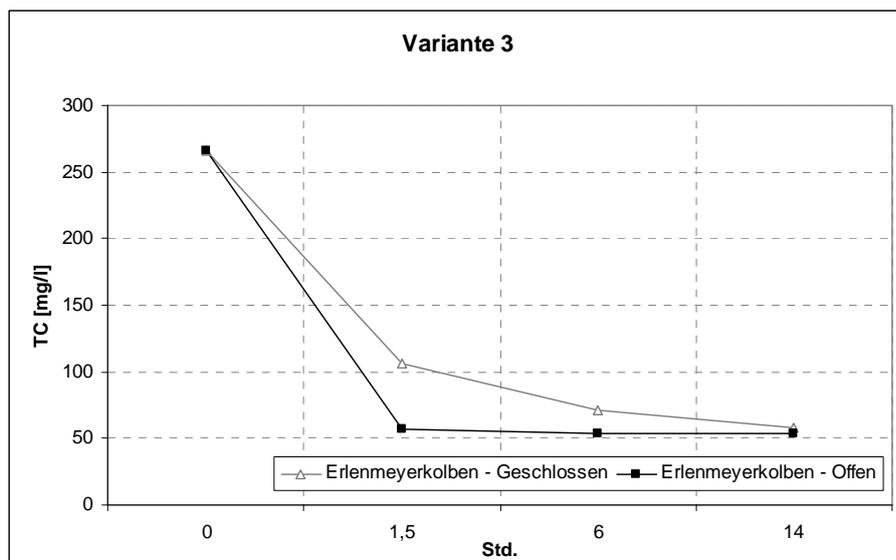


Abbildung 16: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 3

Auf Basis der Versuchsanordnung 2 konnte die größte Menge an CO_2 durch Begasung (Ausgangskonzentration $\text{TC} = 63,3 \text{ [mg/l]}$) in die Probe eingebracht werden, wobei der Kohlenstoffanteil auf rund $281,9 \text{ [mg/l]}$ erhöht werden konnte. Da der organische Kohlenstoffanteil vernachlässigbar gering war, kann in der vorliegenden Probe von einem anorganischen Kohlenstoffanteil von rund 280 [mg/l] ausgegangen werden (Hauptanteil als CO_2 in flüssiger Phase). Auf Basis der Versuchsanordnung „Variante 3“ konnte keine höhere CO_2 – Sättigung in der Probe festgestellt werden.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes, so ist ersichtlich, dass sich beim offenen System nach rund $1 \frac{1}{2}$ Stunden wiederum der Gleichgewichtszustand zwischen CO_2 in der Gasphase und der flüssigen Phase einstellt. Dieser zeitliche Verlauf zeigte sich bei allen 3 Varianten (Versuchsanordnungen) in gleicher Weise. Beim geschlossenen System stellt sich der weitgehende Gleichgewichtszustand nach rund 10 Stunden ein.

4.3.2 CO_2 Entkeimungsversuche (Laborversuche)

Zur Überprüfung der bakteriziden Wirkung von CO_2 wurden drei Versuchsreihen mit Indikatorkeimen durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wurde das mit CO_2 begaste Wasser auf Basis der Versuchsvariante 1 mit einer max. TIC von $130,5 \text{ [mg/l]}$ herangezogen. Wie erwähnt kann bei der betrachteten Probe von einer CO_2 Konzentration (flüssige Phase) von $> 105 \text{ [mg/l]}$ ausgegangen werden. Zur Austestung eines hemmenden Effektes wurden unterschiedliche CO_2 -Konzentrationen, (0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% der unter 2.1. Variante 1 beschriebenen Probe), angereichert mit einem Vollmedium (Standard-I-Nährbouillon MERCK), zur Sicherstellung einer optimalen Nährstoffversorgung, herangezogen.

Zusätzlich wurde eine Zulaufmischprobe der Papierfabrik aus Fallstudie I unter identen Bedingungen analysiert. Die jeweiligen Verdünnungsstufen wurden mit Vorkulturen aus einer Anreicherung einer Biogasgülle bzw. E.coli beimpft und in einem Schüttelinkubator über 24 Stunden bei Raumtemperatur inkubiert. Nach Inkubationszeiten von 0,5 bzw. 24 Stunden wurde

die Keimkonzentration bestimmt. Dies erfolgte mittels eines Bac Trac Impedanzanalysators. Dabei handelt es sich um ein mikrobielles Detektionssystem basierend auf der elektrischen Impedanzmessung. Durch die mikrobiellen Stoffwechselfvorgänge kommt es zu einer Veränderung der Ionenkonzentration im Kulturmedium und an der Oberfläche der Messelektroden. Das Messgerät registriert in spezifischer Weise die daraus resultierenden zeitlichen Änderungen der Impedanz.

Versuchsreihe I: Indikatorkeime – Anreicherungspopulation aus Biogasgülle
 Medium: Standard I Nährbouillon, CO₂ Konzentrationen 0-100% des Testwassers

Versuchsreihe II: Indikatorkeime – Escherichia coli
 Medium: Standard I Nährbouillon, CO₂ Konzentrationen 0-100% des Testwassers

Versuchsreihe III: Indikatorkeime – Anreicherungspopulation aus Biogasgülle
 Medium: Zulaufprobe Papierfabrik aus Fallstudie 1, CO₂ Konzentrationen 0-100% des Testwassers

| Werte = Anzahl KBE 22°C/ml | | | | | | |
|------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inkubationszeit = 30 Minuten | | | | | | |
| | I/0 | I/20 | I/40 | I/60 | I/80 | I/100 |
| | 1,76E+05 | 1,65E+05 | 2,02E+05 | 2,19E+05 | 2,32E+05 | 1,64E+05 |
| | 1,36E+05 | 1,77E+05 | 1,99E+05 | 2,14E+05 | 2,62E+05 | 1,57E+05 |
| MW | 1,56E+05 | 1,71E+05 | 2,00E+05 | 2,17E+05 | 2,47E+05 | 1,60E+05 |
| Hemmung % | | -9,9 | -28,9 | -39,3 | -58,9 | -3,1 |
| | II/0 | II/20 | II/40 | II/60 | II/80 | II/100 |
| | kein Wachstum | | | | | |
| | III/0 | III/20 | III/40 | III/60 | III/80 | III/100 |
| | 1,64E+05 | 2,37E+05 | 1,08E+05 | 1,41E+05 | 1,46E+05 | 2,08E+05 |
| | 1,82E+05 | 2,45E+05 | 1,23E+05 | 1,17E+05 | 1,47E+05 | 2,16E+05 |
| MW | 1,73E+05 | 2,41E+05 | 1,16E+05 | 1,29E+05 | 1,47E+05 | 2,12E+05 |
| Hemmung % | | -39,0 | 33,2 | 25,6 | 15,5 | -22,4 |

Tabelle 2: Keimkonzentration nach einer Inkubationszeit von 30 Minuten (Versuchsreihen I – III)

| Werte = Anzahl KBE 22°C/ml | | | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Inkubationszeit = 24 Stunden | | | | | | |
| | I/0 | I/20 | I/40 | I/60 | I/80 | I/100 |
| | 6,80E+07 | 6,80E+07 | 5,20E+07 | 7,30E+07 | 6,20E+07 | 5,70E+07 |
| | 7,00E+07 | 5,80E+07 | 5,30E+07 | 7,10E+07 | 6,30E+07 | 5,70E+07 |
| MW | 6,90E+07 | 6,30E+07 | 5,25E+07 | 7,20E+07 | 6,25E+07 | 5,70E+07 |
| Hemmung % | | 8,7 | 23,9 | -4,3 | 9,4 | 17,4 |
| | II/0 | II/20 | II/40 | II/60 | II/80 | II/100 |
| | 3,90E+03 | 1,50E+04 | 5,80E+08 | 3,30E+06 | 1,10E+07 | 3,60E+06 |
| | | 2,60E+04 | 5,10E+08 | 2,70E+06 | 1,10E+07 | 4,10E+06 |
| MW | 3,90E+03 | 2,05E+04 | 5,45E+08 | 3,00E+06 | 1,10E+07 | 3,85E+06 |
| Hemmung % | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | III/0 | III/20 | III/40 | III/60 | III/80 | III/100 |
| | 4,10E+07 | 5,30E+07 | 5,30E+07 | 5,40E+07 | 7,80E+07 | 8,00E+07 |
| | 4,30E+07 | 5,50E+07 | 5,50E+07 | 6,20E+07 | 8,60E+07 | 8,10E+07 |
| MW | 4,20E+07 | 5,40E+07 | 5,40E+07 | 5,80E+07 | 8,20E+07 | 8,05E+07 |
| Hemmung % | | -28,6 | -28,6 | -38,1 | -95,2 | -91,7 |

Tabelle 3: Keimkonzentration nach einer Inkubationszeit von 24 Stunden (Versuchsreihen I – III)

Unter den angeführten Testbedingungen konnten im Vergleich zu bisherigen Erfahrungen der bakteriziden Wirkung von verdichtetem Kohlendioxid, in keiner der Versuchsreihen bakterizide Wirkung auf Basis des mit CO₂ angereicherten Wassers festgestellt werden. In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass bisher vorliegende Untersuchungen aus batch-Kulturen bestenfalls einen orientierenden Charakter aufweisen. Aufgrund des Versuchsaufbaus kann allerdings davon ausgegangen werden, dass ein postulierter Mechanismus des Zelltodes – Ansäuerung innerhalb der Bakterienzelle aufgrund eingeschränkter CO₂ Diffusionsraten bei hohen CO₂-Konzentrationen im Umgebungsmilieu - auszuschließen ist, da sich bei Entspannung bei Umgebungsdruck die Löslichkeit von Kohlendioxid signifikant innerhalb kürzester Zeit reduziert.

Aufbauend darauf wurde daher der Versuchsaufbau adaptiert und Entkeimungstests durch direkte Begasung einer Probe über das Gaseintragsystem durchgeführt. Dabei wurde eine Anreicherungspopulation aus Biogasgülle in der Variante A über einen Zeitraum von 120 Minuten kontinuierlich im Bypass begast. Die Probeentnahme erfolgte im Abstand von t = 30 [min], wobei die Darstellung der entkeimenden Wirkung von CO₂ wiederum über Messung von Indikatorkeimen erfolgte. In der Variante B wurde das Versuchsmedium täglich punktuell über einen Zeitraum von 30 Minuten begast, bei einer Gesamtversuchsdauer von 5 Tagen. Als Referenz wurde die Anreicherungspopulation aus Biogasgülle jeweils in einem zweiten Versuchsbehälter mit Sauerstoff begast.



Abbildung 17: CO₂-Entkeimung durch direkte CO₂-Begasung (Versuchsaufbau Variante A&B)

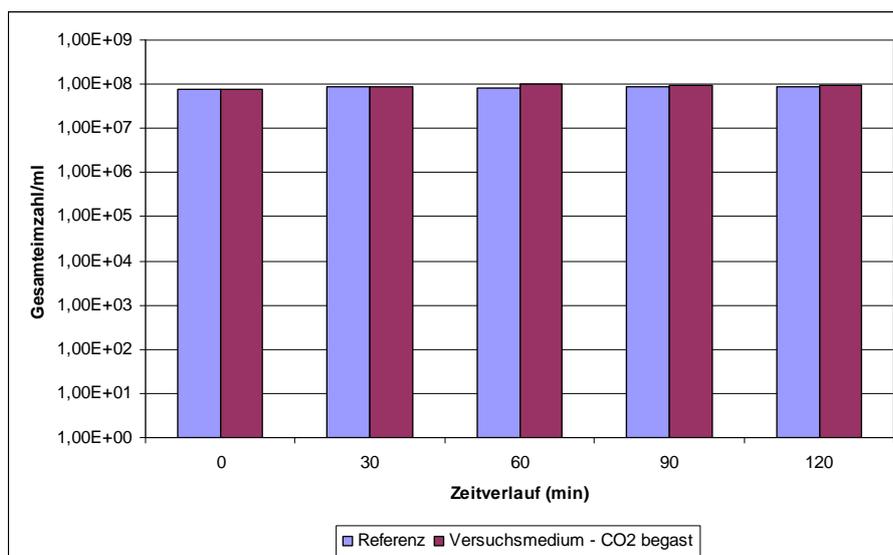


Abbildung 18: Keimhemmende Wirkung durch direkte CO₂-Begasung–Ergebnisse Variante A

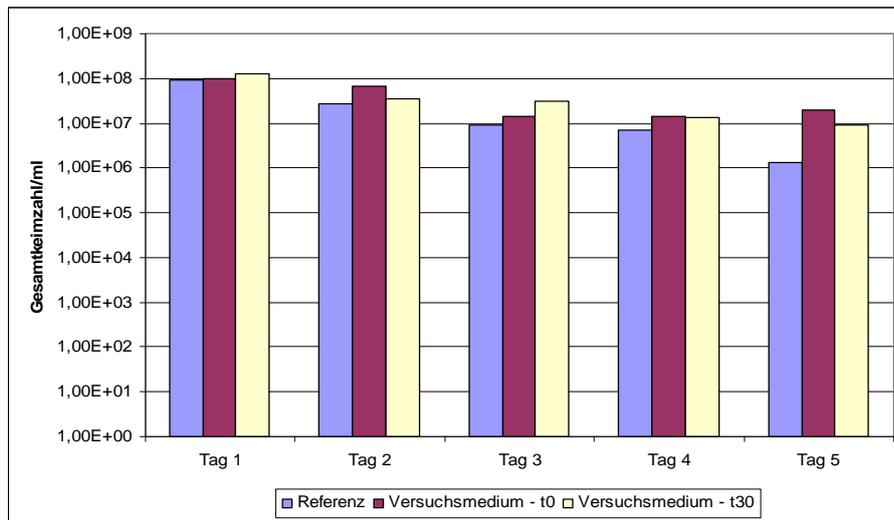


Abbildung 19: Keimhemmende Wirkung durch direkte CO₂-Begasung–Ergebnisse Variante B

Zusammenfassend konnte in beiden Versuchsvarianten (Variante A & B) keine signifikanten Unterschiede der Biomassekonzentrationen zwischen den CO₂ begasten Proben und der jeweiligen Referenz festgestellt werden. Demnach ist auch unter semikontinuierlichen Bedingungen von keiner keimhemmenden Wirkung auszugehen.

4.3.3 O₂ Eintragsversuche (Laborversuche)

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Sauerstoffeintragsystems und zur Verifizierung verfahrenstechnischen Parameter wurden Sauerstoffeintragsversuche mit einer Labor- und Technikumsanlage durchgeführt. Dabei wurden Absorptions- und Desorptionsmessungen in Reinwasser (je nach Versuchsanordnung mit technischen Sauerstoff bzw. Luftsauerstoff) bzw. Desorptionsmessungen in Abwasser einer Papierfabrik (Ablauf der Hochlastbiologie) durchgeführt. Zur Verifizierung der Leistungsmerkmale des untersuchten Gaseintragsystems wurden bei der Durchführung der Versuche die Parameter Sauerstoffzufuhr OC, [kg/h], Sauerstoffkonzentration C_{SS,T} [mg/l], Sauerstofftrag O_p [kg/kWh] und die Abnahme der Sauerstoffkonzentration über einen definierten Zeitraum erfasst und bei der Visualisierung der Vor- und Nachteile der Technologie in Form einer Matrix herangezogen.

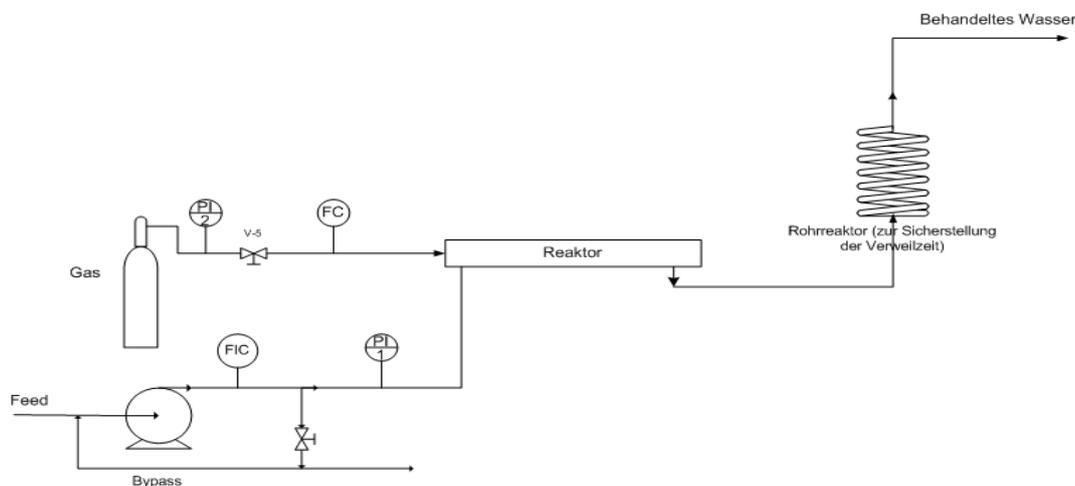


Abbildung 20: Laboranlage inkl. Gaseintragsystem - Reaktor (Versuchsreihe 1&2)

Mit der in Abbildung 20 schematisch dargestellten Laboranlage wurden erste Versuche mit dem Gaseintragsystem zur Verifizierung des Reaktorverhaltens durchgeführt. Dabei wurden die Parameter Durchsatz, Gaseingangsdruck, spezifische Sauerstoffzufuhr und Sättigungskonzentration erfasst und das Ausgasverhalten der O₂-gesättigten Wasserprobe messtechnisch erfasst.

| Proben Nr. | Durchsatz [l/h] | P _{in} [bar] | Gas Flow | O ₂ Konzentration [mg/l] | | | |
|------------|-----------------|-----------------------|----------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | | | | t=0 | t=25 min | t=50 min | t=19 h |
| 1 | 49,3 | 1,2/1,8 | 1 | 29,10 | - | - | - |
| 2 | 59,3 | 1,6/2,4 | 1 | 30,10 | - | - | - |
| 3 | 59,7 | 1,4/2,2 | 0,5 | 30,40 | - | - | - |
| 4 | 70,0 | 2,2/2,8 | 0,5 | 28,80 ¹ | - | - | - |
| 5 | 69,2 | 2,4/3,0 | 1 | 30,40 ¹ | 25,90 ¹ | 23,60 ¹ | 7,12 ¹ /7,20 ² |
| 6 | 79,2 | 2,6/3,2 | 1 | 33,40 ¹ | 19,41 ¹ | 18,67 ¹ | 7,04 ¹ /6,92 ² |
| 7 | 89,2 | 3,2/3,6 | 1 | 31,40 ¹ | - | - | - |

1: stabiles Signal der Sauerstoffsonde
2: Messung der Sauerstoffkonzentration nach Bewegung der Sauerstoffsonde

Tabelle 4: Sauerstoffeintragsversuche zur Verifizierung des Reaktorverhaltens (Versuchreihe 1)

Darauf aufbauend wurde die Versuchsanordnung adaptiert und Absorptions- und Desorptionmessungen mit der in Abbildung 21 dargestellten Versuchsanlage durchgeführt. Dabei wurde Reinwasser je nach Versuchsanordnung mit technischem Sauerstoff bzw. Luftsauerstoff begast und der Verlauf des Sauerstoffgehaltes/ Sauerstoffkonzentration messtechnisch erfasst.



Abbildung 21: Laboranlage inkl. Gaseintragsystem (Reaktor)

Bei den Desorptionsversuchen wurde die Sauerstoffzufuhr aus der Abnahme des zuvor künstlich erhöhten Sauerstoffgehaltes bestimmt. Zu diesem Zweck wurde die Sauerstoffkonzentration im Versuchsbecken ($V = 0,256 \text{ m}^3$) durch Begasung mit technischem Sauerstoff über das Gaseintragsystem bis zu einer Sättigungskonzentration von $c_{s,20} = 22 \text{ [mg/l]}$ erhöht.

| | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|
| Versuchsbezeichnung: | Desorptionsversuch | | |
| Datum: | 11. Sep. 2008 | | |
| Versuchsbedingungen: | Begasung techn. Sauerstoff, 4 bar | | |
| Beckenvolumen [V] | 0,256 | [m ³] | |
| Einblastiefe [h_E] | 0,5 | [m] | |
| athm. Luftdruck [p] | 1016 | [hPa] | |
| Temperatur [T] | 20 | [°C] | |
| C_{s,T} | 21,97 | [mg/l] | max. Sauerstoffkonzentration unter Versuchsbedingungen |
| O_L | 15,92 | [g/h] | gelöste Sauerstoffmenge bei Versuchsdurchführung |

Tabelle 5: Versuchsbedingungen bei Durchführung des Desorptionsversuchs 1 (Versuchreihe 2)

Primäre Zielsetzung der durchgeführten Versuche bestand dabei einerseits in der Ermittlung des Ausgasverhaltens bei Eintrag von technischem Sauerstoff unter definierten Standardbedingungen. Zum anderen wurden die verfahrenstechnischen Parameter zur Einbringung der unten den jeweiligen Versuchsbedingungen im Reinwasser gelösten Sauerstoffmenge ermittelt.

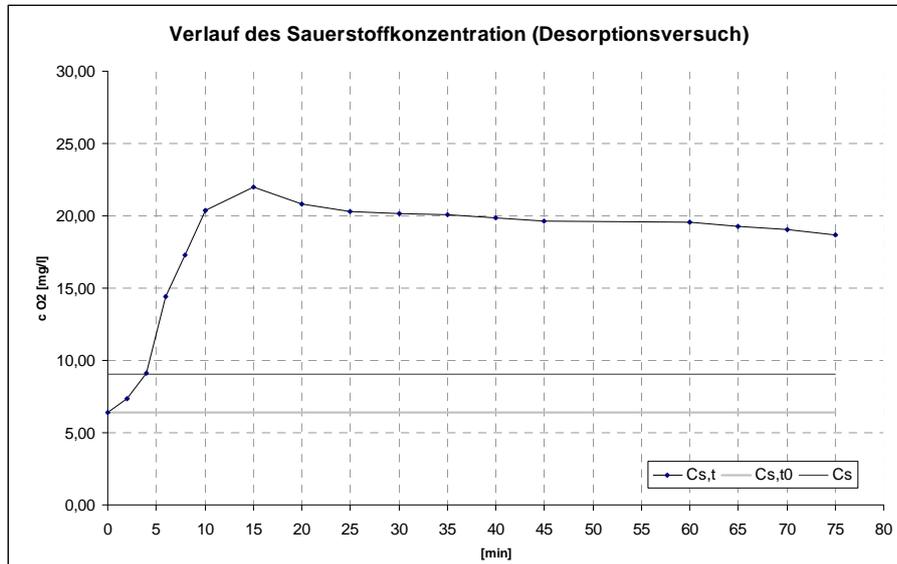


Abbildung 22: Beispiel Verlauf der Sauerstoffkonzentration – Desorptionsversuch 1

Bei den Absorptionsversuchen wurde die Sauerstoffzufuhr aus dem Anstieg des zuvor künstlich abgesenkten Sauerstoffgehaltes bestimmt. Zu diesem Zweck wurde der Sauerstoffgehalt im Versuchsbecken ($V = 0,256 \text{ m}^3$) durch Begasung mit Stickstoff abgesenkt. Nach Stabilisierung der Sauerstoffverhältnisse wurde das Versuchsbecken in weiterer Folge mit Luftsauerstoff über das Gaseintragsystem begast.

| Versuchsbezeichnung: | | Absorptionsversuch | |
|--------------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------|
| Datum: | 18. Sep. 2008 | | |
| Versuchsbedingungen: | Begasung Druckluft, 4 bar | | |
| Beckenvolumen [V] | 0,256 | [m ³] | |
| Einblastiefe [h _E] | 0,5 | [m] | |
| athm. Luftdruck [p] | 1016 | [hPa] | |
| Temperatur [T] | 19 | [°C] | |
| $c_{s,T}$ | 10,24 | [mg/l] | Sauerstoffsättigungskonzentration unter Versuchsbedingungen |
| $c_{s,19}$ | 9,28 | [mg/l] | Sauerstoffsättigungskonzentration unter Normbedingungen |
| Sauerstoffsättigung | 110,34% | [%] | prozentuale Sauerstoffsättigung |
| Q_L | 3,63 | [g/h] | gelöste Sauerstoffmenge bei Versuchsdurchführung |

Tabelle 6: Versuchsbedingungen bei Durchführung des Absorptionsversuchs 1 (Versuchsreihe 3)

Abbildung 23 zeigt den Verlauf der Sauerstoffkonzentration durch Begasung von Reinwasser mit Druckluft über das Gaseintragsystem. Der Sauerstoffgehalt wurde dabei bis zum Zeitpunkt t_{21} durch Zufuhr von Stickstoff auf $0,74 \text{ mg O}_2/\text{l}$ abgesenkt, nach erfolgter Inbetriebnahme des Gaseintragsystems wurde durch Zufuhr von Luftsauerstoff (Druckluft) das Fluid bis zur Sättigungskonzentration von $10,24 \text{ [mg/l]}$ mit O_2 angereichert. Im Vergleich dazu ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei Anreicherung des Fluids mit technischem Sauerstoff bei identen Versuchsbedingungen dargestellt. Dabei zeigte sich ein um den Faktor 4 schnelleres errei-

chen der durch Anreicherung mit Luftsauerstoff erzielbaren Sauerstoffkonzentration bei einem um den Faktor 4 reduzierten Energieinput (Rezirkulationspumpe).

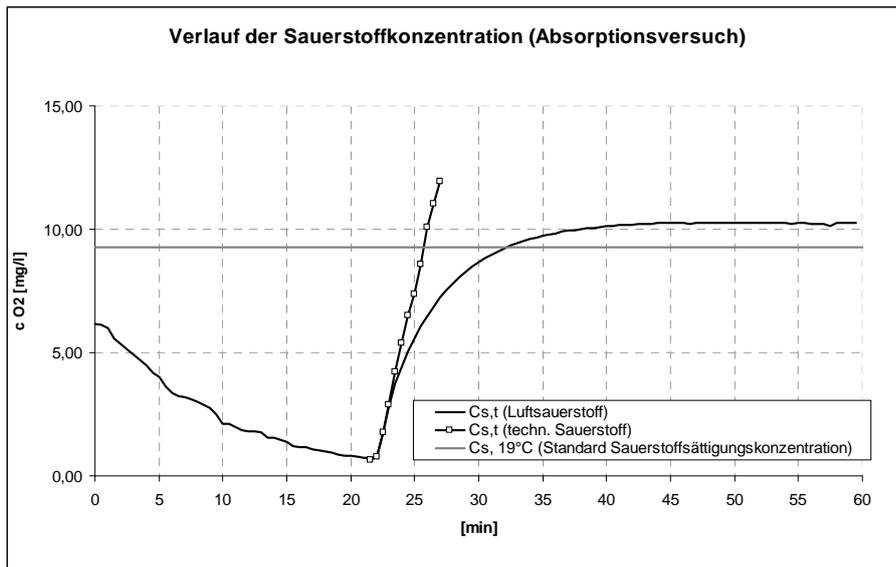


Abbildung 23: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – Absorptionsversuch

Im Rahmen der Technikumsversuche wurden in weiterer Folge Sauerstoffeintrags- bzw. Abbauprobe mit dem Ablauf der Hochlastbiologie einer Papierfabrik durchgeführt. Als Produzent von Kartonagen stellt diese Papierfabrik auf zwei Kartonmaschinen Faltschachtelkarton für den „Food“ und „Non-Food“ Bereich her. Als Rohstoff wird zu 80% Altpapier eingesetzt bzw. werden unter Berücksichtigung definierter Qualitätsanforderungen rund zwei Drittel des Prozesswassers nach erfolgter mechanischer Reinigung als „Reinwasser“ und als „Biolwasser“ (mechanische + biologische Reinigung) in den Produktionsprozess rückgeführt. In Abbildung 24 ist das vom Unternehmen gewählte Verfahrenskonzept schematisch dargestellt.

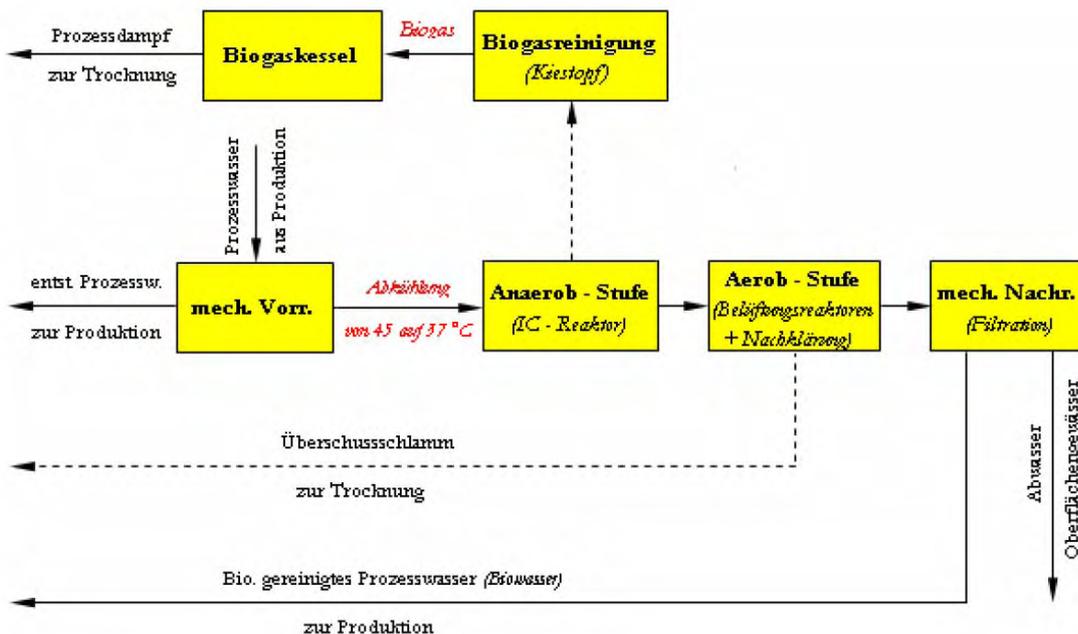


Abbildung 24: Wasserschema der Papierfabrik

Ein Teil des entstofften Prozesswassers gelangt über einen Wärmetauscher in einen Vorversäuerungs- bzw. einen Versäuerungsbehälter, wo die Nährstoffdosierung und die pH-Wert Einstellung vorgenommen wird. Der Anaerobe Abbau erfolgt anschließend in einem IC-Reaktor, wobei in der Anaerobstufe ein CSB Abbau von 60 – 70% erzielt wird. Das biologisch vorbehandelte Prozesswasser wird in weiterer Folge in zwei Belüftungsreaktoren (Hochlastbiologie/ Schwachlastbiologie) aerob nachgereinigt. Die Sauerstoffversorgung erfolgt mittels tangentialer Belüftung, wobei vier Belüfter pro Reaktor eingesetzt werden. Nach Abtrennung des Überschussschlammes in den Nachklärbecken wird das Prozesswasser zur Verminderung des Feststoffgehaltes über eine Filtrationsanlage geleitet.

Rund 8% des zu reinigenden Prozesswassers (Rohabwasser) werden nach erfolgter biologischer Reinigung wiederum als „Biolwasser“ in den Produktionsprozess rückgeführt, der Rest – abzüglich der bereits nach der mechanischen Reinigung in den Produktionsprozess rückgeführten „Reinwassermenge“ (~ 56%) und der verdampften Wassermenge – fällt als Abwasser an und wird in den nahe gelegenen Vorfluter eingeleitet.

Ziel der Sauerstoffeintrags- bzw. Abbaubersuche bestand nun in der Ermittlung des spezifischen Sauerstoffetrags und der Ermittlung des Ausgasverhaltens bzw. der Abnahme der Sauerstoffkonzentration durch die Aktivität des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches. Zudem wurden die Summenparameter TOC und CSB analytisch erfasst, um Rückschlüsse auf die biologische Abbauleistung während der Versuchsdurchführung ziehen zu können.

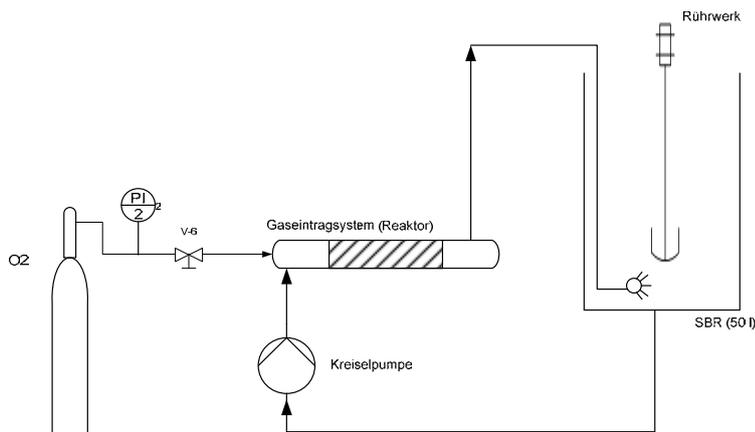


Abbildung 25: Technikumsanlage inkl. Gaseintragsystem (SBR-Versuchsanlage)

Die Versuchsanlage wurde neben dem Gaseintragsystem mit einem Rührwerk ausgestattet, um nach Ausschalten der Zirkulationspumpe für eine ausreichende Durchmischung zu sorgen. Die Anreicherung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches erfolgte durch direkte Begasung über das Gaseintragsystem (Reaktor), wobei bei einer Rezirkulation des Abwassers über das Gaseintragsystem von 5 min die Sauerstoffzufuhr (techn. Sauerstoff) über die ersten beiden Minuten erfolgte. Nach abschalten der Rezirkulationspumpe erfolgte je nach Versuchsreihe eine Durchmischung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches über das Rührwerk

In Abbildung 26 sind die Verläufe der Sauerstoffkonzentrationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten über je eine Stunde graphisch dargestellt. Über den Zeitraum t_0 bis t_{60} zeigen dabei die Konzentrationsverläufe des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches eine ähnliche Abnahme der Sauerstoffkonzentration. Auffallend in allen Fällen ist der starke Knick nach Ende der er-

folgten Sauerstoffzufuhr (Minute 7). Dieser ist im Wesentlichen auf den verstärkten Sauerstoffauftrag bei fortlaufendem Betrieb der Rezirkulationspumpe bzw. Gaseintragsystems zurückzuführen (Minute 7 – 10). Um einen effizienten Sauerstoffeintrag und eine effiziente Sauerstoffausnutzung zu gewährleisten ist daher vor dem Hintergrund einer ausreichenden Durchmischung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches eine alternierende Fahrweise von Gaseintragsystem und Rührwerk vorteilhaft.

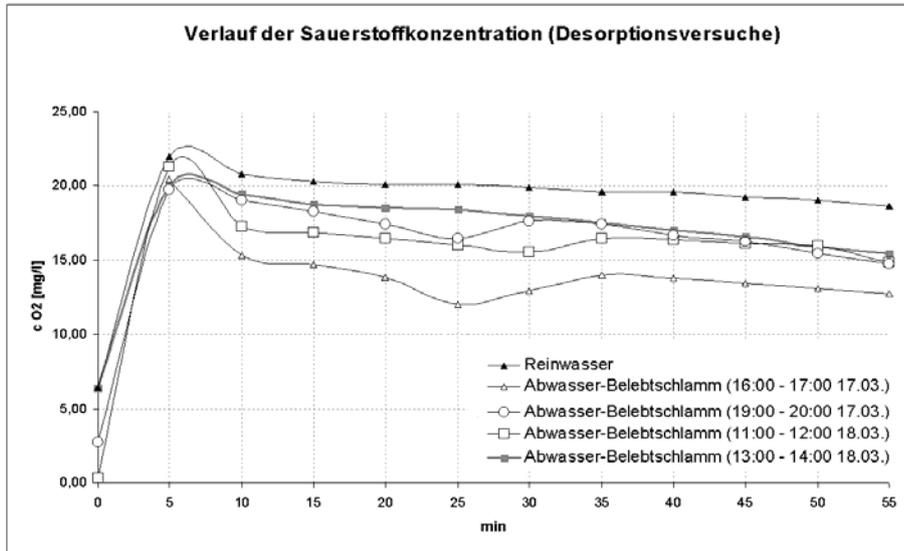


Abbildung 26: Verlauf der Sauerstoffkonzentrationen – Desorptionsversuche (SBR-Versuchsanlage)

In Abbildung 27 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration über 120 Minuten dargestellt. Die Sauerstoffzufuhr erfolgte über das Gaseintragsystem innerhalb der Minuten 5 bis 7.

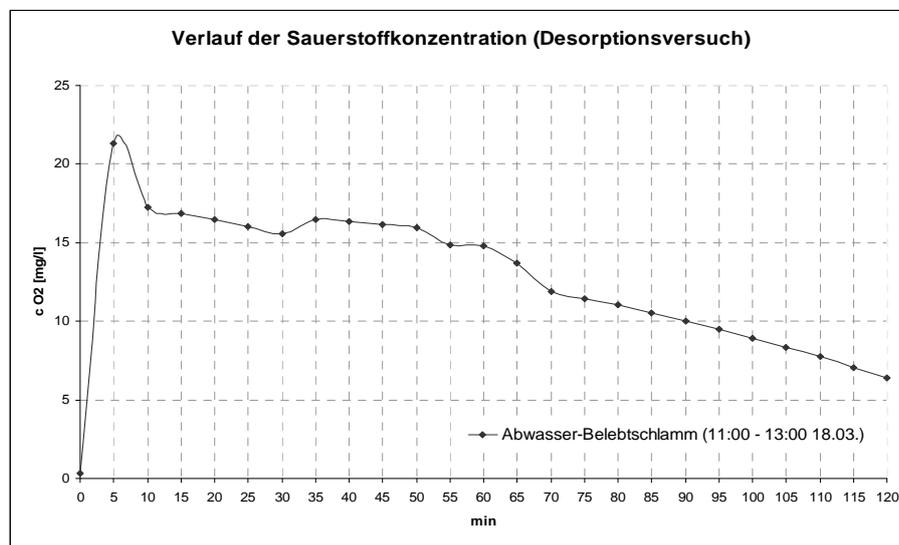


Abbildung 27: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – 11:00 – 13:00 18.03.)

Nach Ende der Sauerstoffzufuhr wurde das Gaseintragsystem bis zur Minute 10 weiter betrieben (Knick). Danach erfolgte keine Durchmischung des Systems bis zur Minute 30. Im Zeitraum von Minute 30 bis Minute 60 erfolgte eine Durchmischung des Systems über das in der SBR-Versuchsanlage integrierte Rührwerk. Nach Minute 60 erfolgte wiederum keine Durchmischung des Systems. Der etwas erhöhte Verlauf der Sauerstoffkonzentration zwischen den

Minuten 30 und 60 ist demnach auf die verbesserte Durchmischung des Systems zurückzuführen. Ein Sauerstoffeintrag über das Rührwerk ins System kann ausgeschlossen werden, da die Sättigungskonzentration von luftgesättigtem Wasser unter den gegebenen Bedingungen ($T = 26^{\circ}\text{C}$) bei rd. 8 mg/l liegt.

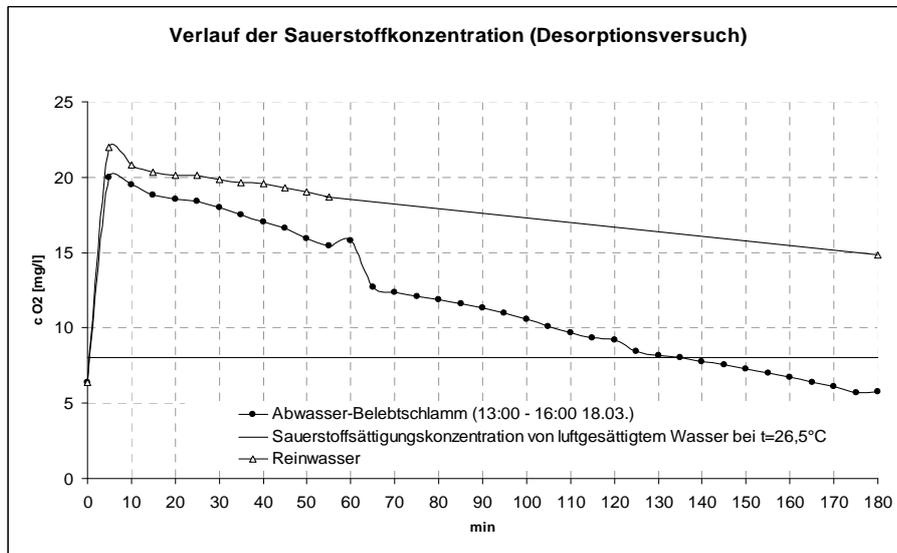


Abbildung 28: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – 13:00 – 16:00 18.03.

In Abbildung 28 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei durchgehender Durchmischung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches über das Rührwerk dargestellt. Der Knick bei Minute 60 und der daraus resultierende verstärkte Sauerstoffaustrag ist wiederum auf die Inbetriebnahme des Gaseintragsystems (ohne Sauerstoffzufuhr) zurückzuführen. Im Vergleich dazu ist die Abnahme der Sauerstoffkonzentration beim Reinwasser-Versuch dargestellt. Durch die verstärkte Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch kann auf einen biologischen Abbau der organischen Substanzen durch aerobe Stoffwechselvorgänge geschlossen werden. Um dies zu verifizieren wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung die Summenparameter TOC (Total Organic Carbon) und CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf) analytisch bestimmt. Dabei zeigte sich bei einer Versuchslaufzeit von 6 Tagen eine CSB Reduktion (filtrierte Probe) von rund 63%.

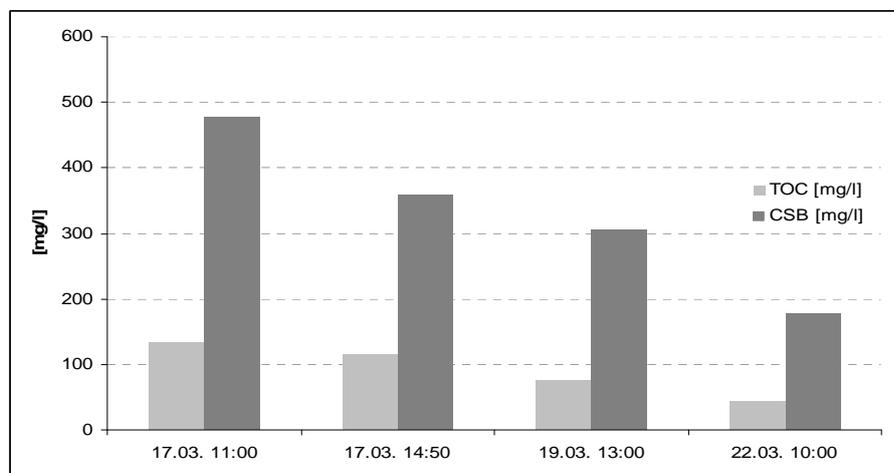


Abbildung 29: Aerober Abbau organischer Substanzen im Rahmen der Desorptionsversuche

4.3.4 Abbaubersuche mithilfe bioaktiver Präparate (Laborversuche)

Die Untersuchungen zur Beeinflussung der biologischen Abbaubarkeit nach Zugabe bioaktiver Präparate erfolgten unter Heranziehung des OECD Die Away Tests (DIN EN ISO 7827 OECD 301 E, 92/69/EWG, C.4-B). Dieses Testverfahren wird zur Bestimmung der leichten biologischen Abbaubarkeit (ready biodegradability) von wasserlöslichen und nicht flüchtigen organischen Substanzen eingesetzt. Die Abbaubarkeit wird über die Abnahme des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Standversuch bei geringer Animpfdichte bestimmt. Ein DOC-Abbaugrad von mindestens 70% innerhalb von 28 Tagen und innerhalb eines "10-Tage-Fensters" nach dem Ende der lag-Phase gilt als Kriterium für die Einstufung der Prüfsubstanz als leicht biologisch abbaubar.

Als bioaktiver Zuschlagstoff wurde ein Präparat der Fa. Inocre mit der Bezeichnung reactre amylat in den Konzentrationen 0,05%, 0,1% und 1% zugesetzt. reactre® ist ein Produkt aus Mikroorganismen, photokatalytisch wirkenden keramischen Teilchen, Spurenelementen und Biopolymeren (Polysaccharide, Polylactatacetat, Chitosan). Die Mikroben stammen aus fermentierten Mischkulturen, denen aerob arbeitende Spezialisten zugesetzt werden. Die Mikroorganismen steuern in Wechselwirkung mit piezoelektrischen Mikropartikeln physikalische Prozesse. Dabei entstehen Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen einerseits und Radikale andererseits, die eine massive Einwirkung auf unerwünschte chemische Verbindungen ermöglichen sollen. Als Referenzsystem diente die Ausgangsprobe ohne Zusatz des reactre Produktes.

Die Untersuchungen wurden mit Produktionsabwasser eines Kartonagen Herstellers aus dem Ablauf der anaeroben Vorreinigungsstufe durchgeführt. Als Inoculum wurde Belebtschlamm aus der Betriebskläranlage herangezogen.

| Abwassercharakteristik der Ausgangsprobe | | |
|------------------------------------------|---------------|-------|
| pH Wert | [-] | 6,9 |
| Leitfähigkeit | [μ S/cm] | 1.947 |
| CSB | [mg/l] | 919 |
| TOC | [mg/l] | 286 |
| BSB ₅ | [mg/l] | 300 |
| PO ₄ -P | [mg/l] | 6,0 |
| NO ₃ -N | [mg/l] | 3,0 |
| NH ₄ -N | [mg/l] | 4,3 |
| N _{Kjeldahl} | [mg/l] | 4,4 |

Tabelle 7: Abwasserzusammensetzung der Ausgangsprobe (Ablauf Anaerobie Papierfabrik)

Die Versuchsdurchführung erfolgte a) mit der unverdünnten Ausgangsprobe und b) Verdünnung der Ausgangsprobe 1:2. Zusätzlich zu den kontinuierlichen DOC Analysen wurden in den Ausgangs- und Endproben die Parameter CSB und BSB₅ ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

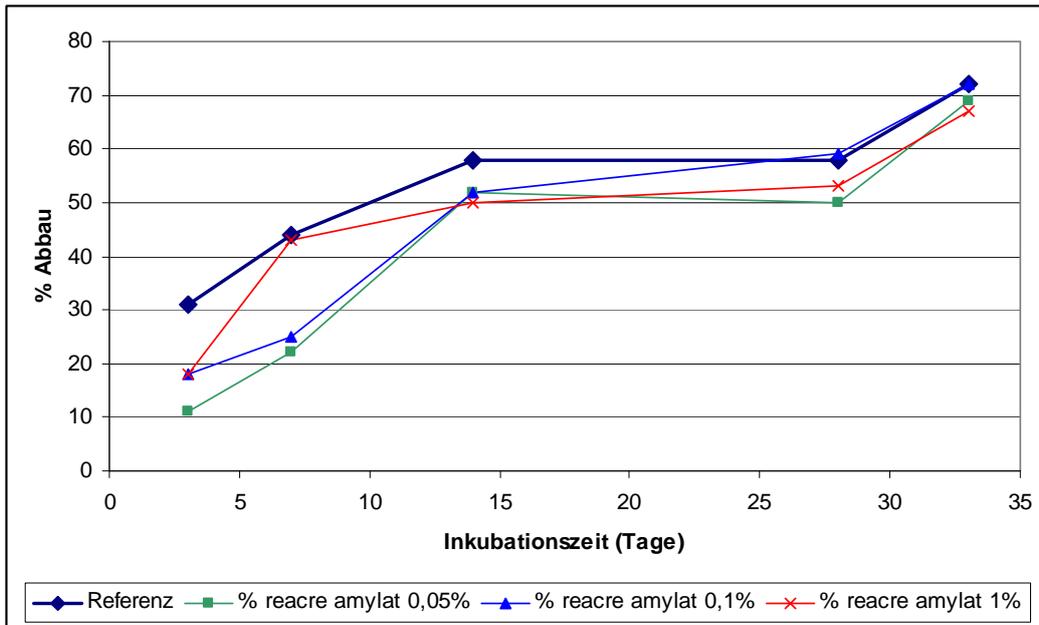


Abbildung 30: Abbauntersuchungen im OECD Die-Away-Test, Ausgangsprobe = unverdünnt

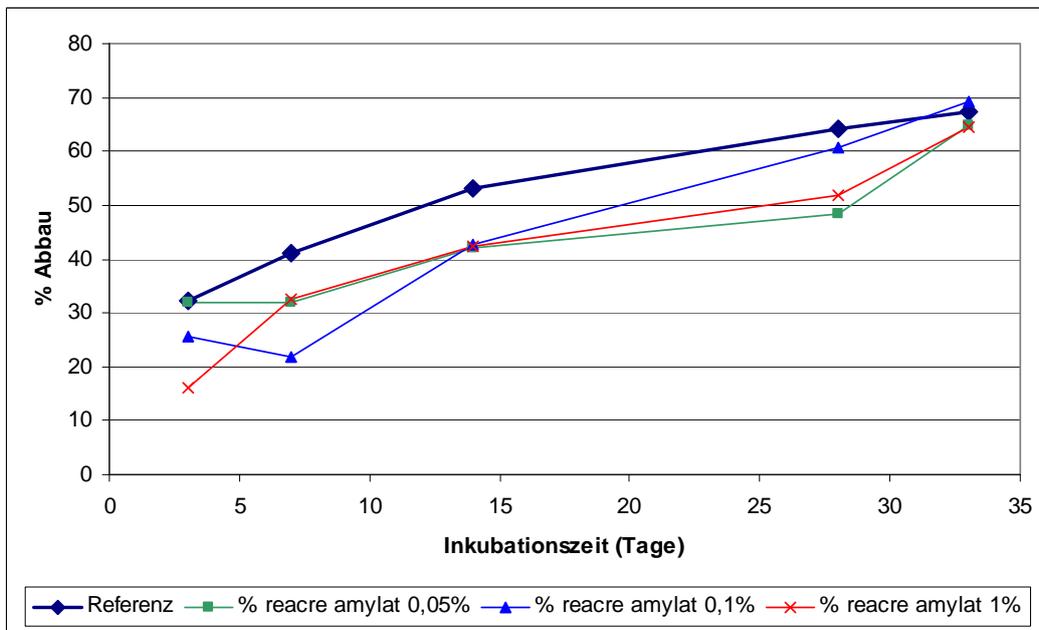


Abbildung 31: Abbauntersuchungen im OECD Die-Away-Test, Ausgangsprobe = Verdünnung 1:2

Zusammenfassend konnte in keiner Versuchsvariante und Konzentration des Zuschlagstoffes eine signifikante Erhöhung der Bioaktivität mit wesentlich gesteigerten Abbauraten festgestellt werden. Die Endabbaubarkeit betrug im Referenzsystem durchschnittlich 69,5% im Vergleich zum Durchschnittswert aller Testansätze mit dem reacre Produkt von 67,8%. Die korrespondierenden CSB bzw. BSB₅ Abbauraten betragen im Referenzsystem 76,5% und 97,0% bzw. 78,9% und 97,0 im Durchschnitt aller reacre Testansätze.

4.3.5 Fallstudie I: Papierindustrie (Pilotversuche)

Für die Fallstudie I im Bereich der Papierindustrie wurde ein Produzent von Kartonagen und Spezialpappen ausgewählt, der als Rohstoff zu 100% Altpapier einsetzt und das technologische Konzept eines geschlossenen Wasserkreislaufes praktiziert. Aufgrund der hohen organischen Belastung des Kreislaufwassers (CSB > 10.000 mg/l) wurden zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung rund 5 [kg/d] an Biozid (Bioschleim) dem Kreislaufwasser im Bereich des Frischwasserbehälters zugegeben. Damit sollten einerseits produktionstechnische Probleme aufgrund einer ansonsten verstärkten Vermehrung von Mikroorganismen reduziert werden, andererseits sollten durch Einsatz des Biozides biologische Stoffwechselvorgänge im Endprodukt/ Fertigprodukt unterbunden werden.

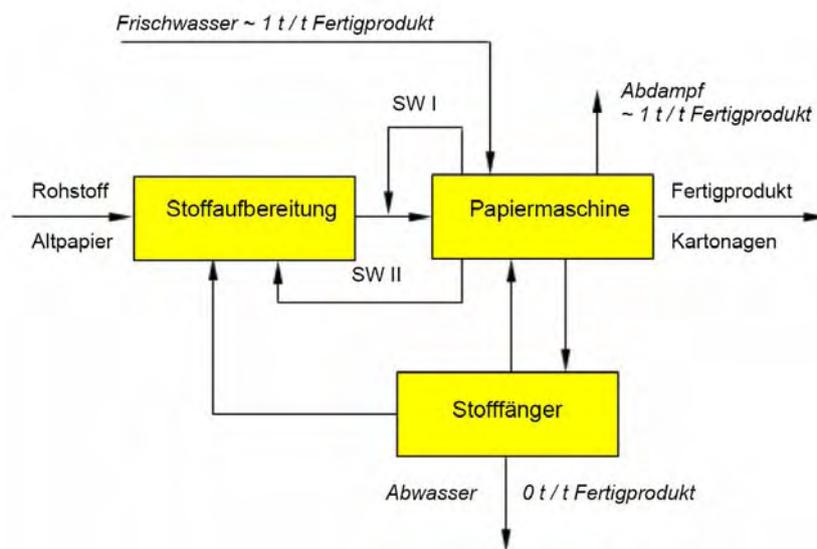


Abbildung 32: Wasserschema Fallstudie I: Papierfabrik

Um den Wasserkreislauf zu entlasten, sollten zukünftig rund 84 [m³/d] aus dem Wasserkreislauf ausgeschleust und nach entsprechender Aufbereitung in den nahe gelegenen Vorfluter eingeleitet werden. Durch Öffnung des Wasserkreislaufes und der Substitution des Kreislaufwassers durch Frischwasser sollte die spezifische CSB-Konzentration im Kreislaufwasser reduziert und der Einsatz ansonsten notwendiger Biozide auf ein Optimum minimiert werden.

Im Rahmen des Projektes wurden auf Basis der gegebenen Randbedingungen Versuche zur Entlastung des Kreislaufwassers durchgeführt. Mit dem Ziel der bestmöglichen Integration des Gaseintragsystems in das bestehende Konzept der abwasserlosen Papierherstellung wurden nachstehende Zielsetzungen verfolgt:

- Reduktion der organischen Belastung des Kreislaufwassers
- Chemisch-physikalische (Vor-)Behandlung des Kreislaufwassers
- Substitution des derzeit eingesetzten Biozides

Zu Beginn der Fallstudie wurden Versuche zum oxidativen Abbau organischer Substanzen durch Begasung mit technischem Sauerstoff durchgeführt. Mit dem Verfahren der chemischen Oxidation können verschiedene, vornehmlich organische Abwasserinhaltsstoffe vollständig oder teilweise oxidiert werden. Bei der vollständigen Oxidation wird der organische Kohlen-

stoff zu Kohlendioxid oxidiert, die unvollständige Oxidation dient vor allem dazu, biologisch schwer abbaubare Verbindungen in biologisch leichter abbaubare Verbindungen umzuwandeln, um diese in weiterer Folge in einer biologischen Stufe weitergehend abzubauen.

Um die oxidative Wirkung durch Begasung mit technischem Sauerstoff und der im Reaktor ablaufenden chemischen Oxidation zu untersuchen, wurde eine definierte Abwassermenge mit einer CSB – Belastung von im Mittel 12.625 [mg/l] über eine Zirkulationspumpe über den Reaktor im Kreislauf geführt (Anlagenschema siehe Abbildung 33). Bei einer Zulaufmenge von rund 200 [l/h] wurde das Abwasser mit rund 2 [l/min] technischem Sauerstoff über das Reaktormodul begast.

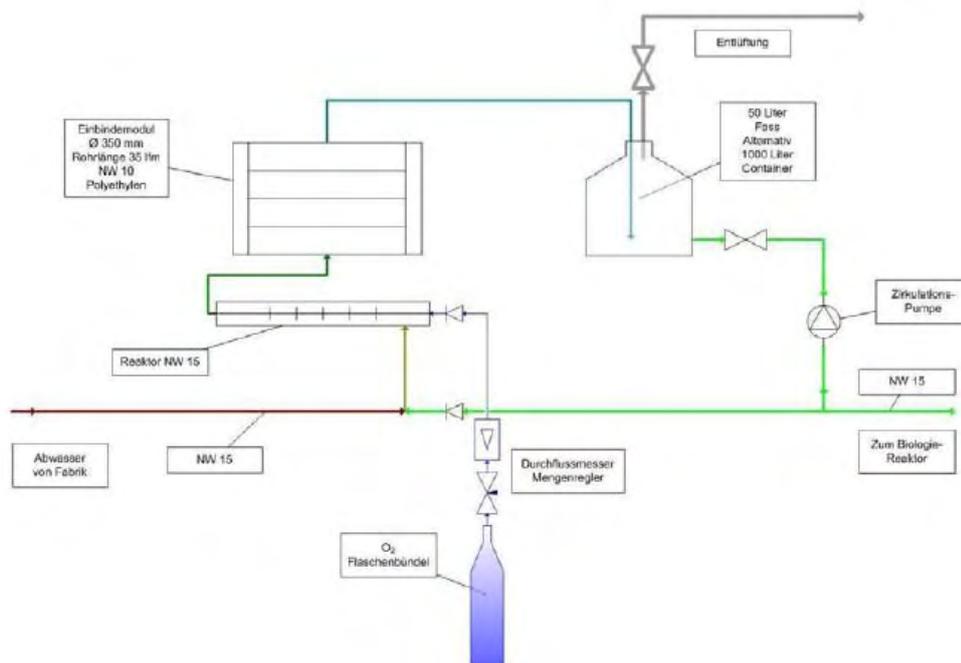


Abbildung 33: Anlagenschema Versuchsanlage Fallstudie I: Papierfabrik

Nach der Aufbau- und Einfahrphase der Versuchsanlage wurde die Versuchsanlage über mehrere Tage betrieben, wobei keine wesentliche Reduktion der organischen Belastung durch die direkte Begasung des Abwassers mit Reinsauerstoff über das Gaseintragsystem beobachtet werden konnte.

| | Parameter | 29.Apr.08 | Mittwoch 14.Mai.08 | Donnerstag 15.Mai.08 | Freitag 16.Mai.08 | Samstag 17.Mai.08 | Sonntag 18.Mai.08 | Mittelwert |
|-------------|-----------|-----------|-----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|
| ZULAUF | TOC mg/l | | 3.658 | 4.018 | 3.658 | 3.753 | 3.408 | 3.699 |
| ABLAUF | TOC mg/l | 2.048 | 3.055 | 3.565 | 3.543 | 3.443 | 3.473 | 3.416 |
| % Reduktion | | | 16,5 | 11,3 | 3,1 | 8,3 | -1,9 | 7,7 |
| | Parameter | 29.Apr.08 | Mittwoch 14.Mai.08 | Donnerstag 15.Mai.08 | Freitag 16.Mai.08 | Samstag 17.Mai.08 | Sonntag 18.Mai.08 | Mittelwert |
| ZULAUF | CSB mg/l | | 12.750 | 13.400 | 12.375 | 13.400 | 11.200 | 12.625 |
| ABLAUF | CSB mg/l | 8.100 | 10.975 | 12.700 | 12.400 | 11.925 | 11.625 | 11.925 |
| % Reduktion | | | 13,9 | 5,2 | -0,2 | 11,0 | -3,8 | 5,5 |

Tabelle 8: Zu- und Ablaufbelastung Versuchsanlage Fallstudie I: Papierfabrik

Als eine der Ursachen wurde der hohe Aschegehalt im Zulaufstrom der Versuchsanlage identifiziert, der aus dem Einsatz von Asche als Färbemittel in der Produktion resultiert. Daraufhin wurden die Versuche abgebrochen und die Versuchsanordnung adaptiert.



Abbildung 34: Versuchsaufbau Fallstudie I: Papierindustrie

Hierzu wurden im Rahmen von Laborversuchen Tests zur Aufbereitung bzw. Vorbehandlung des Abwassers durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde eine Mischprobe aus den im Zeitraum 14.05.2008 – 18.05.2008 bei der Papierfabrik aus Fallstudie I gezogenen Zulaufproben mit einem TOC Mittelwert von 3.699 [mg/l] und CSB Mittelwert von 11.625 [mg/l] herangezogen. Durch Fällung der Abwasserprobe mit NaOH (15%ige Natronlauge) und durch Begasung mit CO₂ nach erfolgter Fällung sollte einerseits der in Lösung befindliche Ascheanteil entfernt, andererseits sollte damit die Möglichkeit der CSB Reduktion untersucht werden. Die Klarwasserproben wurden in weiterer Folge anhand der Summerparameter TOC, TC und CSB analysiert. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen konnte keine wesentliche Reduktion der organischen Belastung festgestellt werden, der in der Ausgangprobe befindliche Ascheanteil konnte allerdings weitgehend entfernt werden.

| | | | TOC mg/l | TC mg/l | pH-Wert |
|---------|-----------------------------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| Probe 1 | Fällung mit NaOH pH 12 | Mischprobe → | 3.515 | 3.776 | 12,84 |
| | | | | Überstand | |
| Probe 2 | Fällung mit NaOH pH 12 | absetzen → | TOC mg/l 3.359 | TC mg/l 3.602 | pH-Wert 12,64 |
| Probe 3 | Neutralisation CO ₂ auf pH 6,8 | absetzen → | TOC mg/l 3.298 | TC mg/l 4.250 | CSB mg/l 11.925 |

Tabelle 9: Ergebnisse der Versuche zur Vorbehandlung des Abwassers Fallstudie I: Papierfabrik

Rückschlüsse über das Fällprodukt aus der NaOH – Fällung können durch Vergleich der Analysewerte der Mischprobe (Probe 1) und der Klarwasserprobe (Probe 2) gezogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der anorganische Anteil (~ 18 mg/l) im Wesentlichen aus dem in der Ausgangprobe in Lösung befundenen Aschanteil zusammensetzt. Um

die biologische Abbaubarkeit der chemisch-physikalisch vorbehandelten Probe (Probe 3) zu untersuchen, wurden in weiterer Folge biologische Abbautests nach OECD 301 D durchgeführt.

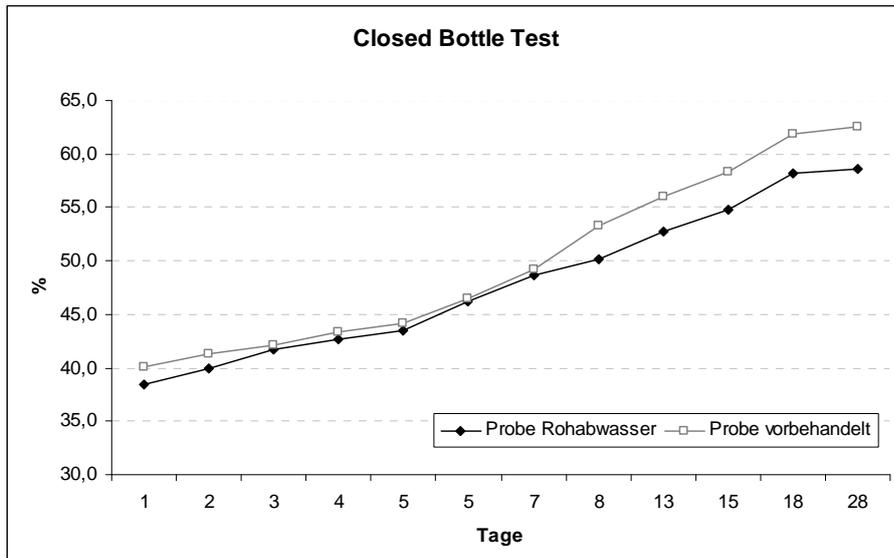


Abbildung 35: Biologischer Abbautest - Closed Bottle Test (Abwasser Fallstudie I: Papierfabrik)

Als Referenz wurde des Weiteren Abbautests mit der Rohabwasserprobe durchgeführt, wobei bei beiden Proben innerhalb einer Inkubationszeit von 28 Tagen eine durchschnittliche Abbaurrate von 60% erreicht werden konnte.

Da im Zuge der Bearbeitung der Fallstudie das Werk geschlossen bzw. der Betrieb eingestellt wurde, konnten die Ergebnisse aus den Laborversuchen nicht in den weiteren halbertechnischen Versuchen umgesetzt werden.

4.3.6 Fallstudie II: Glasindustrie (Pilotversuche)

Während der Aufbereitung von Altglas/Bruchglas zur Produktion von Sekundärrohstoffen für die Glasindustrie fallen großen Mengen an Waschwasser an, das im betrachteten Fall in einer zweistufigen Sedimentationsanlage aufbereitet wird.

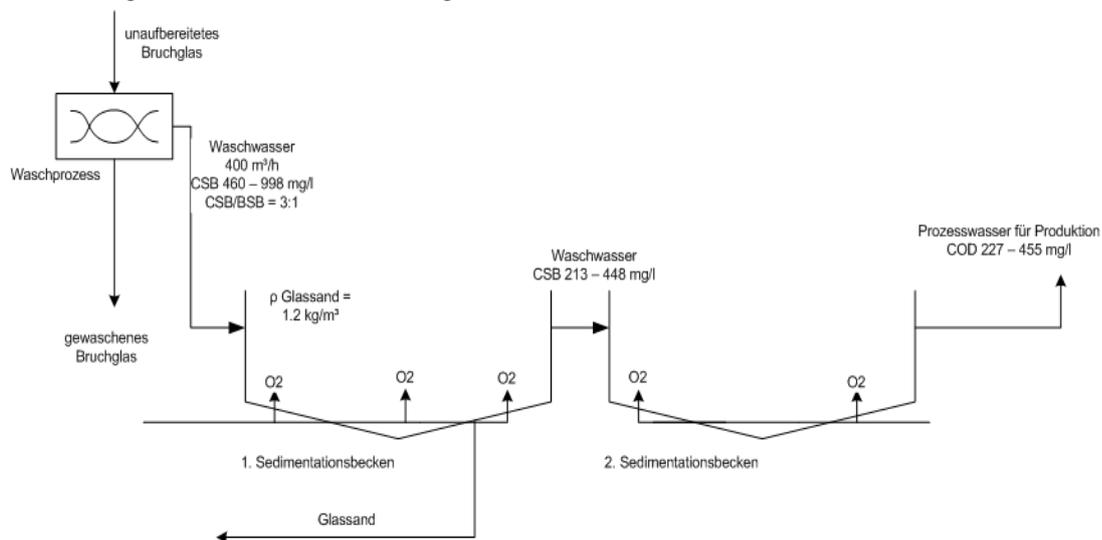


Abbildung 36: Schematische Darstellung der zweistufigen Sedimentationsanlage

Dieses Washwasser wird nach erfolgter Aufbereitung zur Gänze dem Prozess rückgeführt, wobei die Aufbereitung primär der Entfernung des im Wasser fein verteilten Glassandes dient. Aufgrund der organischen Belastung des Washwassers kam es in der Vergangenheit im Sedimentationsbecken 1 immer wieder zu Geruchsbelästigungen, da über das im Becken integrierte Belüftungssystem (Eintrag von technischem Sauerstoff über drei Venturibelüfter) die erforderliche Sauerstoffkonzentration nicht sichergestellt werden konnte.



Abbildung 37: Sedimentationsbecken 1

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Sauerstoffzufuhr und der Unterbindung sich ansonsten einstellender anaerober Stoffwechselfvorgänge wurde daher nach alternativen Möglichkeiten des Sauerstoffeintrages gesucht. Vor diesem Hintergrund wurde ein Gaseintragsystem (Reaktor) für diesen spezifischen Anwendungsfall konzipiert und durch Langzeitversuche getestet.



Abbildung 38: Gaseintragsystem – Durchfluss 200 m³/h

Durch Integration des Gaseintragsystems mit einem Durchfluss von rd. 200 m³/h konnte eine ausreichende Durchmischung des System bei gleichzeitiger Sicherstellung einer ausreichenden Sauerstoffkonzentration gewährleistet werden (Volumen Sedimentationsbecken < 10.000 m³; Aufenthaltzeit Washwasser 48 h). Die Sauerstoffzufuhr erfolgte über das Gaseintragsystem (Reaktor) durch Anreicherung eines Teilstromes (Primärstrom) mit technischem Sauerstoff und der Einmischung des mit Sauerstoff übersättigten Primärstroms in den Sekundärstrom. Dadurch konnte im Output-Strom (= INPUT Sedimentationsbecken) des Gaseintragsystem (Reaktor) eine Sauerstoffkonzentration von im Mittel 32 mg/l erzielt werden. Diese erzielten Konzentrationen oberhalb (siehe dazu Tabelle 10) der für den Kontakt mit der Atmo-

sphäre in Abhängigkeit von der Temperatur geltenden Sättigungskonzentrationen konnten durch Einsatz von technischem Sauerstoff erzielt werden.⁵ In Abbildung 39 ist der Verlauf der Sauerstoffkonzentration nach erfolgter Einbindung des Gaseintragsystems dargestellt. Wie in der Graphik ersichtlich konnte über den Beobachtungszeitraum von 22 Tagen (51 – 73) durch Einbindung des Gaseintragsystems eine Sauerstoffkonzentration von im Mittel 4 mg/l im Sedimentationsbecken sichergestellt werden.

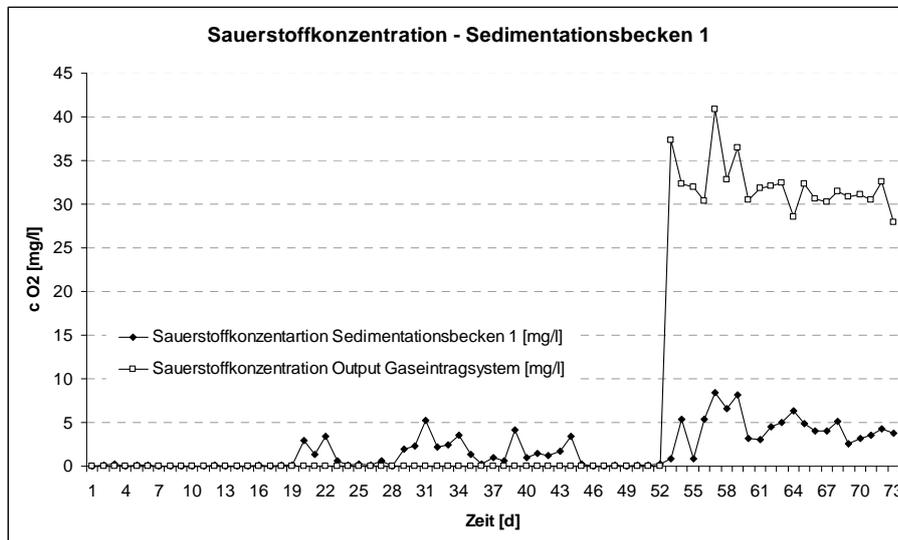


Abbildung 39: Sauerstoffkonzentration – Sedimentationsbecken 1

Durch Integration des Gaseintragssystems als Ersatz für das bestehende Belüftungssystem konnte bei gleichbleibendem Sauerstoffverbrauch somit eine ausreichende Sauerstoffversorgung im Sedimentationsbecken 1 sichergestellt werden.

| Temp. [°C] | Sättigungskonzentration unter Normbedingungen nach DIN EN 25814 [mg/l] | Sättigungskonzentration bei Einsatz von reinem Sauerstoff [mg/l] | Sättigungskonzentration Gaseintragsystem Output [mg/l] |
|------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 20,9 | 8,92 | 42,55 | 37,3 |
| 20,7 | 8,95 | 42,69 | 32,3 |
| 21,4 | 8,83 | 42,12 | 31,9 |
| 20,5 | 8,99 | 42,88 | 30,4 |
| 19,0 | 9,26 | 44,17 | 40,9 |
| 17,1 | 9,62 | 45,89 | 32,8 |
| 19,2 | 9,22 | 43,98 | 36,5 |
| 19,4 | 9,19 | 43,84 | 30,5 |
| 19,2 | 9,22 | 43,98 | 31,8 |
| 19,6 | 9,15 | 43,65 | 32,1 |
| 19,6 | 9,15 | 43,65 | 32,5 |
| 20,2 | 9,04 | 43,12 | 28,5 |
| 20,8 | 9,94 | 47,41 | 32,3 |
| 20,0 | 9,08 | 43,31 | 30,6 |
| 19,1 | 9,24 | 44,07 | 30,2 |
| 18,4 | 9,37 | 44,69 | 31,5 |
| 17,5 | 9,54 | 45,51 | 30,8 |
| 17,8 | 9,49 | 45,27 | 31,1 |
| 16,2 | 9,81 | 46,79 | 30,5 |
| 16,3 | 9,70 | 46,27 | 32,6 |
| 16,4 | 9,76 | 46,56 | 27,9 |

Tabelle 10: Sauerstoffsättigungskonzentrationen unter Normbedingungen vs. erzielte Sauerstoffsättigungskonzentrationen unter Versuchsbedingungen

⁵ Beim Einsatz von reinem Sauerstoff (100 Volumenprozent Sauerstoff) kann man bei Atmosphärendruck Konzentrationen erreichen, die um den Faktor 4,77 höher sind als beim Kontakt mit Luftsauerstoff unter sonst gleichen Bedingungen [Kölle, 2010]

4.3.7 Verfahrensparameter, Key-Faktoren und Umsetzungsbeispiel (großtechnische SBR-Versuchsanlage)

Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Versuche wurden Key-Faktoren bzw. Verfahrensparameter definiert, die bei der Integration des Gaseintragsystems in bestehende Anlagensysteme bzw. bei der Planung von Belüftungssystemen unter Einbindung des Gaseintragsystems zu berücksichtigen sind. Des Weiteren wurde im Rahmen des Projektes ein Umsetzungsbeispiel einer großtechnischen SBR-Versuchsanlage unter Einbindung der evaluierten Technologie erarbeitet und auszugsweise im Endbericht angeführt.

4.3.7.1 Verfahrensparameter und Key-Faktoren

- Sauerstoffzufuhr in biologische Abwasserreinigungssysteme über das Gaseintragsystem:
Auf Basis der durchgeführten Versuche konnte eine effektive Anreicherung von wässrigen Systemen mit Sauerstoff über das Gaseintragsystem festgestellt werden. Aus der hohen radialen Beschleunigung des Fluids im Gaseintragsystem (Reaktor) resultiert eine leistungsfähige Gasverteilung in wässrigen Systemen, wobei der Sauerstoff in Form fein verteilter Gasbläschen und mit Sauerstoff übersättigtem Wasser vorliegt. Durch die rasche Möglichkeit des Sauerstoffeintrags ergeben sich zudem hohe Sauerstoffeintragskapazitäten bei adäquatem Energieaufwand. Als wesentlicher Vorteil ist die nachträgliche Integration in bestehende Systeme zu nennen, wobei der wirtschaftliche Betrieb im Wesentlichen durch die jeweiligen prozessspezifischen Gegebenheiten bestimmt wird. Potentiale zur erfolgreichen Anwendung sind vor allem im Bereich der Behandlung hoch organisch belasteter Abwässer im Bereich der industriellen Abwasserreinigung gegeben.
- Durchmischung und Sicherstellung ausreichender Turbulenzen in biologischen Abwasserreinigungssystemen:
Die Leistungsfähigkeit von Belüftungssystemen wird einerseits durch den notwendigen Energieaufwand zur Einbringung des erforderlichen Sauerstoffbedarfs bestimmt. Andererseits muss auch eine ausreichende Durchmischung des Systems gewährleistet werden, um Ablagerungen zu vermeiden und um die Belebtschlammflocken zur bestmöglichen Versorgung mit Sauerstoff in Schwebelage zu halten. Im Rahmen der durchgeführten Versuche zeigte sich eine alternierende Betriebsweise von Gaseintragsystem und Rührwerk als vorteilhaft, um der möglichen Zerschlagung der Belebtschlammflocken aufgrund der hohen Turbulenzen im Gaseintragsystem entgegenzuwirken. Zudem kann dadurch dem verstärkten Ausgasen des zuvor eingebrachten Sauerstoffes aufgrund des Dauerbetriebes der Rezirkulationspumpe entgegengewirkt werden.
- Wartungs- und Betriebsaufwand des Gaseintragsystems:
Aufgrund der einfachen Bauweise der Technologie resultiert der Wartungsaufwand im Wesentlichen aus der periodischen Wartung der im System integrierten Rezirkulationspumpe. Der Betriebsaufwand wird einerseits durch den Energieaufwand der Rezirkulationspumpe bestimmt, andererseits durch die Bereitstellung des einzubringenden Sauerstoffes. Allgemein gültige Aussagen über die laufenden Betriebskosten können hier nur bedingt getroffen werden, da diese durch die jeweiligen prozessspezifischen Anforderungen bestimmt werden. Je nach Anforderungsprofil besteht zudem die Möglich-

keit technischen Sauerstoff oder Luftsauerstoff in das wässrige Medium einzubringen. Im Bedarfsfall ist daher unter Berücksichtigung der Parameter Abwasserbelastung, erforderlicher Sauerstoffzufuhr, notwendiger Energieaufwand, Durchflussleistung und logistischer Aufwand zur Sauerstoffbereitstellung die bestmögliche Balance zu finden.

– Betriebssicherheit und Flexibilität des Gaseintragsystems

Bei Einsatz von technischem Sauerstoff ist auf notwendige Sicherheitsvorkehrungen bei der Lagerung aber auch bei der Ausführung notwendiger peripherer Apparaturen (Verwendung von öl- und fettfreien Armaturen, Ventilen, etc.) bedacht zu nehmen. Aufgrund der einfachen Ausführung des Gaseintragsystems und der Möglichkeit der modularen Erweiterung kann die Technologie flexibel auf sich verändernde Anforderungen angepasst werden.

4.3.7.2 Anwendungsgebiete und Wirkungsmatrix

| | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Anwendung | Eintrag von CO ₂ über das Gaseintragsystem zur <u>Neutralisation</u> von alkalischen Prozesswässern | | | | |
| Verfahrensgrundlagen | <p>CO₂ als schwach zweibasige Säure dissoziiert in wässrigen Lösungen in zwei Schritten:</p> <p>1. Stufe: $\text{CO}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$</p> <p>2. Stufe: $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$</p> <p>Die Gleichgewichtslage wird dabei im Wesentlichen durch die H⁺ Konzentration und demnach durch den pH-Wert bestimmt. Der eigentliche Neutralisationsvorgang bei Eintrag von CO₂ in ein alkalisches wässriges Medium läuft praktisch stufenlos ab.</p> <p>Beispiel Neutralisation einer NaOH-Lösung</p> $2 \text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHCO}_3$ <p>Stöchiometrisch werden 11 kgCO₂ benötigt, um 1 m³ Abwasser mit 1% NaOH zu neutralisieren. Jedes kg NaOH bindet demnach 1,1 kg CO₂.</p> | | | | |
| Löslichkeit von CO ₂ in Wasser | Temperatur | 0 [°C] | 10 [°C] | 20 [°C] | 30 [°C] |
| | Absorptionskoeffizient * | 1,71 [ml/l] | 1,19 [ml/l] | 0,88 [ml/l] | 0,67 [ml/l] |
| | Löslichkeit ** | 3,35 [kg/m ³] | 2,32 [kg/m ³] | 1,69 [kg/m ³] | 1,26 [kg/m ³] |
| <p>* Absorptionskoeffizient von CO₂ in Wasser bei p = 1,013 bar</p> <p>** Löslichkeit von CO₂ in Wasser bei p = 1,013 bar</p> <p>Die Löslichkeit nimmt mit ansteigender Temperatur ab und mit steigendem Druck zu. So lösen sich beispielsweise bei einer Druckerhöhung auf 25 bar bei 20 °C 16,3 Liter CO₂ in einem Liter Wasser.</p> | | | | | |
| Anwendbarkeit Gaseintragsystem | <p>Über das Gaseintragsystem kann kostengünstig CO₂ in wässrige Medien eingebracht werden. Gegenüber der Neutralisation mit Mineralsäuren ergeben sich daraus nachstehende Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - flexibel einsetzbare Anlage und Möglichkeit der Nutzung von CO₂ aus Produktionsprozessen - Verminderung der Salzbelastung des Prozesswassers und Vermeidung von Übersäuerung im System | | | | |

Tabelle 11: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Neutralisation

| | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Anwendung | Eintrag von O ₂ über das Gaseintragsystem zur <u>Anreicherung</u> wässriger Systeme mit Sauerstoff | | | | |
| Verfahrensgrundlagen | Sauerstoff ist das wichtigste Oxidationsmittel im Wasser und seine Konzentration bestimmt, welche Art von Leben (aerob/anaerob) darin vorkommt. Sauerstoff ist nur schlecht in Wasser löslich, wobei die Eintragsmenge im direkten Zusammenhang mit den Parametern Temperatur und Druck stehen. Die Sauerstoffsättigung in Wasser ist ein Maß für die Menge an gelöstem Sauerstoff, bezogen auf die Gleichgewichtskonzentration gegenüber Luft bei Normaldruck (1013 hPa). Gut belüftetes Wasser im freien Austausch mit der Atmosphäre hat definitionsgemäß eine Sauerstoffsättigung von 100%. Bei Einsatz von technischem Sauerstoff kann bei sonst gleichen Bedingungen eine um den Faktor 4,77 höhere Sauerstoffkonzentration als bei Eintrag von Luftsauerstoff erreicht werden. Dies ermöglicht die Umsetzung von Nebenstromlösungen, wodurch bei geringerer Pumpleistung die gleiche Menge an Sauerstoff im wässrigen Medium gelöst werden kann. | | | | |
| Löslichkeit von O ₂ in Wasser | Temperatur | 0 [°C] | 10 [°C] | 20 [°C] | 30 [°C] |
| | Luftsauerstoff * | 14,62 [mg/l] | 11,29 [mg/l] | 9,09 [mg/l] | 7,56 [mg/l] |
| | Techn. Sauerstoff ** | 69,74 [mg/l] | 53,85 [mg/l] | 43,36 [mg/l] | 36,06 [mg/l] |
| <p>* Löslichkeit von O₂ (Luftsauerstoff) in Wasser bei Normbedingungen (p = 1,013 bar)</p> <p>** Löslichkeit von O₂ (Techn. Sauerstoff) in Wasser bei Normbedingungen (p = 1,013 bar)</p> <p>Die Löslichkeit von O₂ nimmt mit ansteigender Temperatur ab und mit steigendem Druck zu. Zudem nimmt die Löslichkeit von O₂ mit steigendem Salzgehalt des Wassers ab. Je geringer die Sauerstoffsättigung ist, umso rascher kann zudem neuer Sauerstoff in das Fluid eingebracht werden (siehe Graphik unten).</p> | | | | | |
| | | | | | |
| Anwendbarkeit Gaseintragsystem | <p>Über das Gaseintragsystem kann effektiv O₂ in wässrige Medien eingebracht werden, wobei der Sauerstoff in Form fein verteilter Gasbläschen und mit Sauerstoff übersättigtem Wasser vorliegt. Durch Funktionsweise des Gaseintragsystems (radiale Beschleunigung des Fluids im Reaktor und hohe Durchmischungsrate des Fluids mit dem eingetragenen Gas) kann diese am ehesten mit der Verfahrenstechnologie eines statischen Mischers verglichen werden. Als wesentliche Vorteile der Technologie sind zu nennen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - modulare Bauweise der Technologie und flexible Anpassung an bestehende Abwasserreinigungssysteme möglich (siehe Beispiel Glasindustrie) - Intensivierung biologischer Prozesse durch erhöhte Sauerstoffzufuhr - geringer Wartungsaufwand und geringe Investitionskosten | | | | |

Tabelle 12: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Anreicherung wässriger Systeme mit Sauerstoff

| | | | | | |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Anwendung | Eintrag von CO ₂ über das Gaseintragsystem zur Abtötung von Mikroorganismen - <u>Entkeimung</u> | | | | |
| Verfahrensgrundlagen | <p>Mikroorganismen werden durch verdichtetes Kohlendioxid abgetötet. Da bei hohen Drücken mehr CO₂ in Lösung geht, wird die Flüssigkeit bei Drücken von 6 bis 50 MPa mit CO₂ gesättigt. Bekannte Verfahren unterscheiden sich in der Dispergierung der CO₂ in der Flüssigkeit. Säuren bedrohen sowohl die Zellstrukturen als auch die Zellinhaltsstoffe. Als Ursachen für den Zelltod sind zu nennen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beschädigung der äußeren Membran - Denaturierung von Proteinen und Enzymen - Beschädigung der DNS - Vergiftung durch Metallionen (im sauren Milieu nimmt die Löslichkeit von Metallionen zu, wodurch die biologische Verfügbarkeit ansteigt) | | | | |
| Löslichkeit von CO ₂ in Wasser | Temperatur | 0 [°C] | 10 [°C] | 20 [°C] | 30 [°C] |
| | Absorptionskoeffizient * | 1,71 [ml/l] | 1,19 [ml/l] | 0,88 [ml/l] | 0,67 [ml/l] |
| | Löslichkeit ** | 3,35 [kg/m ³] | 2,32 [kg/m ³] | 1,69 [kg/m ³] | 1,26 [kg/m ³] |
| | <p>* Absorptionskoeffizient von CO₂ in Wasser bei p = 1,013 bar ** Löslichkeit von CO₂ in Wasser bei p = 1,013 bar Die Löslichkeit nimmt mit ansteigender Temperatur ab und mit steigendem Druck zu. So lösen sich beispielsweise bei einer Druckerhöhung auf 25 bar bei 20 °C 16,3 Liter CO₂ in einem Liter Wasser.</p> | | | | |
| Anwendbarkeit Gaseintragsystem | Bei den im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuchen konnte keine keimhemmende Wirkung unter den Versuchsbedingungen bei Einbringung von CO ₂ über das Gaseintragsystem festgestellt werden. Der Grund dafür dürfte in dem zu geringen Prozessdruck bei Versuchszuführung zu finden sein. Von einer ausreichenden Durchmischung des Systems aufgrund der Eigenschaften der Technologie kann allerdings ausgegangen werden. Dies zeigten auch die Ergebnisse der CO ₂ -Eintragversuche. | | | | |

Tabelle 13: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Entkeimung

4.3.7.3 Umsetzungsbeispiel (großtechnische SBR-Versuchsanlage)

Auf Basis der vorangegangenen Labor- und Pilotversuche wurde für einen spezifischen Anwendungsfall in der Lebensmittelindustrie eine SBR-Anlage mit integriertem Gaseintragsystem konzipiert.

Dabei wurde für die Versuchsanlage ein Reaktorvolumen von 10 m³ in Form eines Sacksilos vorgesehen, wobei die Beschickung über einen 1 m³ Pufferbehälter (Vorspeicher), welcher über eine Bypassleitung aus der Zulaufleitung der Realanlage gespeist wird, erfolgt. Die Steuerung der Versuchsanlage erfolgt über eine zentrale Steuereinheit, welche über die bestehende Steuerung der Realanlage angesteuert wird. Die Sauerstoffzufuhr wird über ein Magnetventil geregelt, welches über die zentrale Steuereinheit angesteuert wird.

Durch die schubweise Beschickung der SBR-Belungsanlage aus dem Vorspeicher kann die Konzentration an organischen Abwasserinhaltsstoffen durch die Kurzzeit-Befüllung rasch auf ein maximales Niveau gehoben werden. Die Abfolge der unterschiedlichen Prozessphasen zur biologischen Aufbereitung des Abwassers kann dadurch unabhängig von der hydraulischen Belastung der Kläranlage erfolgen. Um eine ausreichende Durchmischung im Speicherbecken zu erreichen wurde neben dem Gaseintragsystem (Einbringung von Sauerstoff

| SBR-Versuchsanlage - Bemessungsgrundlagen / Auslegungsparameter | | |
|------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------|
| Volumen SBR-Versuchsanlage | 10 | [m ³] |
| max. Beschickungsmenge pro Zyklus (=Austauschvolumen) | 5,4 | [m ³] |
| TS im BB | 6,5 | [kg/m ³] |
| Überschussschlamm | 2,9 | [kg/d] |
| max. Füllhöhe SBR-Versuchsreaktor | 3,2 | [m] |
| Grundfläche SBR-Versuchsreaktor | 3,14 | [m ²] |
| Durchmesser SBR-Versuchsreaktor (im Mittel) | 2 | [m] |
| Verhältnis Höhe zu Durchmesser | 1,6 | [-] |
| Zeit Füllphase | 4 | [h] |
| Zeit Belüftung (Nitrifikation) | 14 | [h] |
| Zeit Denitrifikation | 1 | [h] |
| Zeit Sedimentation | 1 | [h] |
| Zeit Klarwasserabzug | 8 | [h] |
| Zeit Zyklus gesamt | 24 | [h] |
| Beschickung über Beschickungspumpe P01 | 1,4 | [m ³ /h] |
| Beschickung über Beschickungspumpe P01 | 23 | [l/min] |
| Umwälzung über Gaseintragsystem und Umwälzpumpe P02 | 10 | [1/h] |
| Umwälzung über Gaseintragsystem und Umwälzpumpe P02 | 100 | [m ³ /h] |
| Klarwasserabzug über Klarwasserpumpe P03 | 0,7 | [m ³ /h] |
| Klarwasserabzug über Klarwasserpumpe P03 | 11 | [l/min] |
| theor. erforderliche Sauerstoffzufuhr im BB (Faustwert) | 0,044 | [kg O ₂ /m ³ .h] |
| Alpha-Wert (Faustwert) | 0,6 | [-] |
| theor. Sauerstoffzufuhr α OC | 0,7 | [kg O ₂ /h] |
| Dichte Sauerstoff | 1,429 | [kg/m ³] |
| theor. Sauerstoffzufuhr α OC | 0,5 | [m ³ O ₂ /h] |
| theor. Sauerstoffzufuhr α OC | 0,009 | [m ³ O ₂ /min] |
| theor. Sauerstoffzufuhr α OC | 9 | [l O ₂ /min] |
| Dauer Belüftungsphase | 14 | [h/d] |
| theor. tägliche Sauerstoffzufuhr α OC | 7,2 | [m ³ O ₂ /d] |
| theor. monatliche Sauerstoffzufuhr α OC | 215 | [m ³ O ₂ /Monat] |
| theor. monatliche Sauerstoffzufuhr α OC bei 200bar | 1,1 | [m ³ O ₂ /Monat] |

Tabelle 14: Bemessungsgrundlagen / Auslegungsparameter SBR Versuchsanlage Fallstudie III

Bei der Integration des Gaseintragsystems ist allerdings auf die mögliche Zerschlagung der Belebtschlammflocken aufgrund der hohen Turbulenzen im Gaseintragsystem bedacht zu nehmen. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Sauerstoffeintragsversuche im Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch (siehe dazu auch Kapitel 4.3.3) zeigten diesbezüglich allerdings keine negativen Erscheinungen und ein gutes Absetzverhalten des Belebtschlammes.

5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

5.1 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung

Ziel der Programmlinie ist die Entwicklung und Demonstration von Konzepten und Technologien zur Produktion und Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen in einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaft. Eine „Fabrik der Zukunft“ wird in diesem Sinn darauf ausgerichtet sein, Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung weitestgehend zu reduzieren, dabei jedoch einen möglichst hohen Nutzen zu erzeugen. Ziel der Programmlinie ist es, für Unternehmen in Österreich innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential zu initiieren und zu realisieren, die die konkrete Umsetzbarkeit nachhaltigen Wirtschaftens beispielhaft nachweisen.

Gegenständliches Projekt zielte daher darauf ab, neue Anwendungsfelder für ein innovatives Produkt zur Wasser- und Abwasserbehandlung zu evaluieren, welches in der Anschaffung und im Betrieb eine kostengünstige Möglichkeit zur Optimierung der betrieblichen Wasserwirtschaft darstellt. Dem Nachhaltigkeitsaspekt wird somit voll und ganz Rechnung getragen, da das wesentliche Ziel der Ressourceneffizienz durch neuartige technische Lösungen erzielt werden soll.

5.2 Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Drei Zielgruppen waren direkt Teil des Projektteams: Die Firma J.S. EnviTEC Umwelttechnik GmbH als Technologiehersteller bzw. Technologieanbieter, die Firma DI Hitzfelder & DI Pillichshammer ZT-GmbH als Zivilingenieurbüro und die Firma Inocre Umwelttechnik GmbH als Unternehmen aus dem Bereich Umwelttechnik. Zudem wurden im Zuge des Projektes Unternehmen mit abwasserspezifischen Problemstellungen eingebunden und Pilotversuche direkt bei den Betriebsstätten durchgeführt. Dadurch ergab sich ein reger Informationsaustausch zwischen den einzelnen am Projekt beteiligten Akteuren.

5.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potentiale für die Projektergebnisse

Bis dato wurde die im Projekt untersuchte Technologie vom Patentinhaber im Bereich der Getränkeindustrie zur Abfüllung O₂-haltiger Getränke bzw. im Bereich von Fischzuchtanlagen zur Anreicherung der Aquakulturen mit Sauerstoff eingesetzt. Da im Zuge des Projektes neue Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der betrieblichen Wasserwirtschaft untersucht wurden, eröffnen sich für den Patentinhaber neue Anwendungsbereiche im Bereich der singulären

Behandlung von Prozesswässern und im Bereich der Rein-Sauerstoff-Belüftungssystemen in biologischen Abwasserreinigungssystemen. Im Vordergrund steht dabei die nachträgliche Integration der Technologie als unterstützendes Modul (Zusatzbegasungssystem) zur Abdeckung von Spitzenlasten bzw. dem gezielten Einsatz der Technologie zur Erhöhung der Kapazität vorhandener biologischer Abwasserreinigungsanlagen. Vordergründig wird dies auf den Bereich der industriellen Wasserwirtschaft bzw. der Behandlung von hoch organisch belasteter Abwasser zutreffen.

5.4 Potential für Demonstrationsvorhaben

Im Zuge der Projektdurchführung wurde die Technologie im Rahmen von Labor-, Technikums- und Pilotversuchen evaluiert und Key-Faktoren für die effiziente Integration der Technologie in bestehende Abwasserreinigungsanlagen identifiziert. Dabei zeigte sich ein breites Anwendungsspektrum in unterschiedlichen Industriebranchen, wobei die Vorteile in der modularen Bauweise der Technologie zu finden sind. Dadurch kann individuell auf die spezifischen Problemstellungen eingegangen werden und das Anlagenkonzept auf die prozess- und produktionspezifischen Gegebenheiten ausgerichtet werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der effektive Eintrag von Gasen in Fluiden ist im Bereich der Wasser- und Abwasseraufbereitung ein wichtiger Verfahrensschritt, der die Wirtschaftlichkeit ganzer Prozesse wesentlich beeinflussen kann. So benötigen beispielsweise aerobe Mikroorganismen im Bereich der biologischen Abwasserreinigung für ihren Stoffwechsel Sauerstoff, der durch geeignete Belüftungseinrichtungen dem System zugeführt werden muss. Dafür stehen unterschiedliche Belüftungssysteme zur Verfügung, wobei die Wahl des System oder der jeweiligen Systemkombinationen neben der notwendigen Sauerstoffzufuhr im Wesentlichen von den Faktoren Investitionskosten, Wartungsfreundlichkeit, Betriebssicherheit, Betriebskosten, Flexibilität und Lebensdauer bestimmt wird. Die Aufgabe solcher Belüftungssysteme besteht dabei nicht nur in der Bereitstellung einer für den Abbau organischer Verunreinigung ausreichender Sauerstoffkonzentration, sondern auch in der effektiven Durchmischung der Abwasser-Belebtschlamm-Biozönose. Einen möglichst effizienten Gas/Flüssigkeits-Sauerstofftransfer bzw. einen raschen Übergang des Sauerstoffs von der gasförmigen in die flüssige Phase kann man dabei einerseits durch einen möglichst großen Konzentrationsunterschied (z.B. durch reine Sauerstoffbegasung oder durch mit Sauerstoff angereicherte Luft) gewährleisten. Andererseits kann man dies durch eine möglichst feinblasige Belüftung und der damit verbundenen Maximierung der Grenzfläche erreichen. Zur Sicherstellung einer effektiven Sauerstoffzufuhr und Durchmischung werden daher heute vorrangig Druckluftbelüftungssysteme eingesetzt, wobei die jeweiligen Systeme als flächendeckende Belüftungssysteme oder als Druckluftsysteme mit getrennter Belüftung und Umwälzung Anwendung finden.

Die im Zuge des Projektes evaluierte Technologie zur Einbringung von Gasen in Flüssigkeiten zeigte aufgrund der hohen radialen Beschleunigung des Fluids im Gaseintragungssystem (Reaktor) eine leistungsfähige Gasverteilung in wässrigen Systemen, wobei der Sauerstoff nach erfolgter Einbringung in Form fein verteilter Gasbläschen und mit Sauerstoff übersättigten Wasser vorliegt. Gegenüber feinblasigen Druckluftsystemen ergibt sich dabei trotz des kleineren Grenzflächenfaktors (α -Wert) eine höhere Ausnutzung des eingetragenen Sauerstoffs, da die hohen Turbulenzen im Gaseintragungssystem (Reaktor) in einer stetigen Erneuerung der Grenzflächen resultieren.

Neben den durchgeführten Versuchen zur Einbringung von Sauerstoff in Fluiden wurden im Zuge der Projektdurchführung auch alternative Anwendungsmöglichkeiten und Einsatzbereiche der Technologie im Bereich der industriellen Wasserwirtschaft erprobt und evaluiert. So zeigte die Einbringung von CO_2 über das Gaseintragungssystem (Reaktor) eine durchaus potentielle Möglichkeit im Bereich der Neutralisation von alkalischen Prozesswässern. Vorteile gegenüber der Neutralisation mit Mineralsäuren werden dabei vor allem in der verminderten Salzbelastung des Prozesswassers und der Vermeidung einer Übersäuerung des Systems durch die flachere Neutralisationskurve von CO_2 gesehen. In diesem Zusammenhang ist auch auf die durchgeführten Untersuchungen zur Eliminierung seuchenhygienisch relevanter Keime durch Begasung einer Anreicherungspopulation aus Biogasgülle mittels CO_2 über das im Pro-

jekt evaluierte Gaseintragsystem hinzuweisen. Im Gegensatz zu bereits bekannten Verfahren zur Hochdruck-Kohlendioxid-Behandlung (z.B. Autoklavenmethode, Methode nach R.E. Wildasin, Methode nach M. Sims) konnte anhand der im Projekt durchgeführten Untersuchungen allerdings keine bakterizide Wirkung durch CO₂ Begasung der Versuchsmedien mittels der untersuchten Technologie festgestellt werden. Die Gründe dafür dürften primär in den zu geringen Prozessdrücken im Gaseintragsystem (Reaktor) bei Versuchsdurchführung zu finden sein – von einer ausreichenden Durchmischung der Anreicherungspopulation mit CO₂ kann aufgrund der analytischen Begleitung der Arbeiten allerdings ausgegangen werden.

Auf Basis der Ergebnisse aus den durchgeführten Labor- und Pilotversuchen wird der effiziente Einsatz der Technologie vor allem bei spezifischen Problemstellungen im Bereich der industriellen Abwasserreinigung gesehen. Zusammenfassend können dabei in Abhängigkeit von den jeweiligen produktions- und prozessspezifischen Anforderungen primär nachstehende Anwendungsbereiche/Vorteile genannt werden:

- das Gaseintragsystem zur Anreicherung von wässrigen Systemen mit Gasen eignet sich zur Abdeckung von Spitzenlasten im Bereich der biologischen Abwasserreinigung – die Sauerstoffzufuhr kann dabei sowohl auf Basis von Rein-Sauerstoff als auch auf Basis von Luft-Sauerstoff (Druckluft) erfolgen
- das Gaseintragsystem zur Anreicherung von wässrigen Systemen mit Gasen eignet sich aufgrund der modularen Bauweise zur nachträglichen Integration in bestehende Systeme – Fallstudie II zeigte eine effektive Integration einer spezifisch auf die gegebenen Bedingungen ausgelegten Anlage in ein bestehendes Abwasserreinigungssystem
- das Gaseintragsystem zur Anreicherung von wässrigen Systemen mit Gasen eignet sich aufgrund der hohen radialen Geschwindigkeiten im Reaktor zur leistungsfähigen Gasverteilung in Fluiden in Form fein verteilter Gasbläschen und mit dem jeweiligen Gas übersättigten Fluid – die Gefahr der Verstopfung, wie sie teilweise bei feinblasigen Belüftungssystemen mit porösem Material gegeben ist, kann aufgrund der hohen Turbulenzen und der druckgesteuerten Einbringung des Gases ausgeschlossen werden – Fallstudie I zeigte diesbezüglich trotz des hohen Aschegehaltes des Kreislaufwassers keine negativen Begleiterscheinungen bei Versuchsdurchführung
- das Gaseintragsystem zur Anreicherung von wässrigen Systemen mit Gasen eignet sich zur Neutralisation von alkalischen Prozesswässern durch Einbringung von CO₂ in das Fluid – Laborversuche zeigten eine rasche Einbindung von CO₂ und eine flache Neutralisationskurve die einfach und flexibel über die CO₂ Zufuhr gesteuert werden konnte

Die effektive Einbindung des Systems steht demnach im direkten Zusammenhang mit spezifischen Problemfeldern im Bereich der industriellen Wasserwirtschaft. Wesentliche Faktoren sind diesbezüglich im Prozessdesign begründet, wobei allgemein gültige Aussagen zur kosteneffektiven Einbindung in bestehende Systeme aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten nicht getroffen werden können. Nur über eine fundierte Analyse der jeweiligen Gegebenheiten können signifikante Aussagen über das notwendige Anlagendesign und der möglichen Einsparungspotentiale getroffen werden. Im Mittelpunkt der Technologieanwen-

dung steht allerdings in allen Fällen die Bemühung einer effizienten Nutzung und Aufbereitung der Ressource Wasser bei größtmöglicher Verringerung des dafür notwendigen Energie- und Chemikalieneinsatzes, um durch nachhaltiges Wirtschaften die ökonomische als auch ökologische Effizienz im Bereich der betrieblichen- und kommunalen Wasserwirtschaft zu erhöhen.

7 Literatur-/ Abbildungs-/ Tabellenverzeichnis

7.1 Literaturverzeichnis

[AAEV §2, 1996]

BGBl Nr. 186/1996: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV). Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. Wien, 1996

[Airliquide, 05.05.2011]

<http://www.airliquide.de/inc/dokument.php/standard/304/ventoxal.pdf> (Abg. 05.05.2011)

[ATV-M 210, 1997]:

ATV-DVWK-Regelwerk: ATV-M 210 Belebungsanlagen im Aufstaubetrieb. Hennef, 1997. ISBN: 3-927729-49-3

[Auerbach, 1950]

Auerbach R.: Bemerkungen zur Kavitation. In: Colloid & Polymer Science, Volume 118, Number 2/August 1950. Springer Verlag Heidelberg

[BMLFUW, 2002]

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – Sektion VII: Gewässerschutzbericht 2002 gemäß § 33e Wasserrechtsgesetz BGBl. Nr.215/1959 in der Fassung BGBl. I Nr. 156/2002, Wien, 2002. ISBN: 3-85 174-042-4

[Bildquelle: Airliquide, 05.05.2011]

<http://www.airliquide.at/loesungen/produkte/equipment/geraete/umwelt/ventoxal.html> (Abg. 05.05.2011)

[Daiminger, 2005]

Daiminger R.: Abtötung von Mikroorganismen durch verdichtetes Kohlendioxid. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2005.

[Frey, 1998]

Frey W. : Planung und Gestaltung von Belüftungssystemen. In : Wiener Mitteilungen. Band 145 (1998) 293 – 321

[Grombach et al, 2000]

Grombach P., Haberer K., Merkl G., Trüeb E.U.: Handbuch der Wasserversorgungstechnik (3. Auflage). Oldenburg-Industrieverlag, Wien, 2000. ISBN 3-486-26394-3

[Görner et al, 1999]

Görner K., Hübner K.: Gewässerschutz und Abwasserbehandlung. Springer Verlag Berlin Heidelberg New-York, 1999. ISBN 3-540-42025-8

[Kölle, 2010]

Kölle W.: Wasseranalysen – richtig beurteilt; Grundlagen, Parameter, Wassertypen, Inhaltsstoffe, Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung und EU-Trinkwasserrichtlinie (3. Auflage). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2010. ISBN-13: 978-3-527-32522-1

[Lindtner, 2007]

Lindtner, S.: Optimierungspotentiale beim Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen – Erfahrungen aus der Praxis. In: KAN (2007), Folge 15

[Nowak, 2010]

Nowak O.: Der Stellenwert biologischer Vorreinigung industrieller Abwässer mit organischen Inhaltsstoffen. In : Wiener Mitteilungen. Band 219 (2010) 293 – 321

[Schubert, 2005]

Schubert H.: Emulgiertechnik – Grundlagen, Verfahren und Anwendungen (1. Auflage). B. Behr's Verlag GmbH & Co KG, Hamburg, 2005. ISBN 3-89947-086-9

[Statistisches Bundesamt, 17.09.2009]

http://www.bmu.de/gewaesserschutz/fb/abwasser_gewerbe/doc/3274.php (Abg. 17.09.2009)

[Strabag Umwelthanlagen GmbH, 20.11.2008]

[http://www.strabag-umwelthanlagen.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/B7D0FBBF659DCDDFC12574CF004FF30B/\\$File/verfahren_LINDOX_d.pdf?OpenElement](http://www.strabag-umwelthanlagen.com/databases/internet/_public/files.nsf/SearchView/B7D0FBBF659DCDDFC12574CF004FF30B/$File/verfahren_LINDOX_d.pdf?OpenElement) (Abg. 20.11.2009)

[v.d. Emde aus Frey, 1998]

v.d. Emde W.: Belüftungssysteme und Beckenformen, Münchner Beiträge, 1969

v.d. Emde W.: Entscheidungskriterien bei der Wahl von Belüftungssystemen, IAWPR-Sonderkonferenz, Amsterdam, Progress in Water-Technology, Vol.II, Nr. 3, 1979

7.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Abwasserbehandlung in betriebseigenen Behandlungsanlagen ausgewählter Branchen in Deutschland [Bildquelle: Statistisches Bundesamt , 17.09.2009]..... | 11 |
| Abbildung 2: Vorrichtung zur Einbringung von Gasen in Fluiden – Gaseintragsystem (PNr.:503643) | 16 |
| Abbildung 3: Schema des Verfahrens nach R.E. Wildasin [Bildquelle: Daiminger, 2005]..... | 19 |
| Abbildung 4: Schema des Verfahrens nach M.Sims [Bildquelle: Daiminger, 2005]..... | 20 |
| Abbildung 5: Schema des LINDOX® Verfahrens [Bildquelle: Strabag Umwelthanlagen GmbH, 20.11.2008] | 21 |
| Abbildung 6: Schema des Ventoxal-Systems [Bildquelle: Airliquide, 05.05.2011]..... | 21 |
| Abbildung 7: Verfahrensschema Laboranlage inkl. Gaseintragsystem (Reaktor)..... | 22 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 8: Sauerstoffsättigungskonzentration nach DIN EN 25814..... | 23 |
| Abbildung 9: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 1 | 25 |
| Abbildung 10: CO ₂ -Injektor..... | 25 |
| Abbildung 11: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 2 | 26 |
| Abbildung 12: Vorrichtung zur Gaseinbringung in Flüssigkeiten - Gaseintragsystem..... | 26 |
| Abbildung 13: Schematische Darstellung Versuchsanordnung 3 | 26 |
| Abbildung 14: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 1 | 27 |
| Abbildung 15: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 2 | 27 |
| Abbildung 16: Ausgasverhalten auf Basis der Versuchsanordnung 3 | 28 |
| Abbildung 17: CO ₂ -Entkeimung durch direkte CO ₂ -Begasung (Versuchsaufbau Variante A&B) | 30 |
| Abbildung 18: Keimhemmende Wirkung durch direkte CO ₂ -Begasung–Ergebnisse Variante A | 30 |
| Abbildung 19: Keimhemmende Wirkung durch direkte CO ₂ -Begasung–Ergebnisse Variante B | 31 |
| Abbildung 20: Laboranlage inkl. Gaseintragsystem - Reaktor (Versuchsreihe 1&2)..... | 31 |
| Abbildung 21: Laboranlage inkl. Gaseintragsystem (Reaktor)..... | 32 |
| Abbildung 22: Beispiel Verlauf der Sauerstoffkonzentration – Desorptionsversuch 1 | 33 |
| Abbildung 23: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – Absorptionsversuch | 34 |
| Abbildung 24: Wasserschema der Papierfabrik..... | 34 |
| Abbildung 25: Technikumsanlage inkl. Gaseintragsystem (SBR-Versuchsanlage) | 35 |
| Abbildung 26: Verlauf der Sauerstoffkonzentrationen – Desorptionsversuche (SBR- Versuchsanlage) | 36 |
| Abbildung 27: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – 11:00 – 13:00 18.03.) | 36 |
| Abbildung 28: Verlauf der Sauerstoffkonzentration – 13:00 – 16:00 18.03. | 37 |
| Abbildung 29: Aerober Abbau organischer Substanzen im Rahmen der Desorptionsversuche | 37 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 30: Abbauuntersuchungen im OECD Die-Away-Test, Ausgangsprobe = unverdünnt .. | 39 |
| Abbildung 31: Abbauuntersuchungen im OECD Die-Away-Test, Ausgangsprobe = Verdünnung 1:2 | 39 |
| Abbildung 32: Wasserschema Fallstudie I: Papierfabrik..... | 40 |
| Abbildung 33: Anlagenschema Versuchsanlage Fallstudie I: Papierfabrik | 41 |
| Abbildung 34: Versuchsaufbau Fallstudie I: Papierindustrie | 42 |
| Abbildung 35: Biologischer Abbautest - Closed Bottle Test (Abwasser Fallstudie I: Papierfabrik) | 43 |
| Abbildung 36: Schematische Darstellung der zweistufigen Sedimentationsanlage..... | 43 |
| Abbildung 37: Sedimentationsbecken 1 | 44 |
| Abbildung 38: Gaseintragsystem – Durchfluss 200 m ³ /h..... | 44 |
| Abbildung 39: Sauerstoffkonzentration – Sedimentationsbecken 1 | 45 |
| Abbildung 40: SBR-Versuchsanlage mit Gaseintragsystem (Lebensmittelindustrie)..... | 50 |

7.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von Gasen [Quelle: Grombach et al, 2000]. | 23 |
| Tabelle 2: Keimkonzentration nach einer Inkubationszeit von 30 Minuten (Versuchsreihen I – III) | 29 |
| Tabelle 3: Keimkonzentration nach einer Inkubationszeit von 24 Stunden (Versuchsreihen I – III) | 29 |
| Tabelle 4: Sauerstoffeintragsversuche zur Verifizierung des Reaktorverhaltens (Versuchsreihe 1) | 32 |
| Tabelle 5: Versuchsbedingungen bei Durchführung des Desorptionsversuchs 1 (Versuchsreihe 2) | 32 |
| Tabelle 6: Versuchsbedingungen bei Durchführung des Absorptionsversuchs 1 (Versuchsreihe 3) | 33 |
| Tabelle 7: Abwasserzusammensetzung der Ausgangsprobe (Ablauf Anaerobie Papierfabrik)... | 38 |
| Tabelle 8: Zu- und Ablaufbelastung Versuchsanlage Fallstudie I: Papierfabrik | 41 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 9: Ergebnisse der Versuche zur Vorbehandlung des Abwassers Fallstudie I: Papierfabrik | 42 |
| Tabelle 10: Sauerstoffsättigungskonzentrationen unter Normbedingungen vs. erzielte Sauerstoffsättigungskonzentrationen unter Versuchsbedingungen..... | 45 |
| Tabelle 11: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Neutralisation..... | 47 |
| Tabelle 12: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Anreicherung wässriger Systeme mit Sauerstoff | 48 |
| Tabelle 13: Wirkungsmatrix bei Einsatz des Gaseintragsystems zur Entkeimung..... | 49 |
| Tabelle 14: Bemessungsgrundlagen / Auslegungsparameter SBR Versuchsanlage Fallstudie III | 51 |