



Effektivitätssteigerung von Seenbelüftungsmaßnahmen durch Singulett-Sauerstoff

Kurzfassung

Autoren:

Eberhard Hoehn

Karin Schmid

Volker Lieske

Annette Tworeck

gefördert durch den Klima- und Wasserschutzfonds der Badenova AG & Co. KG

Förderkennzeichen: Projektnummer 2004-08

Bewilligungsdatum: 19.04.2004

Projektlaufzeit: 05/2004-03/2006

1 Einleitung

Die hier vorgelegte Grundlagenstudie behandelt die Eignung von Singulett-Sauerstoff zur Effektivitätssteigerung bei der Seenbelüftung. Die Verwendung von Singulett-Sauerstoff hat in der Medizin, Landwirtschaft, Bodenbehandlung, Aquaristik etc. viel versprechende Effekte gezeigt (www.delta-ge.de), die vermuten ließen das diese auch für die Seenrestaurierung nutzbar gemacht werden können.

Der Seenrestaurierung wird auch in der Region Südbaden in der Zukunft eine größere Bedeutung zukommen. Die zahlreichen Baggerseen in der Region unterliegen einer zunehmenden Freizeitnutzung (Baden, Angeln, Wassersport etc.), so dass hier Maßnahmen zur Besserung bzw. Erhaltung der Wasserqualität gesucht werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wurden Vorarbeiten zu der Anwendung von Singulett-Sauerstoff bei der Tiefenwasserbelüftung, in dem anstelle von normalem Luftsauerstoff Singulett-Sauerstoff eingesetzt wurde, durchgeführt.

Das Einbringen von Sauerstoff in das Tiefenwasser (hypolimnische Belüftung) von eutrophierten Seen ist vor allem dann angebracht, wenn die Nährstoffeinträge mittel- bis kurzfristig nicht gesenkt werden können bzw. nach erfolgter Sanierung der Nährstoffeinträge die Absenkung des Trophieniveaus des Gewässers beschleunigt werden soll. Um den Erfolg der Belüftungsmaßnahmen aufrecht zu erhalten muss die Belüftungsanlage i.d.R. aber kontinuierlich betrieben werden. Insofern ist unter dem Kostenaspekt für den langfristigen Betrieb eine höhere Effizienz von großer Bedeutung.

Während die Technik des Eintrages von Luftsauerstoff in das Tiefenwasser von Seen in den letzten Jahren verbessert werden konnte und vielfach angewandt wurde, sind die Möglichkeiten zur besseren Ausnutzung des eingebrachten Sauerstoffs noch weitgehend unerforscht. Die Verwendung von Singulett-Sauerstoff könnte hier eine höhere Effektivität bedeuten, wodurch sich sowohl beim Energiebedarf als auch bei der Dimensionierung der Belüftungsgeräte Einsparungen erzielen ließen und damit die Kosten für Seensanierungsvorhaben gesenkt werden könnten. Der hier vorliegenden Kurzfassung liegt der Abschlussbericht (HOEHN *et al.* 2006) sowie die Präsentation beim Fachgespräch vom 30.05.2006 zu Grunde.

2 Singulett-Sauerstoff und Wasser

Wasser ist nach wie vor das Lebensmittel Nummer eins und unverzichtbar, nicht nur für die Menschheit sondern für alle Lebewesen auf der Erde. Beim Stoffwechsel findet ein intensiver Austausch von Wasser statt, da Lebewesen zu einem hohen Anteil selbst aus Wasser bestehen. Die Wassergüte ist somit von existentieller Bedeutung.

Wasser ist nicht gleich Wasser, selbst wenn man von Verunreinigungen und gelösten Stoffen absieht. Dies liegt in seiner Natur als molekularer Dipol begründet, die durch elektrostatische Anziehung so genannte Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden wodurch sich die Wassermoleküle zu Clustern von einigen hundert Molekülen zusammenschließen. Es gibt je nach Verunreinigung, Temperatur und Vorgeschichte eine große Vielfalt von Formen und Größen dieser Cluster. Leider ist es noch immer nicht möglich, Wasser-Cluster direkt zu beobachten und ihre Eigenschaften direkt zu untersuchen. Es sind nur Rückschlüsse beim Gefrierverhalten oder aus makroskopischen Eigenschaften wie z.B. dem Benetzungsverhalten, sowie aus molekularem Schwingungsverhalten (Infrarot-Spektroskopie) möglich.

Singulett-Sauerstoff ist eine elektronisch angeregte Form des molekularen Sauerstoffs die durch Energietransfer von mit Licht angeregten Farbstoffen, den sogenannten Photosensibilisatoren erzeugt werden kann. In Kontakt mit Wasser gibt Singulett-Sauerstoff seine Energie an Wasser ab. Dies ist eine bekannte Tatsache. Bislang nicht bekannt war, dass dieser Energietransfer nicht eine einfache Erwärmung, sondern eine messbare Veränderung der Wassereigenschaften bewirkt.

Aufgrund dieser Entdeckungen begann das Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit der „Sektion Bodenforschung“ des Umweltforschungszentrums Leipzig Halle GmbH und weiteren interessierten Instituten und Firmen die Auswirkungen dieses veränderten Wassers in ausgewählten Tests zu untersuchen.

Dabei ergab sich folgendes Bild:

- es beschleunigt das Wachstum von z.B. Mais und lässt damit einer Verminderung des Einsatzes von Düngemitteln erwarten.
- es beschleunigt den Abbau von Harnsäure (Nitrifikation) und damit die Regeneration von Fischwässern und fördert das Wachstum und Gesundheit von Fischen.

Offenbar werden Stoffwechselfvorgänge und biokatalytische Vorgänge beschleunigt, möglicherweise durch eine verbesserte Wechselwirkung von Enzymen und Zellmembranen mit den Clustern, die jedoch noch grundlegender Untersuchungen bedarf.

Die beschriebenen Phänomene zeigen ein hohes Potenzial an umweltfreundlichen Anwendungen in z.B. Landwirtschaft, Biotechnologie, Lebensmitteltechnik, Gewässer- und Bodensanierung, sowie Medizin, wobei in vielen Fällen Sonnenlicht für eine umweltfreundliche Anregung der Photosensibilisatoren eingesetzt werden kann.

Der Einsatz bei kommerziellen Anwendungen bedarf jedoch noch weiterer Erprobung sowie Optimierung.

Ziel der am Umweltforschungszentrum Leipzig–Halle GmbH durchgeführten Experimente war es, den Einfluss von mit Singulett-Sauerstoff exponiertem Wasser auf Nährstoffumsetzungen und deren steuernde Prozesse zu untersuchen. Dazu wurde die Wirkung von mit Singulett-Sauerstoff exponiertem Wasser auf das Redoxpotential, den pH-Wert, die Nährstoffdynamik sowie bodenmikrobielle Leistungsparameter in überstauten Böden untersucht. Die Versuche wurden in biogeochemischen Mikrokosmen, welche über geregelte pH-Wert-, Redoxpotential (E_h)- und Temperatureinstellungen verfügen, in Bodensuspensionen (Boden/Wasser) durchgeführt. Verbunden mit einem stärkeren Absinken des pH-Wertes (Abb. 1) und einem schnelleren Anstieg des Redoxpotentials (Abb. 2) kam es zu einer deutlich schnelleren Nährstoffmobilisierung, was sich in einer schnelleren Nitratbildung sowie einer stärkeren Umsetzung von organischer Substanz (DOC) widerspiegelte. Weiterhin konnte ein Rückgang der mikrobiellen Biomasse verzeichnet werden, verbunden mit einem starken Anstieg der β -Glukosidaseaktivität. Offenbar kommt es durch das mit Singulett-Sauerstoff behandelte Wasser zu einer Steigerung der Enzymaktivität, was mit einer Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit im Boden verbunden ist. Um hierbei gesicherte Aussagen treffen zu können, wurde der Einfluss von mit Singulett-Sauerstoff behandeltem Wasser auf die β -Glukosidaseaktivität ohne den Einfluss der Bodenmatrix getestet. Dabei kam es nach der Behandlung des Wassers mit Singulett-Sauerstoff zu einer deutlichen Erhöhung der Enzymaktivität um das 2,3-fache der in de-ionisiertem Wasser gemessenen Aktivität. Nach 6 h Versuchsdauer war die Enzymaktivität in der Variante mit Singulett-Sauerstoff behandeltem Wasser viermal so hoch wie in der Vergleichsvariante (Abb. 3). Offensichtlich werden durch das mit Singulett-Sauerstoff behandelte Wasser Stoffwechselprozesse beschleunigt.

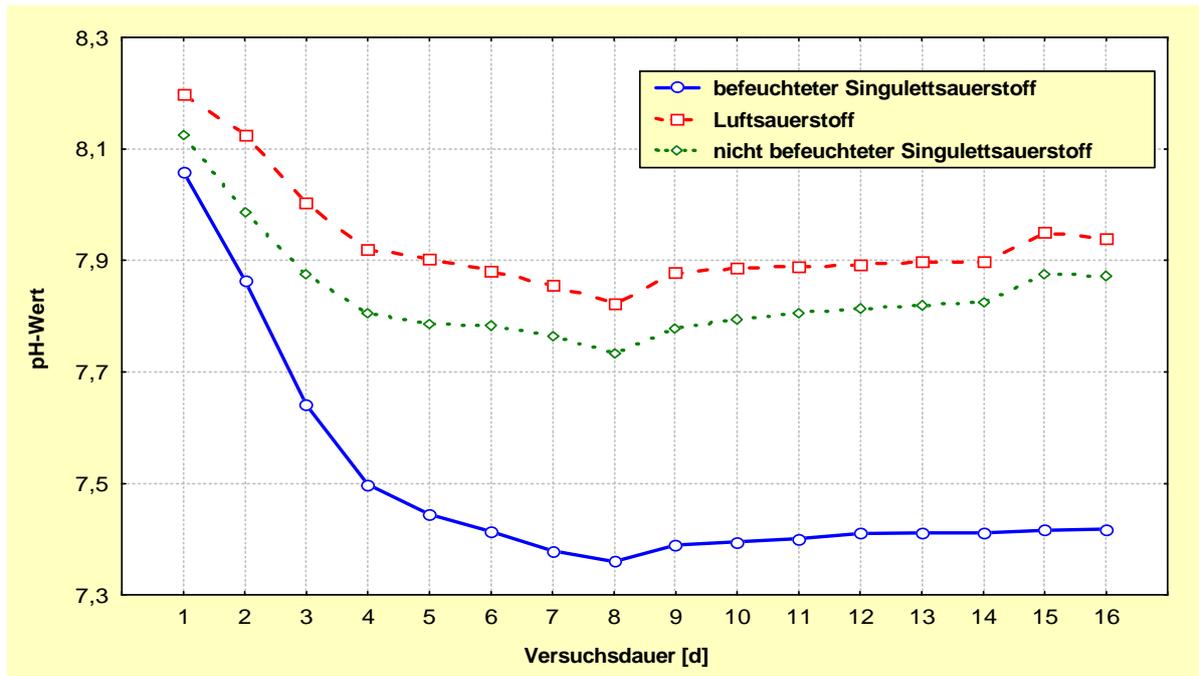


Abb. 1: Verlauf des pH-Werts in der Bodensuspension in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

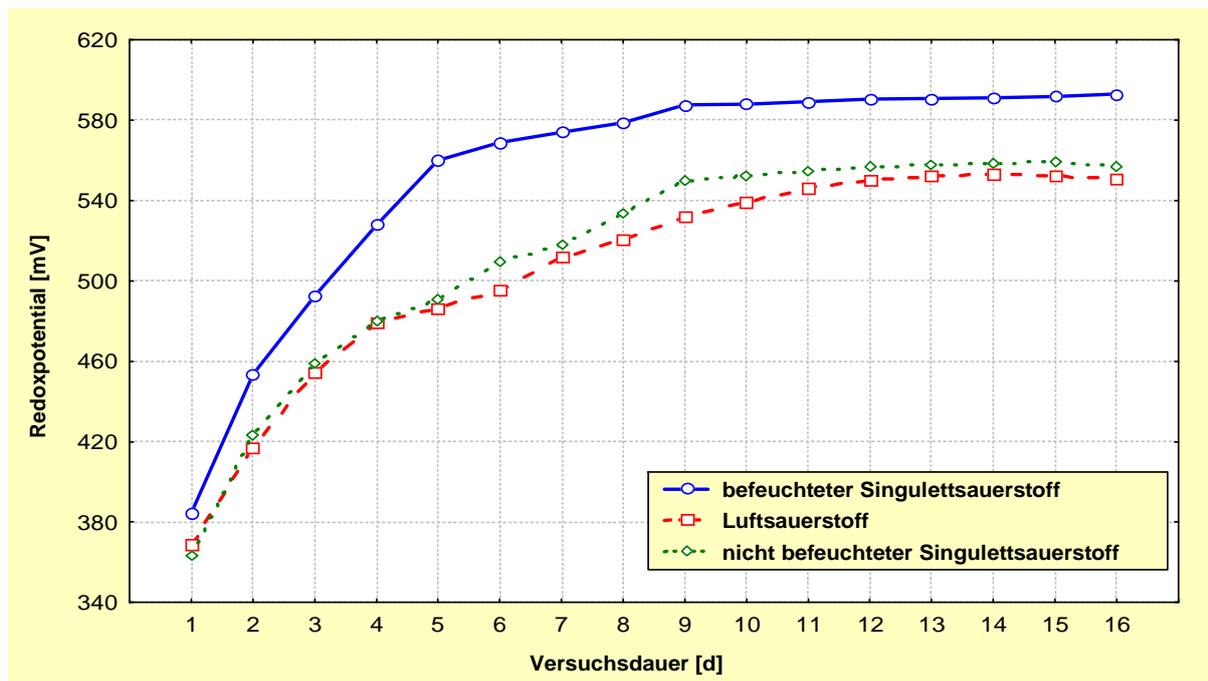


Abb. 2: Verlauf des Redoxpotentials in der Bodensuspension in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

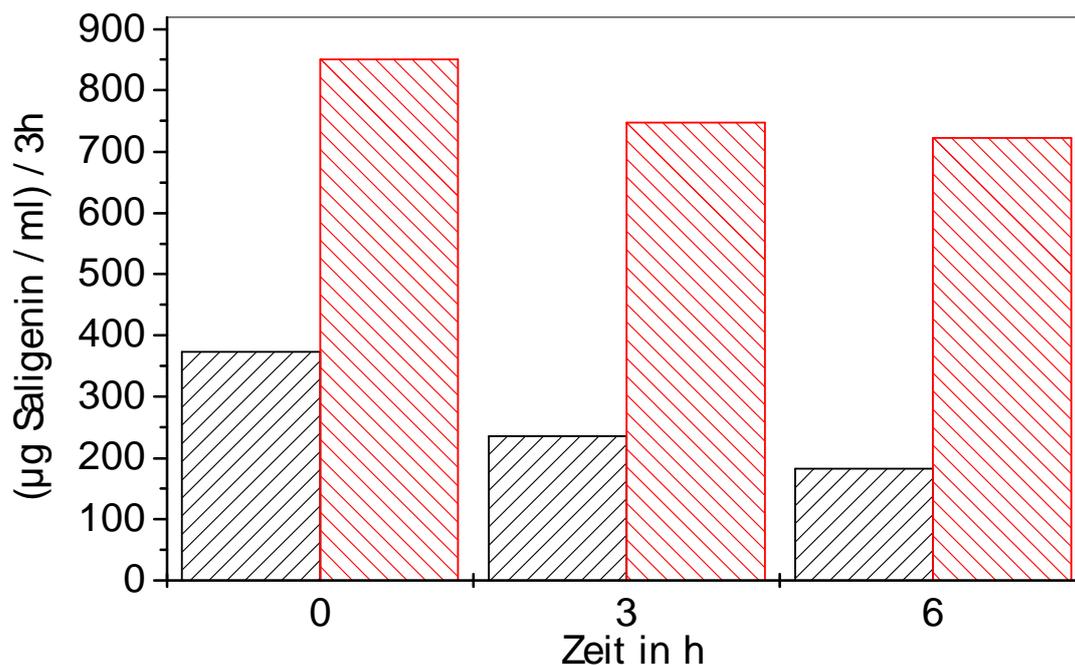


Abb. 3: Einfluss von mit Singulett-Sauerstoff behandeltem Wasser (rot) auf die β -Glukosidaseaktivität (Schwarz schraffiert dargestellt ist eine unbehandelte Vergleichsprobe).

Mit dem Ziel, die Veränderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften in mit Singulett-Sauerstoff angeregtem Wasser indirekt beschreiben zu können, wurden am Fraunhofer IGB in Stuttgart Messungen durchgeführt. Dabei wurde die Stofftransportgeschwindigkeit von Sauerstoff in Wasser, das mit Singulett-Sauerstoff behandelt wurde, verglichen mit der Stofftransportgeschwindigkeit in unbehandeltem Wasser. Der volumetrische Stoffübergangskoeffizient (k_{La} -Wert) von Sauerstoff in Wasser wurde als Messgröße zur Untersuchung des Stofftransports in Wasser ausgewählt. Die Sauerstoffaufsättigung in der Vorlage erfolgte durch Blasenbegasung bei geringem Dispersionsgrad, um die Blasenverteilung und somit die spezifische Phasengrenzfläche möglichst konstant zu halten. Gemessen wurde bei der Aufsättigung der Partialdruck von Sauerstoff in Wasser.

Diese Messungen wurden mehrfach im selben Temperaturbereich wiederholt. Die Ergebnisse lagen zwischen 10% und 20% Steigerung der des Stofftransports durch Verwendung von Singulett-Sauerstoff.

3 Warum könnte Singulett-Sauerstoff für die Seenbelüftung nützlich sein?

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte untersucht werden, ob Singulett-Sauerstoff für die Regenerierung von Phosphatbelasteten Seen gewinnbringend eingesetzt werden kann.

Mit der Belüftung werden keine Chemikalien in das Gewässer eingebracht, von denen Umweltgefahren ausgehen können wodurch die erforderliche wasserrechtliche Genehmigung erleichtert würde. Eine Belüftung benötigt demzufolge nur Energie. Im Falle einer Effektivitätssteigerung mittels Singulett-Sauerstoff könnten ggf. Investitionskosten reduziert werden (d.h. geringere Dimensionierung der Aggregate). Ebenso könnten ggf. Betriebskosten (insb. Energiekosten) gesenkt werden, was vor dem Hintergrund eines jahrelangen Dauerbetriebes besonders interessant ist.

4 Vorversuch zur Phosphatbindung

Am Fraunhoferinstitut für Solare Energiesysteme (ISE) wurden Vorversuche zur Wirkung auf die Beschleunigung der Phosphatbindung im Gewässer durchgeführt. Dazu wurde Seesediment mit 20 l Tiefenwasser bei 5 °C, dunkel in Reaktionsröhren sauerstofffrei abgefüllt und wieder sedimentieren lassen. Dann wurde mittels seitlicher Mammutpumpenwirkung ohne Rühren mit Singulett-Sauerstoff (aktiviert) und ohne (Referenz) belüftet. Als erstes Ergebnis konnte festgestellt werden, dass bei dem Prozess der oxidativen Phosphatbindung mit Singulett-Sauerstoff etwas niedrigere Endkonzentrationen an ortho-Phosphat erreicht wurden.

5 Grundlagen und technische Verfahren der Seenbelüftung

Es gibt zwei unterscheidliche Verfahren zur Seenbelüftung mit Eintrag von Luft: Mit einer hypolimnischen Belüftung kann die Schichtung aufrecht erhalten werden, während mit der Zwangszirkulation (Destratifikation) die Schichtung zerstört wird.

Die Hypolimnische Belüftung (Abb. 4 links) erfordert ein stabil geschichtetes Gewässer (i.d.R. Tiefe > 10 m). Der Sauerstoffeintrag muss ständig aufrecht erhalten werden, um das Redoxpotential ausreichend hoch zu halten. Dabei müssen ausreichend hohe Eisengehalte im Sedimentporenwasser vorliegen, da Eisen als Bindungspartner für Phosphat dient. Es darf zudem keine übermäßige H₂S-Entwicklung im Sediment und Hypolimnion auftreten, da sonst Fe^{II}-Ionen zu FeS ausgefällt werden und dem Phosphor-Bindungssystem entzogen werden.

Für eine Destratifikation (Abb. 4 rechts) ist zu beachten, dass keine zu hohen Nährstoffgehalte im Hypolimnion vorliegen, da diese durch die künstliche Vollumwälzung zu erhöhter Algenbildung führen würden, d.h. dass dieses Verfahren nur in nicht Phosphatbegrenzten (i.d.R. hypertrophen) Gewässern sinnvoll ist um damit zugleich eine Lichtbegrenzung der Algen zu erreichen.

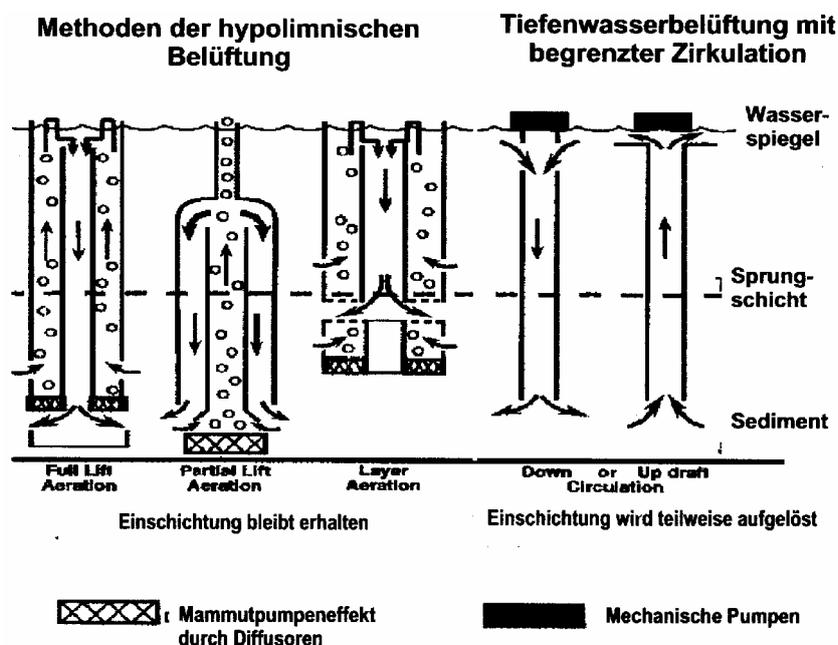


Abb. 4: Prinzipien der Seenbelüftungsverfahren (aus HOLDREN *et al.* 2001)

6 Untersuchungsobjekte des F+E-Vorhabens

Für die Versuche wurden Sedimente von zwei Seen bei Freiburg verwendet, dem Flückiger See und dem Waltershofer See. Die Seen wurden ausgewählt, da sie in kurzer Entfernung zum Labor lagen und über sie die erforderlichen limnologische Daten durch vorangegangene Untersuchungen vorlagen (s. Tabelle 1). Die Versuche fanden in den Jahren 2004 bis 2005 statt.

Tabelle 1: Nährstoffverhältnisse von Flückiger See und Waltershofer See.

Parameter	Flückiger See	Waltershofer See
Gesamt-P Hypolimnion Spätsommer [$\mu\text{g/l}$]	700	900
Gesamt-P Frühjahrszirkulation [$\mu\text{g/l}$]	18 - 48	150 - 320
Fe Hypolimnion Spätsommer [$\mu\text{g/l}$]	420 - 600	n.b.
NH_4 Hypolimnion Spätsommer [mg/l]	3 - 5	3,5 - 4,5
NO_3 Hypolimnion Spätsommer [mg/l]	0	0
NO_3 Frühjahrszirkulation [mg/l]	4,5 - 5,5	17 - 19
P im Sediment [mg/kg TM]	0,9	2,1

Daten Flückiger See: LBH & LIMNOFISCH (2003), Daten Waltershofer See: IUS (2004)

7 Versuchsprogramm

Bei dem Versuchsansatz handelt es sich um Grundlagenforschung zur Untersuchung der Wirkung von Singulett-Sauerstoff auf limnische Oxidationsprozesse, die im Labor in gekühlten, abgedunkelten 6 l-Versuchsreaktoren (Mikrokosmen) durchgeführt wurden. Folgende Versuchsansätze wurden konzipiert (vgl. Tabelle 2):

- 1. Gerührte Kurzzeit-Versuche** (Versuchsdauer ca. 15 Stunden):
Vordergründig war die Ausbildung der Eisen-Phosphat Bindung. Es wurde gerührt um homogene Bedingungen zu erreichen und länger aufrecht halten zu können.
- 2. Gerührte Langzeit-Versuche** (Versuchsdauer ca. 10-21 Tage):
Vordergründig war der Prozess der Nitrifikation (Oxidation von Ammonium zu Nitrat) bzw. der Ammoniumabbau.
- 3. Nicht gerührte Langzeit-Versuche** (Versuchsdauer ca. 11-15 Tage):
Vordergründig waren Nitrifikation und Ammoniumabbau, sowie z.T. die Eisen-Phosphat-Bindung. Es wurde in dieser Variante nicht gerührt, um die realen Belüftungsbedingungen zu simulieren ähnlich wie in dem Phosphatbindungs-Vorversuch. Diese Versuche wurden nur mit Material vom Flückiger See durchgeführt.

Tabelle 2: Anzahl der Versuche und Versuchsvarianten.

Art	Flückiger See				Waltershofer See		Summe
	gerührt		nicht gerührt		gerührt		
Begasung	Singulett-Sauerstoff	Luft-Sauerstoff	Singulett-Sauerstoff	Luft-Sauerstoff	Singulett-Sauerstoff	Luft-Sauerstoff	
Kurzzeit	2	1			7	6	16
Langzeit	2	1	4	4	3	3	17
Summe	4	2	4	4	10	9	33

8 Ergebnisse und Resumée

Zur Auswertung wurden von allen Versuchen aus den chemischen Analysendaten relative Anteile (%) errechnet, jeweils bezogen auf die Ausgangskonzentrationen. In allen Versuchsmodi bzw. Begasungsvarianten wurden diese Werte jeweils zeitlich synchronisiert und gemittelt. Das Ergebnis diese Mittelwerte wird in Grafiken dargestellt, wobei immer die beiden Begasungsvarianten in einer Grafik gegenübergestellt werden. Es werden zudem Regressionskurven für die Prozesse angegeben.

zu 1. Kurzzeitversuche mit Rühren:

- Für die oxidative Phosphatbindung waren keine deutlichen Unterschiede zwischen der Belüftung mit Singulett-Sauerstoff (aktiviert) und der Referenz nachzuweisen (Abb. 5).
- Bei dem Versuchsansatz mit Material vom Flückiger See stieg die Sauerstoffkonzentration bei der Begasung mit Singulett-Sauerstoff stärker an als mit Luftsauerstoff (Referenz) (Abb. 6).

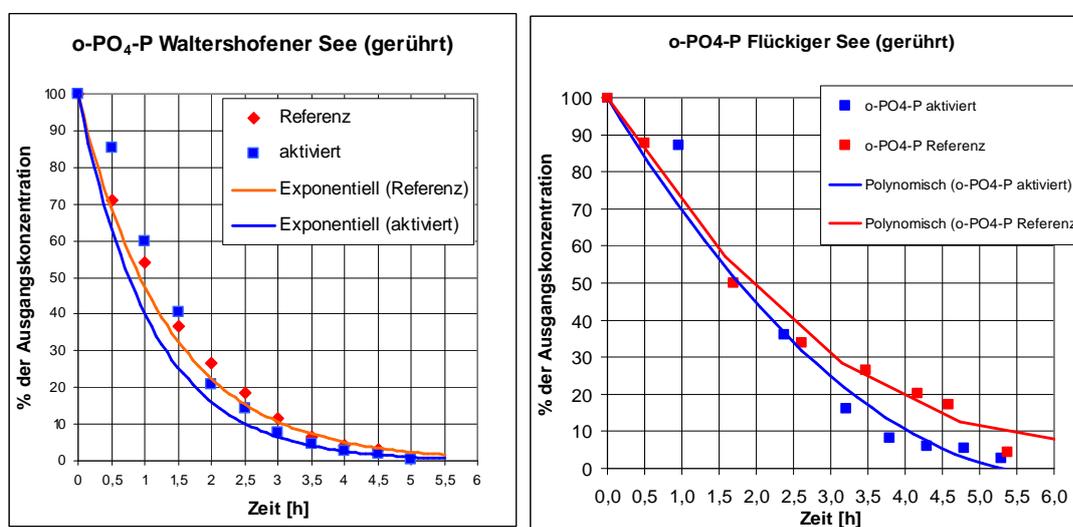


Abb. 5: Änderung der von PO₄-P in % der Ausgangskonzentration

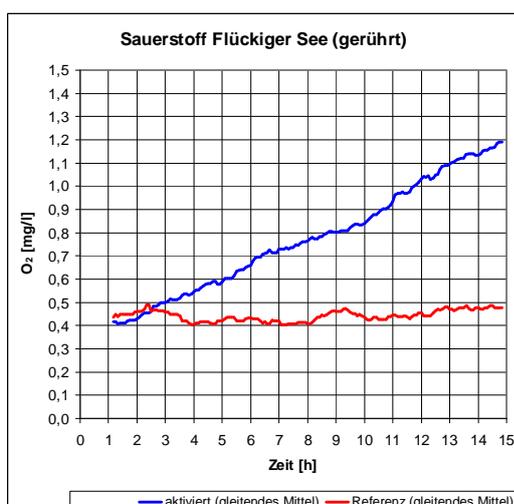


Abb. 6: Sauerstoffkonzentration, Ansatz Flückiger See

zu 2. Langzeitversuche mit Rühren:

- Mit Material vom Waltershoferer See waren für den Ammoniumabbau, Nitrifikation (Abb. 7) und das Redoxpotential (E_h) (Abb. 8) keine deutlichen Unterschiede zwischen der Belüftung mit Singulett-Sauerstoff und Referenz festzustellen.
- Im Ansatz des Flückiger Sees zeigten sich bei Belüftung mit Singulett-Sauerstoff eine deutlich höhere Nitrifikation und Sauerstoffanreicherung (E_h , O_2). Hier war jedoch der Ammoniumabbau gehemmt (Abb. 9).

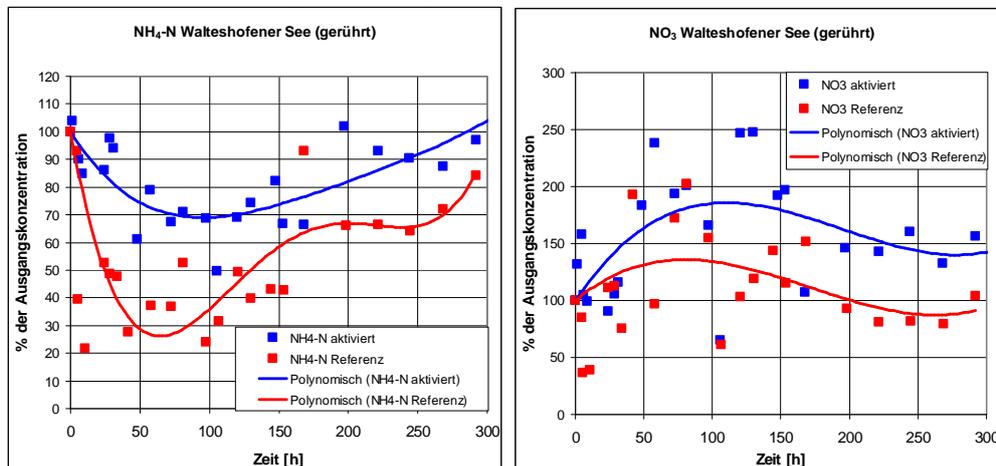


Abb. 7: Änderung von Ammonium und Nitrat, Ansatz Waltershoferer See in % der Ausgangskonzentration

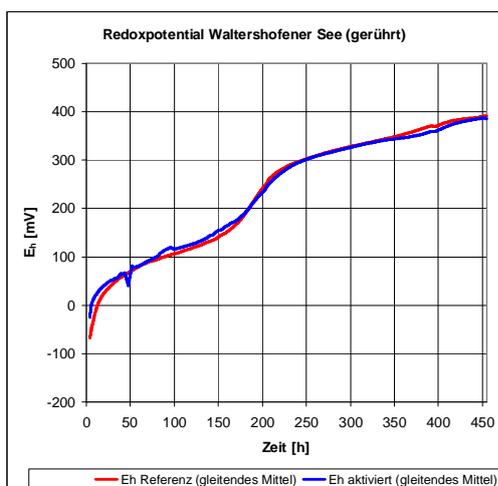


Abb. 8: Redoxpotential, Ansatz Waltershoferer See, Zeit ab Versuchsbeginn

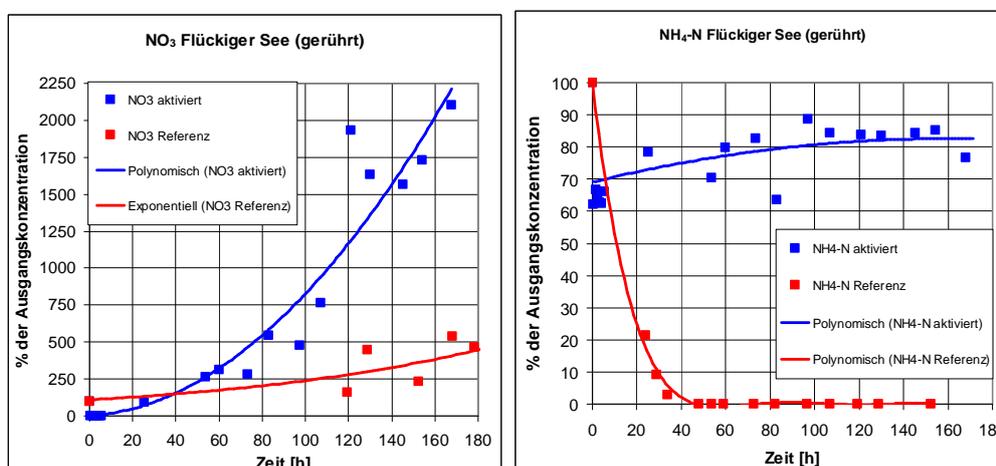


Abb. 9: Änderung von Nitrat und Ammonium, Ansatz Flückiger See in % der Ausgangskonzentration

zu 3. Langzeitversuche ohne Rühren (nur mit Material vom Flückiger See durchgeführt):

- Bei Belüftung mit Singulett-Sauerstoff war eine höhere Nitrifikation zu erkennen.
- Der Ammoniumabbau blieb unverändert (Abb. 10).

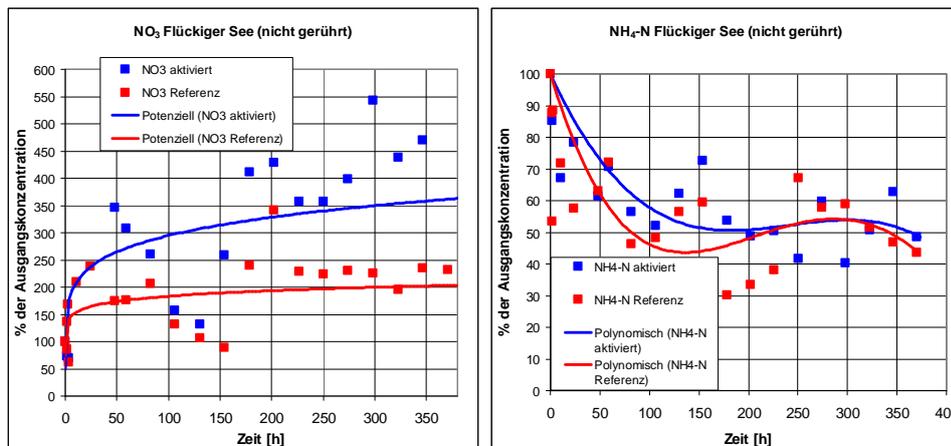


Abb. 10: Änderung von Nitrat und Ammonium, Ansatz Flückiger See in % der Ausgangskonzentration

8.1 Gesamtbetrachtung:

- Durch den Belüftungsprozess ist von einer hohen Bioaktivität auszugehen, wobei das chemische Potential aus dem Sediment ausgeschöpft wird.
- Der Ammoniumabbau wird durch Singulett-Sauerstoff eher gehemmt, was ggf. kontraproduktiv für diese Belüftungsart wäre.
- Für eine aussichtsreiche technische Anwendung der Seenbelüftung zeigt Singulett-Sauerstoff nicht die erforderlichen Effekte.

9 Eignung von Seenbelüftung für die Freiburger Seen

Voraussetzungen:

- Das Verhältnis $\text{Fe}^{\text{II}} : \text{P}$ im Porenwasser sollte mindestens > 1 (molar) sein, d.h. Eisen sollte im Überschuss vorliegen, damit der folgende Prozess quantitativ ablaufen kann:

$$\text{Fe}^{\text{II}} + \text{PO}_4 \Rightarrow \text{Fe}^{\text{III}}\text{OOH} \sim \text{PO}_4$$
- Ab einem Verhältnis $\text{Fe}^{\text{II}} : \text{P}$ von $> 8,3$ (molar) traten in belüfteten Seen keine PO_4 -Rücklösungen mehr auf (JENSEN *et al.* 1992)

Die folgende Tabelle 3 stellt die Ergebnisse für diese Frage in den beiden Freiburger Baggerseen zusammen:

Tabelle 3: Fe:P-Verhältnisse im Sedimentporenwasser von Waltershofer See und Flückiger See.

See	Messung	min Fe:P (mol)	max Fe:P (mol)	Median Fe:P (mol)
Waltershofener See	¹ O ₂ Laborversuche (diese Arbeit)	0,73	6,44	1,89
Flückiger See	¹ O ₂ Laborversuche (diese Arbeit)	0,37	14,91	5,57
Flückiger See	Sedimentkerne Porenwasser 0-2 cm (LBH & LIMNOFISCH 2003)	0,40	1,60	0,64
Flückiger See	Dialyseporenwassersammler 0-40 cm (LBH & LIMNOFISCH 2003)	2,71	149,98	19,16

Vom Waltershofer See liegen keine zonierten Analysen der Sedimente aus Sedimentkernfraktionierungen sowie mittels Dialyseporenwassersammlern vor.

10 Schlussfolgerungen

- Die Laborversuche für Singulett-Sauerstoff fanden i.d.R. mit für die Seenbelüftung ausreichenden Eisengehalten statt.
- Im Flückiger See sind in den tieferen Sedimentschichten ausreichend hohe Eisengehalte für eine redoxsensitive Phosphatbindung vorhanden, woraus hier ein geringeres Rücklösungspotential von Phosphat resultiert.
- An der Sediment-Wasser-Grenzschicht (0-2 cm) sind im Flückiger See die Eisengehalte deutlich niedriger als in den tieferen Sedimentschichten. Dies kann durch die sulfidische Ausfällung des Eisens ($\text{FeS}\downarrow$) durch Schwefelwasserstoff (H_2S) verursacht sein, was in dieser Sedimentschicht eine höhere Rücklösungsrate bedeuten würde.
- Für eine dauerhafte Phosphatfestlegung würde ausschließlich eine Belüftung den Freiburger Seen allein wahrscheinlich nicht helfen, ggf. aber eine Kombination mit Fällmitteln (z.B. Eisen- oder Aluminiumsalze), mit denen bestenfalls eine redoxunabhängige Phosphatbindung erzielt werden könnte.

11 Danksagung

Wir danken

- der Badenova AG & Co KG für die Förderung dieser Forschungsarbeit, die ohne den Zuschuss nicht möglich gewesen wäre,
- dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme Freiburg, Michael Köhl und Franz Brucker für die Diskussion und Beratung sowie für die Zuarbeit der Textteile zur Theorie der Generierung und Wirkung von Singulett-Sauerstoff (KÖHL *et al.* 2002),
- dem Umweltschutzamt und dem Forstamt der Stadt Freiburg für die Erlaubnis zur Befahrung der Waldwege im Mooswald (Waltershofener See),
- dem Umweltschutzamt der Stadt Freiburg (Herr Weiss) für die zur Verfügungstellung der Messdaten zum Waltershofener See (Studie IUS 2002 ff),
- dem Institut für Technische Chemie, Bereich Wasser- und Geotechnologie (ITC-WGT) Forschungszentrum Karlsruhe (Ute Berg) für die Leihgabe von Sedimentröhren und Isolierboxen.

12 Literatur

- HOEHN, E , SCHMID, K.-U., LIESKE, V. & TWORECK, A. (2006): Effektivitätssteigerung von Seenbelüftungsmaßnahmen durch Singulett-Sauerstoff. Abschlussbericht, Badenova AG & Co KG, Innovationsfond „Klima- und Wasserschutz“ FKZ 2004-08. Freiburg, unveröff.
- HOLDREN, C., JONES, W. & TAGGART, J. (2001): Managing Lakes and Reservoirs. North American Lake Management Society and Terrence Institute, in cooperation with Office Water Assess Watershed Prot. Div. USEPA, Madison, WI.
- JENSEN, H.S., KRISTENSEN, P. JEPPESEN, E. & SKYTTE, A. (1992): Iron:phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes. *Hydrobiologia* **235/236**:731-743
- KÖHL, M , BRUCKER, F & LIESKE, V. (2002): Mit Singulett-Sauerstoff behandeltes Wasser und dessen Nutzungspotential. Fraunhofer Institut für solare Energien Freiburg, unveröff. Bericht.
- LBH & LIMNOFISCH (2003): Limnologische Untersuchung des Seeparksees (Flückiger See). Ergebnisse 2002. Stadt Freiburg, unveröff., 137 S.
- IUS (Institut für Umweltstudien) (2003): Ness, A. & Renz, M.: Gewässerökologische Studie Opfinger See, Sanierungs- und Entwicklungsvorschläge. Stadt Freiburg Umweltschutzamt, unveröff., 34 S.