

Mikro-Elektrolyseverfahren (MEV) zur Vorbehandlung ligninhaltigen Abwassers aus der Zellstoff- und Papierherstellung

Endbericht zum Forschungsvorhaben der Max-Buchner-Forschungstiftung

Berichtszeitraum: Juli 2008 bis Juli 2009

Fördernummer 2751

Prof. Dr.-Ing. Peter Cornel, M. Eng. Guomin Zhang

1 Einleitung

1.1 Aktueller Stand der Zellstoff- und Papierherstellung in China

Holz als der weltweit am meisten verwendete Rohstoff der Papier- und Zellstoffproduktion spielt in der chinesischen Papier- bzw. Zellstoffindustrie eine untergeordnete Rolle. Im Jahr 2004 wurden in China ca. 83,9 % des Rohzellstoffs (ohne Altpapierrecycling) aus holzfreien Rohstoffen, wie z.B. Stroh, Zuckerrohr, Schilf, usw., hergestellt; ca. 70 % davon waren Reis- und Weizenstroh [1].

Der Einsatz von Reis- und Weizenstroh in der Zellstoffproduktion führt zu Problemen bei der Behandlung der Produktionsabwässer. Zum einen lassen sich die Lignine aus der Strohzellstoffherstellung wegen der höheren SiO₂ und Hemicellulosegehalte in der Schwarzlauge schlechter zurückgewinnen und finden sich deshalb zu einem größeren Anteil im Abwasser. Zum Zweiten wird die Situation dadurch erschwert, dass die Zellstoffherstellung in vielen kleinen Betrieben mit Produktionsmengen < 75 Tonnen pro Tag erfolgt, für die sich eine Rückgewinnung von Schwarzlauge betriebswirtschaftlich nicht lohnt. Aus diesem Grund werden in China ca. 35 % der nach dem Soda-, Soda/AQ-, Sulfat-Verfahren erzeugten Schwarzlauge mit dem Bleichabwasser (dem so genannten „Mittelstufeabwasser“) häufig ohne oder mit unzureichender Behandlung direkt in den Vorfluter eingeleitet. Dies führt zu erheblichen Umweltproblemen [1][2].

Laut den statistischen Daten von SEPA (State Environment Protection Agency China) betrug die gesamte Abwassermenge der chinesischen Papierindustrien im Jahr 2004 3,19 Mrd.m³. Dies wird nur noch von der Chemieindustrie übertroffen. Papierabwasser trägt damit zu 16,1 % der gesamten Industrieabwassermenge bei [11]. In 28 Papier- und Zellstofffabriken ist eine Rückgewinnung der Schwarzlauge im Produktionsprozess integriert [1]. Dadurch, dass viele kleine Papier- und Zellstoffhersteller (Produktionsgröße < 75 Tonnen/Tag) ihre Abwässer aus Kostengründen nicht effektiv behandeln können, ist ein kostengünstiges Verfahren, insbesondere eine kostengünstige Vorbehandlung der Lignine zur Verbesserung der biologischen Abbaubarkeit des Abwassers zu entwickeln.

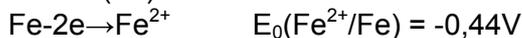
1.2 Verfahren des MEVs und Eigenschaften des Lignins

Die Funktionsprinzipien des MEVs zur Vorbehandlung der organischen Verbindungen basieren auf dem elektrochemischen Grundprinzip der Metallkorrosion. Die allgemeinen Grundlagen für diese Prinzipien sind [5] [6] [7]:

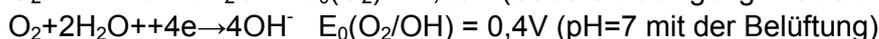
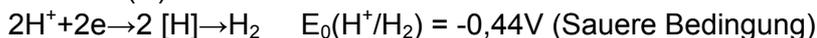
Durch die Metallkorrosion werden aktivierte Fe³⁺-Kation erzeugt. Mit der Adsorption der organischen Verbindungen an das Fe³⁺-Kation und durch dessen Flockung wird ein Reinigungseffekt erzielt.

Elektrodenreaktionen: [5] [6] [7]

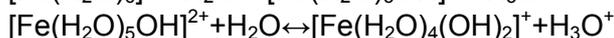
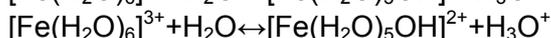
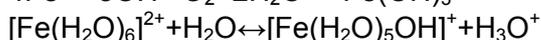
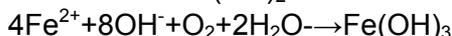
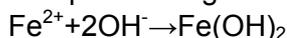
Anode (Fe):



Kathode (C):



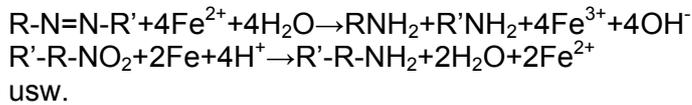
Komplexbildung



Reduktion des Fe²⁺-Kations

Einige organische Verbindungen werden mit dem Fe²⁺-Kation reduziert.

Redoxreaktion:

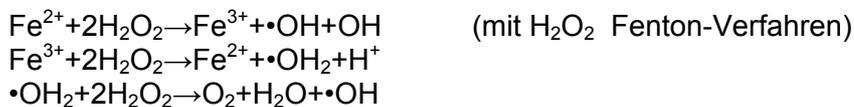


Auf der Kathodenoberfläche werden H⁺-Kationen als aktivierte [H] reduziert. Dann reagiert [H] mit den organischen Verbindungen. Die Reaktionsformel ist ähnlich wie beim Fe²⁺-Kation.

Elektrodenpolarisation

In der Kathode werden aus H₂O₂ OH-Radikale erzeugt. Damit werden die organischen Verbindungen im Abwasser reduziert.

Elektrodenpolarisation:

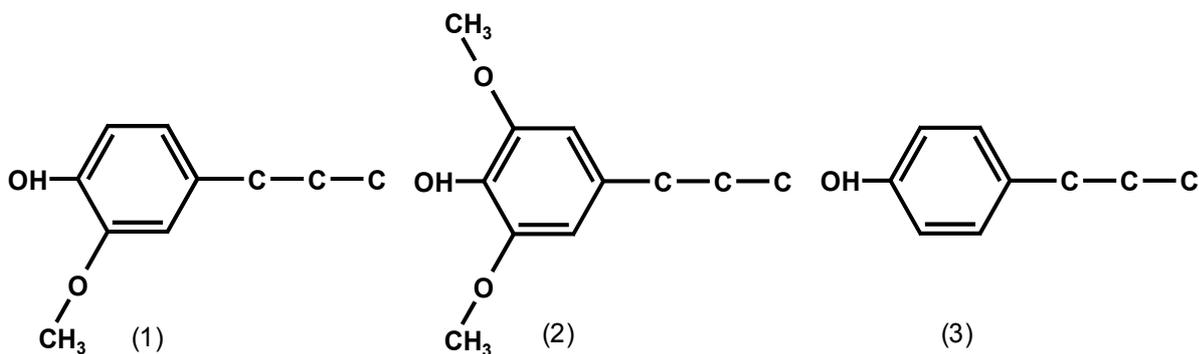


Kathodenreduktion

Die organischen Verbindungen bekommen die Elektronen direkt von der Kathode.

Eine systematische Theorie über die Wirkmechanismen des MEV zur Vorbehandlung von Industrieabwasser liegt noch nicht vor [5] [6] [7].

Lignin ist aufgrund seiner chemischen Eigenschaften und Molekülstruktur eine sehr schwer biologisch abbaubare Substanz (s. Abb. 1). In der Natur kann das Lignin nur von bestimmten Arten von Mikroorganismen und Pilzen über sehr lange Zeiträume abgebaut werden. Dieser langsame, natürliche Prozess zum Ligninabbau ist technisch nicht umsetzbar. Von den chemischen Eigenschaften her gehören Lignine zu den aromatischen Verbindungen. Prinzipiell lassen sich deshalb AOP (Advanced Oxidation Prozesses) anwenden, um die Molekülstruktur aufzubrechen. Diese Verfahren gelten allerdings nicht als kostengünstig [3].



Langkettige Lignine bestehen aus: (1) guaiacyl Propan,
(2) eugenyl Propan,
(3) 4-hydroxy Propan.

Abb. 1: Moleküle der langkettigen Lignine

In ersten Laborversuchen wurden mit dem so genannten Mikro-Elektrolyseverfahren gute Ergebnisse zur Entfärbung von Abwasser aus der Papier- und Zellstoffherstellung erreicht. Das MEV kann durch eine mikro-elektro-chemische Reaktion die Strukturen der Lignine verändern und so eine bessere Abbaubarkeit des ligninhaltigen Abwassers erreichen. Die Färbung und die CSB-Konzentration des Bleichabwassers resultieren zum größten Teil aus den Ligninen und seinen Verbindungen. Mittels einer Spektralanalyse konnte gezeigt werden, dass die stabilen Benzolringe in der Verbindung geöffnet werden [4]. Durch diese Vorbehandlung der aromatischen Verbindungen kann der nachfolgende biologische Abbau deutlich verbessert werden.

1.3 Einsatz des MEVs zur Papierabwasserbehandlung

Zurzeit wird das MEV in China besonders als Vorbehandlungsverfahren für Industrieabwasser (z.B. Färberei, Medizin, Chemie, usw.) angewendet [7] [8]. In der Papierindustrie wird das MEV nur für die Reinigung des Bleichabwassers und die Reinigung des aus Holz erzeugten Papierabwassers sowie zur Entfärbung des Papierabwassers verwendet [4] [9] [10]. Eine ausführliche Literatur-Recherche zeigt den Forschungsbedarf in diesem Themenbereich.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die Eignung des MEV zur Vorbehandlung von ligninhaltigen Abwassers aus der Papierherstellung mit Strohzellstoffen untersucht. Hierbei soll geklärt werden, in wieweit das MEV die biologische Abbaubarkeit des Abwassers verbessert und das Verfahren an sich optimiert werden kann.

2 Materialien und Methoden

2.1 Abwasser

Das Abwasser der Versuche stammt aus der Zellstoff- und Papierfabrik Rosenthal GmbH & Co. KG in Blankenstein (Saale). Dort wird Holz als Rohstoff zur Gewinnung von Zellstoff eingesetzt. Der Zellstoff wird nach dem Sulfatverfahren produziert.

Abwassereigenschaft:

Schwarzlauge: CSB-Konzentration = ca. 380.000 mg/L; pH-Wert = ca.13,3.

Die 20-fach verdünnte Schwarzlauge ist vergleichbar mit dünner Schwarzlauge aus der Papierindustrie in China. Die 125-fach verdünnte Schwarzlauge ähnelt dem Mittelstufeabwasser der Papierindustrie in China.

2.2 Labortechnische Versuchsanlage

Die Laborversuchsanlage besteht aus einem 54 L Reaktionsbehälter, der mit Eisenspänen gefüllt ist. Die Eisenspäne stammen aus der Metallverarbeitung und müssen zuerst mit dünner Schwefelsäure gespült werden, um die Oxidhaut und Öl auf der Oberfläche der Eisenspäne zu beseitigen.

Das Papierabwasser wird zunächst mit Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 6 eingestellt, anschließend in den Reaktionsbehälter gegeben und mittels Belüfterdüsen grobblasig belüftet. Nach mehreren Stunden Aufenthaltszeit wird das Abwasser wieder abgepumpt und mit Natronlauge auf einen pH-Wert von 10 eingestellt, um die entstandenen Zwischenprodukte auszufällen. In Abbildung 2 ist die Laborversuchsanlage schematisch dargestellt.

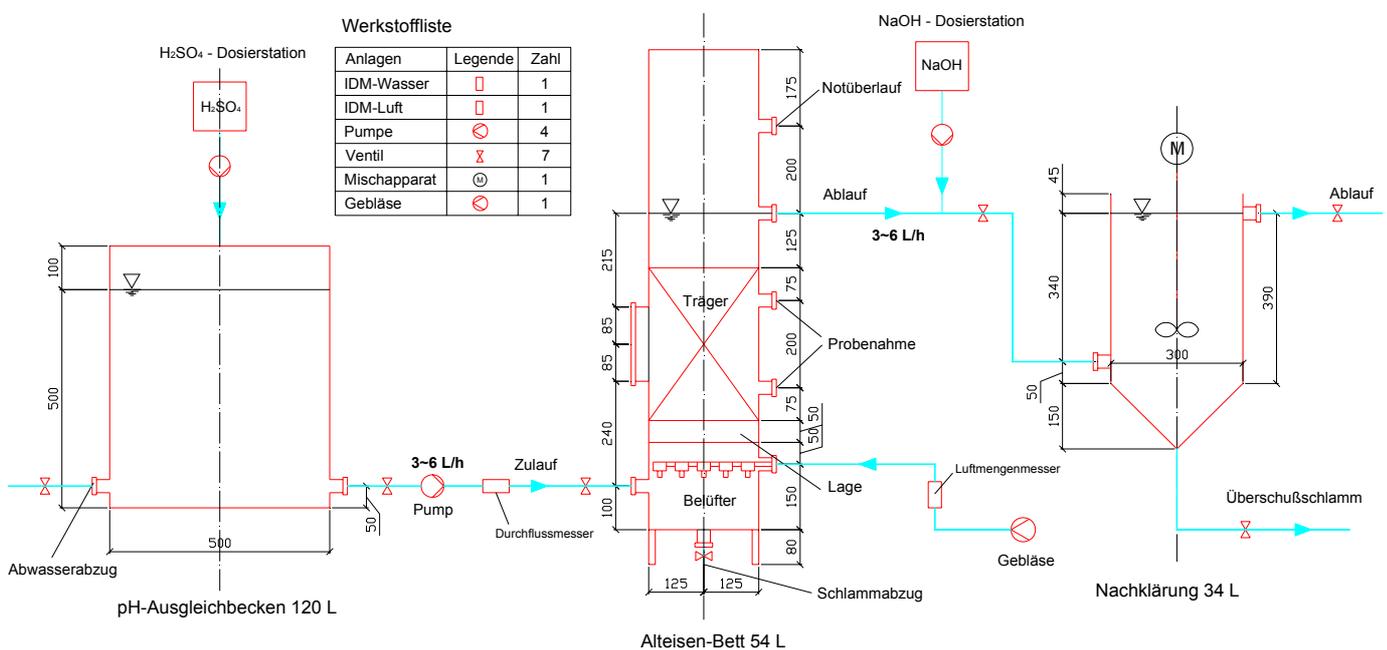


Abb. 2: Fließschema der labortechnischen Versuchsanlage zur Untersuchung des MEVs

2.3 Analyseprogramm

Probenahmestellen: Zulauf, nach der Mikro-Elektrolyse Stufe, nach der pH-Wert Regelung. Während des Betriebs werden die Parameter BSB₅, CSB mittels Schnelltests der Firma Hach Lange analysiert. Die pH-Werte und der gelöste Sauerstoff des Abwassers werden online gemessen.

2.4 Betriebsphasen der labortechnischen Versuche

Mit der Laborversuchsanlage wurden insgesamt 14 Betriebsphasen (inklusive 3 Betriebsphasen mit Fällungsmittel) durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Betriebsphasen der Laborversuche im Detail dargestellt.

Tabelle 1: Betriebsphasen der labortechnischen Versuche

Betriebsphase	CSB-Konzentration (mg/L)	pH-Wert (oder Fällungsmittel)
1	pH-Wert Regelung mit H ₂ SO ₄	
2	30.720	12,6
3	27.440	9
4	25.600	7,5
5	26.160	6
6	3.322	9,6
7	3.150	7
8	2.980	6
9	3.000	6,9
10	3.020	6,15
11	3.050	5,9
12	3.050	PIX-111 (FeCl ₃)
13	3.130	PIX-113 (Fe ₂ (SO ₄) ₃)
14	2.980	PAX-XL9 (Polyaluminiumchlorid-sulfatlösung)

Ziel der Versuche ist die Untersuchung der verbesserten biologischen Abbaubarkeit des Papierabwassers durch MEV. Im Hinblick auf eine spätere Beurteilung gehören hierzu im Einzelnen

Einfluss des pH-Wertes

Einfluss der Sauerstoff-Konzentration

Einfluss der Zulaufkonzentration des Abwassers

Einfluss der Reaktionszeit

Veränderung der biologischen Abbaubarkeit des Abwassers

Vergleich des MEVs mit Fällungstests

Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Optimierung der Betriebsparameter des MEVs

3.1.1 Einflussfaktor: pH-Wert

Für die Elektrolyse-Reaktion des MEVs ist zum einen der pH-Wert des Abwassers sehr wichtig, da bei niedrigem pH-Wert mehr Elektronen für die Elektrolyse-Reaktion geboten werden. Zum anderen spielt der pH-Wert eine große Rolle für den Wirkungsgrad der nachfolgenden Fällungsstufe.

Das Papierabwasser wird zunächst mit Schwefelsäure auf einen pH-Wert von ca. 6, 7 bzw. 9 eingestellt. Um die Veränderung der pH-Werte während der Belüftung zu dokumentieren, wurde jede Stunde eine Probe gemessen. In Abbildung 3 ist die Veränderung der pH-Werte während der Belüftung dargestellt.

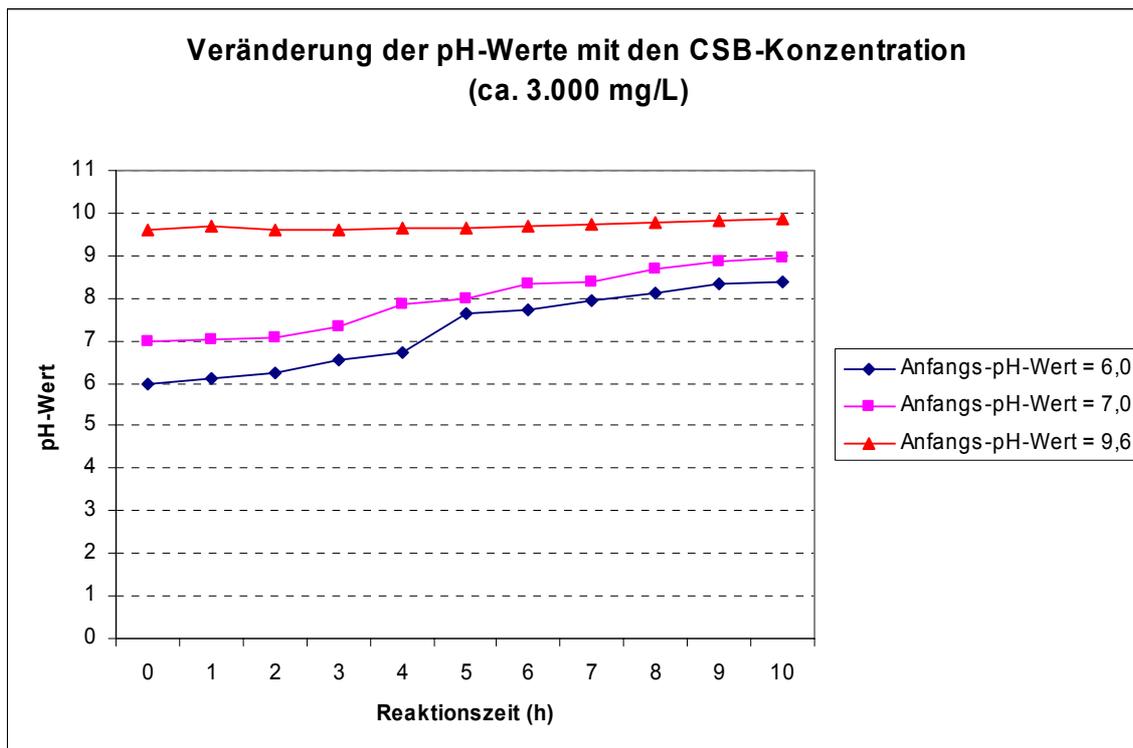


Abb. 3: Veränderung der pH-Werte (CSB-Konzentration = ca. 3.000 mg/L) in Abhängigkeit der Belüftungszeit

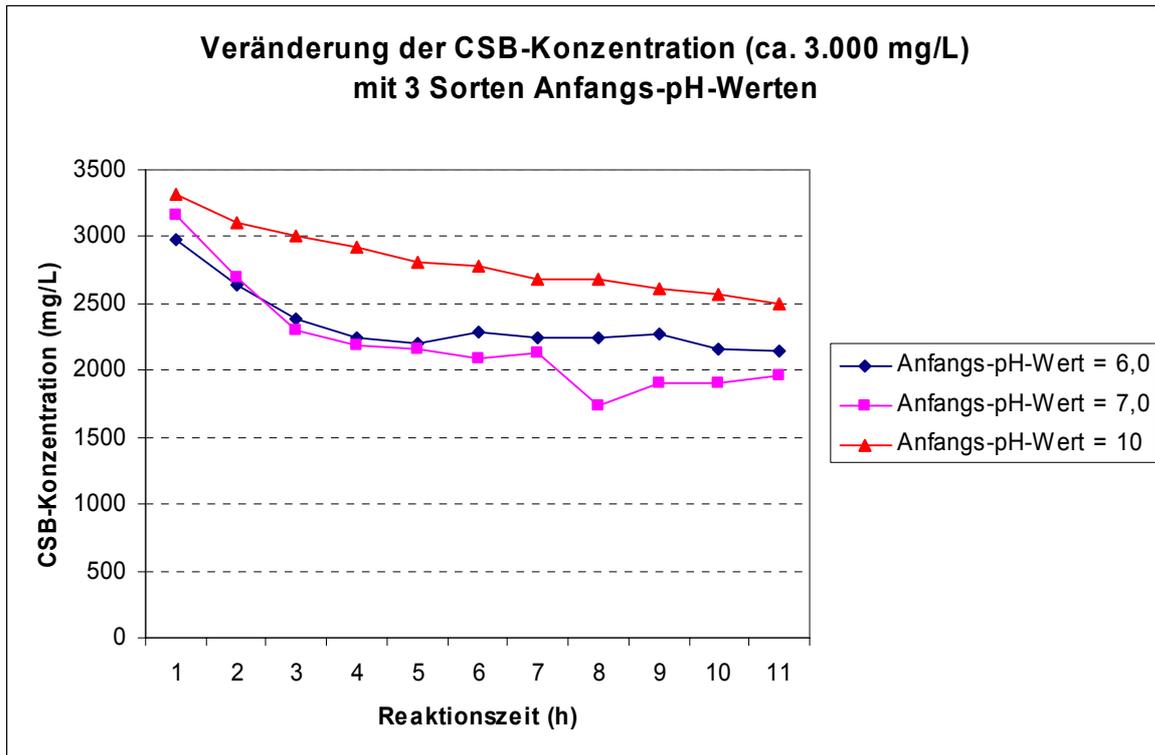


Abb. 4: Veränderung der CSB-Konzentration (ca. 3.000 mg/L) bei verschiedenen Anfangs-pH-Werten

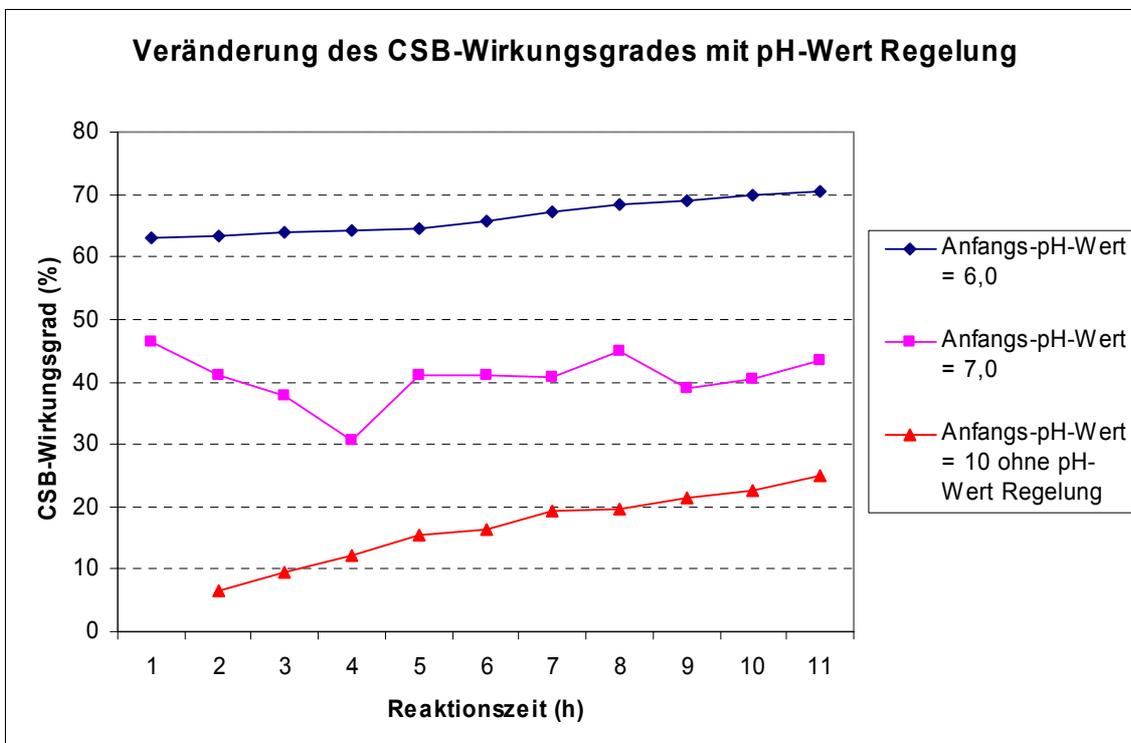


Abb. 5: Veränderung des CSB-Wirkungsgrades (CSB-Konzentration = ca. 3.000 mg/L) mit pH-Wert Regelung bei verschiedenen Anfangs-pH-Werten

Die Ergebnisse zeigen, dass die Effizienz der CSB-Elimination vom Anfangs-pH-Wert beeinflusst wird. Die CSB Entfernungseistung ist bei niedrigem Anfangs-pH-Wert größer als mit hohem Anfangs-pH-Wert (Abbildung 4 und 5).

3.1.2 Einflussfaktor: Sauerstoff-Konzentration

Die Funktionsprinzipien des MEVs zur Vorbehandlung der organischen Verbindungen zeigten, dass unter sauren Bedingungen mit Belüftung das Redoxpotential am höchsten ist. Zum einen erhöht sich mit der Belüftung die Konzentration des Sauerstoffs im Abwasser, auf der anderen Seite wird durch die Belüftung ein Absetzen der Alteisenpartikel verhindert.

Die Versuche wurden mit 4 verschiedenen O₂-Konzentration (6,75 mg/L; 7,0 mg/L; 7,25 mg/L; 7,50 mg/L) durchgeführt. Während der Belüftung wird jede Stunde eine Probe gemessen. In Abbildung 6 ist die Veränderung der CSB-Konzentration dargestellt.

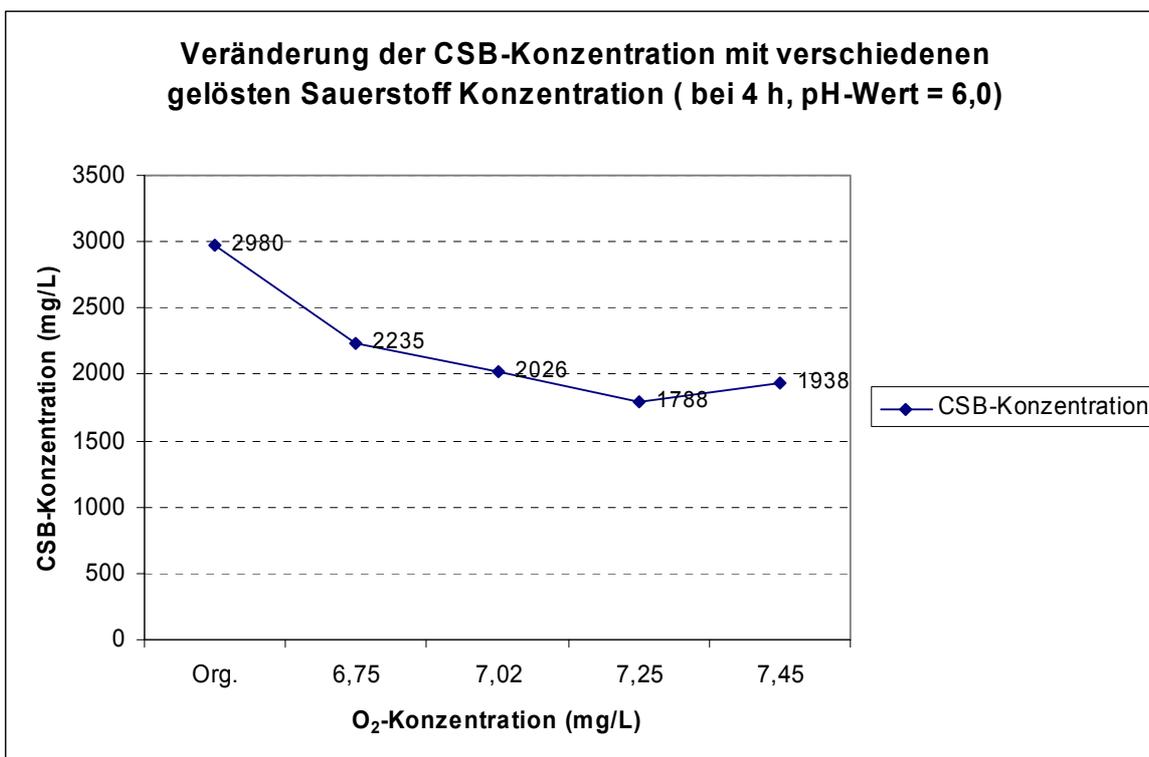


Abb. 6: Veränderung der CSB-Konzentration bei unterschiedlichen O₂-Konzentrationen (nach 4 h, pH-Wert = 6,0)

Abbildung 6 zeigt, dass mit steigender O₂-Konzentration die CSB-Konzentration absinkt, bis sie ab einer Konzentration von 7,45 mg O₂/L wieder leicht ansteigt.

3.1.3 Einflussfaktor: Zulaufkonzentration des Abwassers

Die Zulaufkonzentration des Papierabwasser zum MEV beeinflusst die Abbauleistung des Verfahrens. Aus diesem Grund wurden Versuche mit zwei CSB-Konzentrationen durchgeführt. In Abbildung 7 ist die Veränderung des Wirkungsgrades bei hoher und niedriger Konzentration dargestellt.

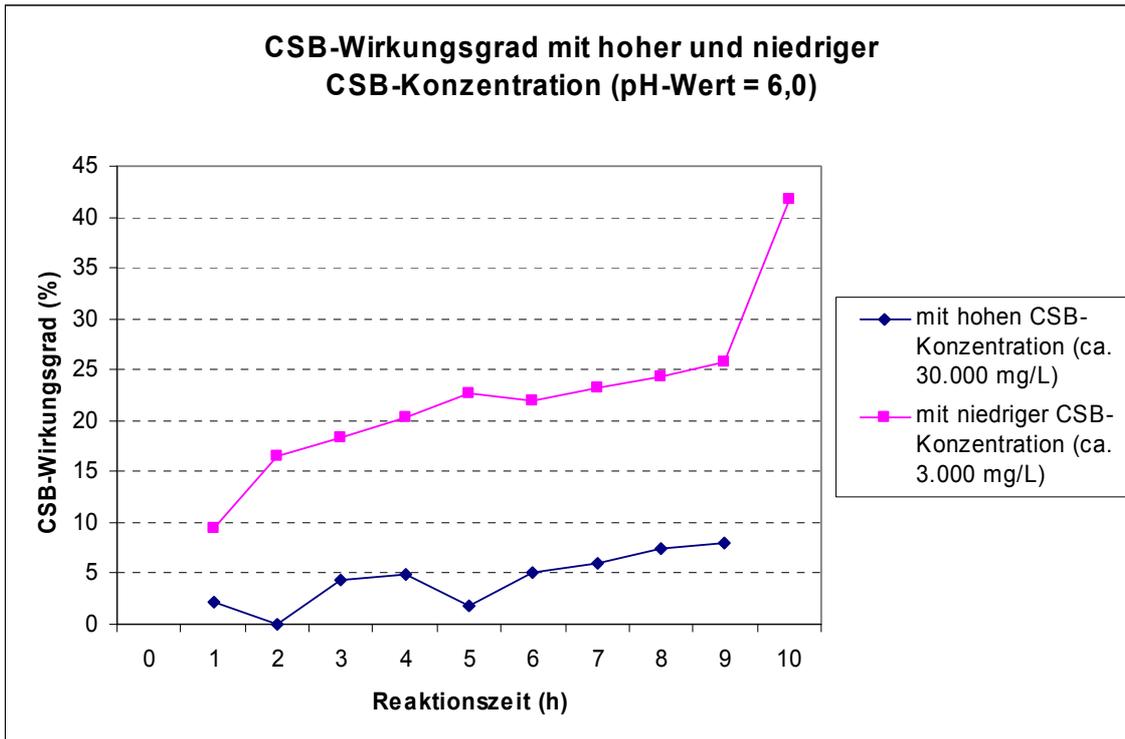


Abb. 7: Veränderung der CSB-Konzentration mit hoher und niedriger Anfangs-Konzentration (nach 4 h, pH-Wert = 6,0)

Abbildung 7 zeigt, dass der Wirkungsgrad bei niedriger CSB Anfangs-Konzentration größer ist als bei hoher Anfangs-Konzentration.

3.1.4 Einflussfaktor: Reaktionszeit

Die Effizienz des MEVs hängt weiterhin von der Kontaktzeit zwischen Abwasser und Trägermaterial ab. Mit zunehmender Reaktionszeit steigt tendenziell die Oxidoreduktion der organischen Verbindungen im Abwasser. In Abbildung 8 ist die Veränderung des CSB-Wirkungsgrades mit zunehmender Reaktionszeit dargestellt.

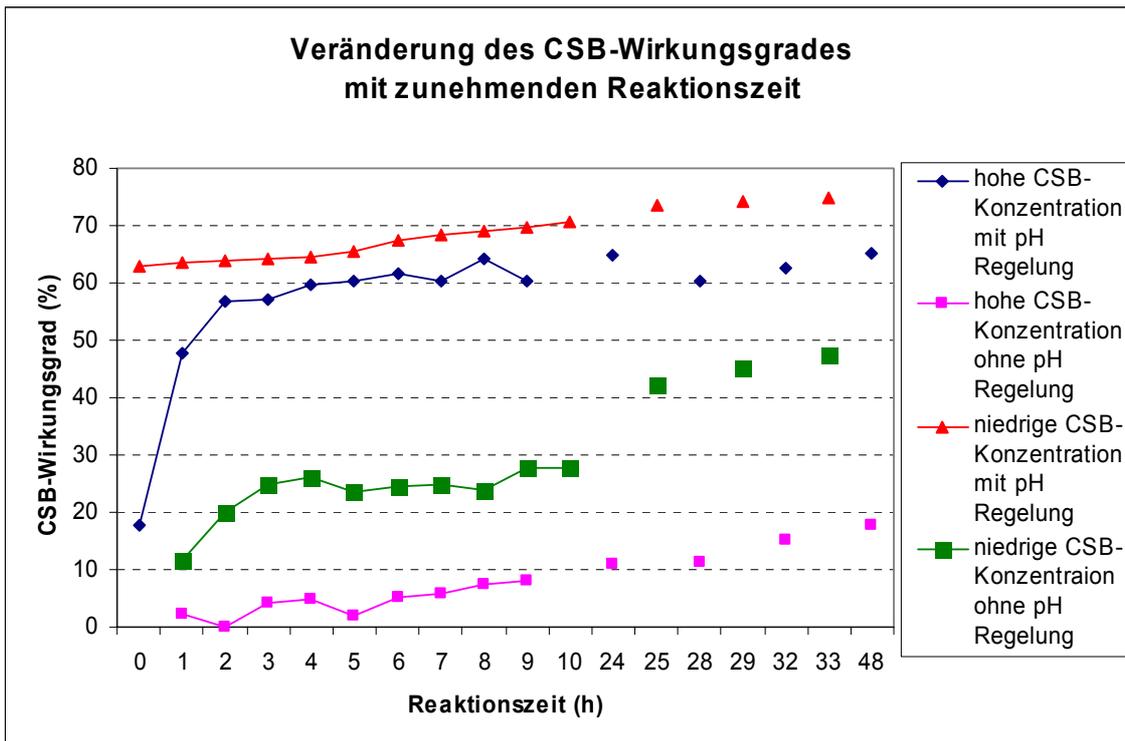


Abb. 8: Veränderung des CSB-Wirkungsgrades mit zunehmender Reaktionszeit

Abbildung 8 zeigt, dass mit zunehmender Reaktionszeit der Wirkungsgrad ansteigt, unabhängig davon ob die Anfangs-Konzentration hoch oder niedrig ist (pH-Wert = ca. 6,0). Weiterhin zeigt sich, dass der Wirkungsgrad mit pH-Wert Regelung ist höher als der CSB-Wirkungsgrad ohne pH-Wert Regelung.

3.2 Optimierung der biologischen Abbaubarkeit des Papierabwasser durch das MEV

Im Gegensatz zu Deutschland wird in China auch Stroh, Schilf, Gras als Rohstoff zur Gewinnung von Zellstoff eingesetzt, was zu vielen Problemen mit dem Laugerückgewinnungsverfahren führt. Deshalb werden in vielen kleinen Papierfabriken der Shandong Provinz das Papierabwasser ohne Behandlung oder lediglich mit einfacher Behandlung direkt in die Kanalisation eingeleitet. Die hauptsächlichste Verschmutzung im Papierabwasser ist Lignin. Lignin ist aufgrund seiner natürlichen und chemischen Eigenschaften und Molekülstrukturen eine biologische sehr schwer abbaubare Substanz.

In Abbildung 9 ist die Veränderung des BSB₅/CSB-Verhältnisses mit der Zeit und unter unterschiedlichen Anfangsbedingungen dargestellt.

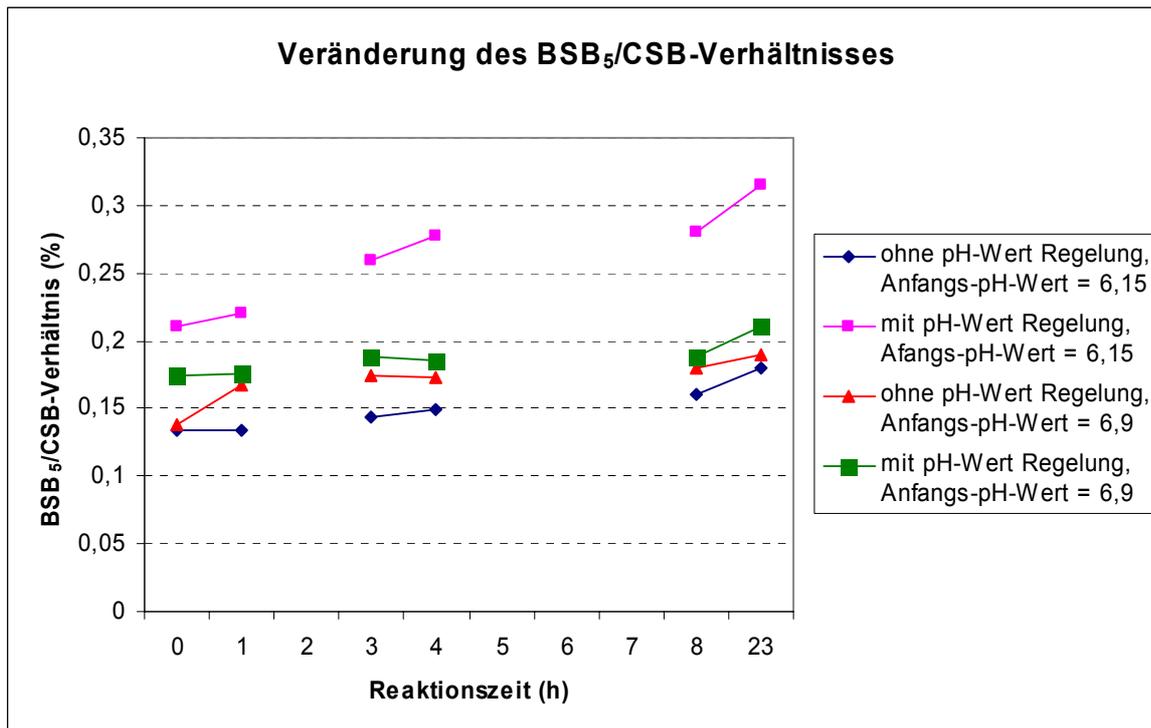


Abb. 9: Veränderung des BSB₅/CSB-Verhältnisses mit und ohne pH-Wert Regelung bei verschiedenen Anfangs-pH-Werten

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Reaktionszeit das BSB₅/CSB-Verhältnis leicht ansteigt unabhängig davon ob der Anfangs-pH-Wert hoch oder niedrig ist. Daraus kann geschlossen werden, dass das MEV Verfahren die biologische Abbaubarkeit tendenziell verbessert.

3.3 Vergleich des MEVs mit Fällungstest

Die Versuchsergebnisse der Vorbehandlung des Abwassers mit MEV zeigen, dass der CSB-Wirkungsgrad des MEVs ohne pH-Wert Regelung bei ca. 30 % (bei optimale Bedingungen: 4 h, CSB-Konzentration des Anfangs ca. 3.000 mg/L, 7,25 mg/L O₂) liegt. Mit pH-Wert Regelung steigt der CSB-Wirkungsgrad von 30 % auf 64 % an, weil während der pH-Wert Regelung mehr Fe³⁺- und Fe²⁺-Fällungsmittel entsteht. Um den Wirkungsgrad des MEVs mit der direkten Fällung/Flockung zu vergleichen, wurden Fällungstest (Betriebsphase 12-14) durchgeführt.

3.3.1 Material und Messgeräte

500 ml Becherglas, 500 ml Probe, Rührwerk

Abwasser: pH-Wert = ca.10; CSB-Konzentration = ca. 3.000 mg/L;

Fällungsmittel: PIX-111 (FeCl₃), pH-Wert = 1, C = 3,75 x 10⁻³ mol/mL;
 PIX-113 (Fe₂(SO₄)₃), pH-Wert = 0, C = 1,575 x 10⁻³ mol/mL,
 PAX-XL9 (Polyaluminiumchloridsulfatlösung); pH-Wert = 2,5; C
 C_{Wirkssubstanz} = 2,0 x 10⁻³ mol/mL.

3.3.2 Fällungsmethode

Die Probe wurde für 1 min bei einer Geschwindigkeit von 120 r/min gerührt und das Fällmittel (PIX-111, PIX-113, PAX-XL9) dosiert. Anschließend wurde die Rührgeschwindigkeit für 20 min auf 30 r/min reduziert, gefolgt von einer 45 min Absetzphase. Von dem Überstand wird die CSB-Konzentration und der pH-Wert gemessen.

Die Zugabe des Fällungsmittels bedingt eine Absenkung des pH-Wertes. Da allein die Absenkung des pH-Wertes mittels Säure ebenfalls zu einer Ausfällung führt, die wiederum den CSB in der flüssigen Phase reduziert, wurden die Ergebnisse des Fällungstests mit denen einer parallel durchgeführten pH-Wert Absenkung verglichen.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass mit steigender Dosierung der Fällmittel der pH-Wert abgesenkt wird, gleichzeitig steigt der CSB-Wirkungsgrad bis der Punkt der Ladungsneutralität überschritten wird.

Folgende maximale Wirkungsgrade konnten unter Zugabe der folgenden Fällungsmittel erreicht werden:

PIX-111 – 78,3 % (Dosiermenge = 2 ml);

PIX-113 – 76 % (1,5 mL);

PAX-XL9 – 67 % (4 mL)

Unter Berücksichtigung der Chemikalienpreise in China (Abbildung 10) und dem berechneten Chemikalienverbrauch für Papierabwasser (Abbildung 11) ergeben sich die spezifischen Verbrauchskosten (Abbildung 12).

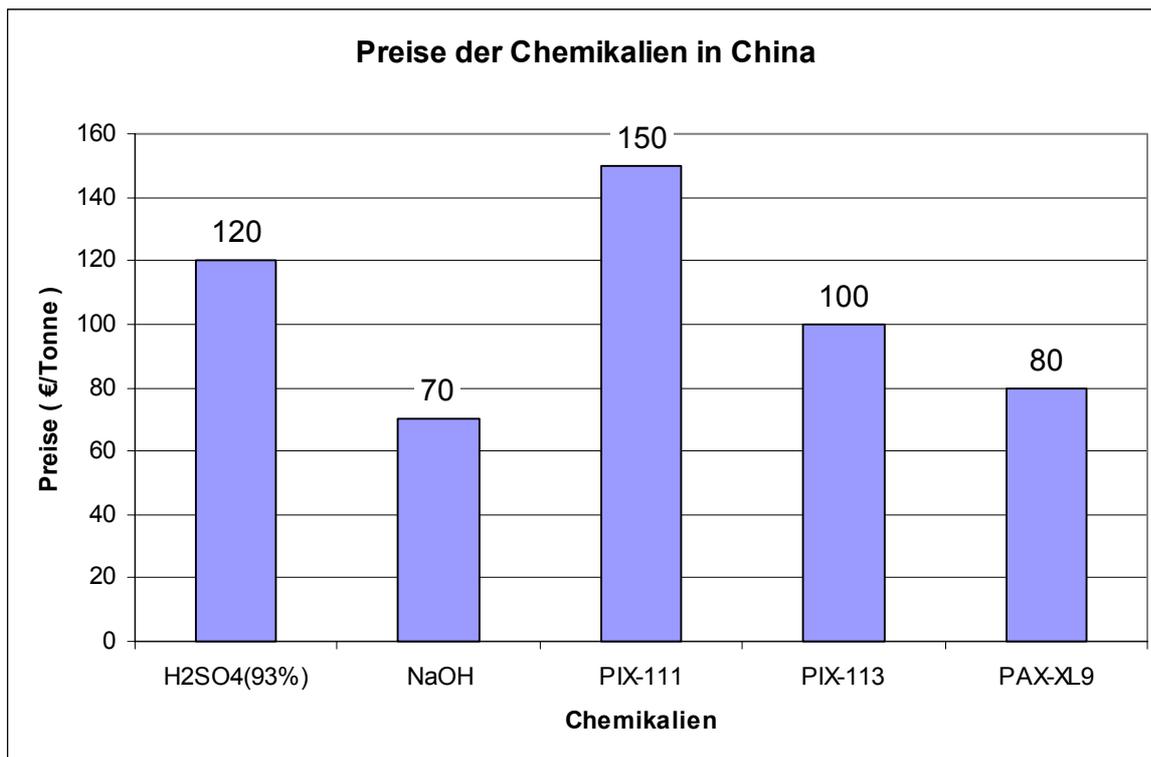


Abb. 10: Veränderung des pH-Wertes durch Zugabe des Fällmittels

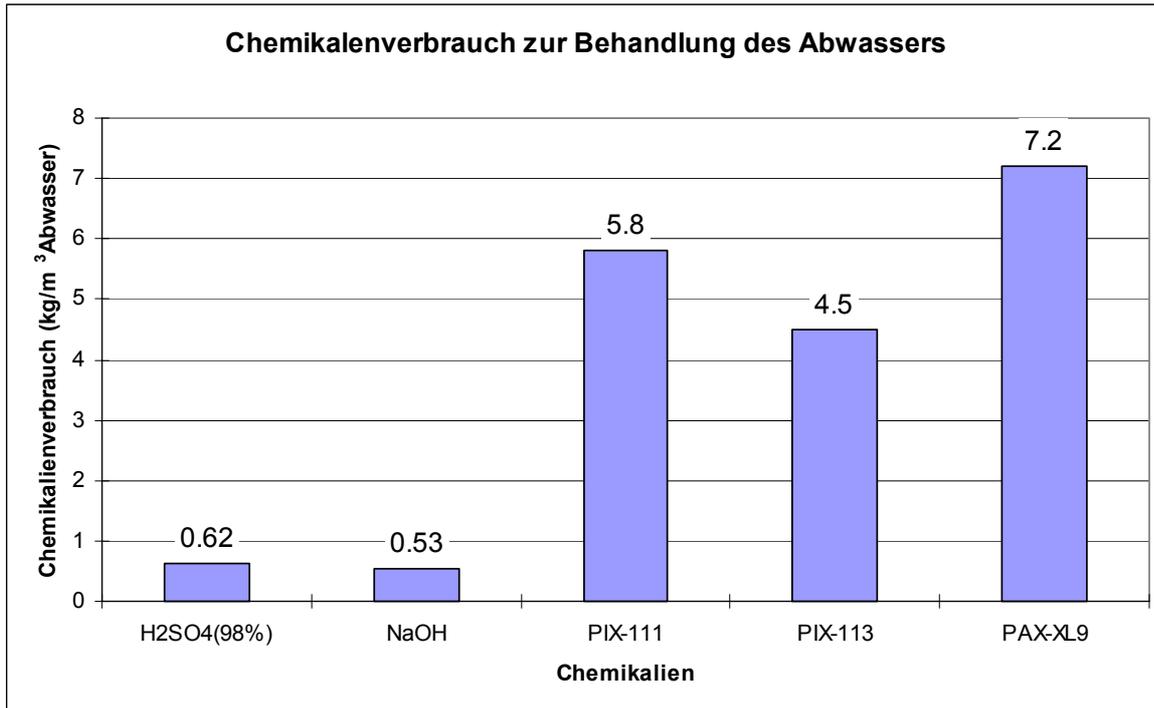


Abb.

Abb. 11: Veränderung des pH-Wertes durch Zugabe des Fällmittels

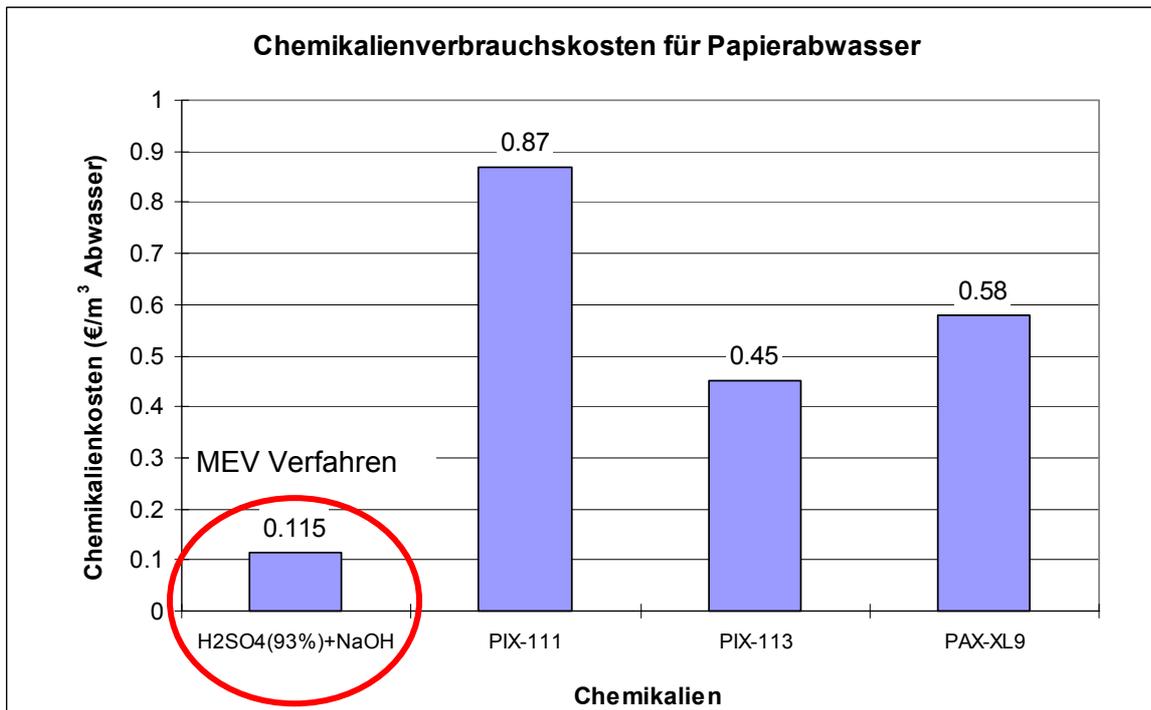


Abb. 12: Spezifische Chemikalienverbrauch zur Abwasserbehandlungsverfahren
Demnach schneidet das MEV Verfahren mit 0,115 €/m³ am besten ab.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

4.1 Zusammenfassung der MEV Ergebnisse

Mit zunehmender Belüftungs-/Reaktionszeit steigt der pH-Wert des Abwassers an.

Mit zunehmender Reaktionszeit sinken die CSB-Konzentrationen ab. Die BSB₅-Konzentration des Ablaufs verändert sich kaum, wodurch sich das BSB₅/CSB Verhältnis verbessert.

Mit zunehmender Konzentration an gelöstem Sauerstoff sinkt die CSB-Konzentration bis zu einem Tiefpunkt bei 7,25 mg O₂/L (Reaktionszeit: 4 h, Anfangs-pH-Wert = 6,0; Anfangs-CSB-Konzentration = 2.980 mg/L). Bei noch höherer Sauerstoffkonzentration scheint die CSB-Ablaufkonzentration wieder anzusteigen.

Die höchsten CSB Eliminationsgrade werden mit pH-Wert Regulierung erreicht. Diese liegen bei dünnem Abwasser (3.000 mg/L) bei ca. 70 % und bei konzentriertem Abwasser (30.000 mg/L) bei ca. 60 %.

Optimale Betriebsparameter des MEVs

Die optimale Betriebsparameter des MEVs sind:

HRT = 4 h; DO = 7,25 mg/L; CSB-Konzentration = ca. 3.000 mg/L;

Anfangs-pH-Wert = 6,0

Verbesserung der biologischen Abbaubarkeit des Abwassers

Die biologische Abbaubarkeit des Abwassers konnte mit dem MEV verbessert werden. Das BSB₅/CSB-Verhältnis steigt nach der Behandlung mit dem MEV an.

Vergleich des MEVs mit Fällungstest

Von den getesteten Fällungsmitteln eignete sich PIX-113 am besten, die optimale Dosiermenge beträgt 1,5 ml, der CSB-Wirkungsgrad liegt bei 76 % und der pH-Wert ist ca. 4. Die Chemikaliekosten des MEVs sind im Vergleich zur Fällung/Flockung günstiger. Bezüglich der Investitionskosten besteht noch Kalkulationsbedarf.

Ausblick der Laborversuche

In zukünftigen Versuchen sollte untersucht werden, ob sich die Struktur des Lignins während des MEV verändert. So kann geklärt werden, ob es zu einer Umlagerung von schwer zu leicht abbaubaren CSB kommt.

Darüber hinaus sollte untersucht werden, welche Rolle die Adsorption an den Eisenspänen spielt, wenn das Papierabwasser mit dem MEV behandelt wird.

5 Literatur

- [1] Lin Qiaoyuan: Prevention and Solution of the Pollution Causing by Non-Wood Fiber Pulping in China: Evaluation and Prospect, China Pulp & Paper, Heft 5, S. 47-56, 2006
- [2] Li Zhongzheng: The characteristics of grass fiber pulping and the strategies of further developing China's non-timber fiber papermaking, China Pulp & Paper, Heft 2, S. 6-11, 2006
- [3] Wu Shubin: The Principles of Advanced Chemical Oxidation Processes and their Application in Wastewater Treatment of Pulp and Paper Industry, China Pulp & Paper. Heft 5, S. 43-49, 1999
- [4] Xiao Xianying: Application of Micro-Electrolysis Method in Bleaching Effluent Discoloring, China Pulp & Paper, Heft 6, S. 5-7, 2004
- [5] Zhu Youchun: Study on the reaction materials for micro-electrolysis treatment of wastewater, Membrane Science and technology, Heft 4, S. 56-60, 2001
- [6] Zhou Peiguo: Application and development for micro-electrolysis technology, Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, Heft 4, S. 18-24, 2001
- [7] Wang Yongguang: Research and application of micro-electrolysis technology to industrial wastewater treatment, Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, Heft 4, S. 69-73, 2002
- [8] Zhang Zijian: The Application and Research of micro-electrolysis technology in Wastewater treatment, Industrial Safety and Environmental Protection, Heft 4, S. 8-10, 2004
- [9] Liu Rupeng: Research on advanced treatment of bleaching effluents from straw pulp paper making process by hydrogen peroxide strengthened micro-electrolysis method, Water & Wastewater Engineering, Heft 3, S. 48-51, 2006
- [10] Lei Lirong: Micro-electrolysis treatment of eucalyptus CTMP effluent, China Pulp & Paper Industry, Heft 3, S. 73-75, 2006
- [11] SEPA: Emission und Behandlung von Industrieabwasser in China im Jahre 2004, <http://www.sepa.gov.cn/download/2004gytj.pdf>