

Abwasserreinigung und Wasserkreislaufführung in der Papierindustrie – Weiterentwicklung deutscher Techniken für den chinesischen Markt –

Dem Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
vorgelegte

DISSERTATION

von

M.Eng. Guomin Zhang
aus Fujian, VR China

Darmstadt, im April 2013

INHALTSVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
TABELLENVERZEICHNIS	XVIII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 HINTERGRUND UND MOTIVATION	1
1.2 ZIELE UND AUFGABENSTELLUNG	4
1.3 PLANUNG UND ABLAUF.....	5
2 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND	6
2.1 PAPIERINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND UND IN CHINA	6
2.1.1 Allgemeines	6
2.1.1.1 Rohstoffzusammensetzung zur Zellstoff- und Papierherstellung	6
2.1.1.2 Aufschlussverfahren	6
2.1.2 Papierindustrie in Deutschland	8
2.1.2.1 Produktion und Verbrauch von Papier, Karton und Pappe	9
2.1.2.2 Import und Export von Holzstoff, Zellstoff und Altpapier	10
2.1.2.3 Rohstoffverbrauch und -struktur der Papierindustrie.....	12
2.1.2.4 Herstellungsverfahren der Zellstoffherstellung	14
2.1.2.5 Kurzzusammenfassung.....	16
2.1.3 Papierindustrie in China	16
2.1.3.1 Produktion, Verbrauch und Außenhandel von Papier, Karton und Pappe	17
2.1.3.2 Import und Export von Holzstoff, Zellstoff und Altpapier	19
2.1.3.3 Rohstoffverbrauch und -struktur der Papierindustrie.....	20
2.1.3.4 Zellstoffherstellungsverfahren	22
2.1.3.5 Kurzzusammenfassung	23
2.2 PAPIERABWASSERBEHANDLUNG UND WASSERKREISLAUFFÜHRUNG IN DER PAPIERINDUSTRIE	24
2.2.1 Allgemeines	24
2.2.2 Abwasseranfall und Stand der Abwasserbehandlung sowie Wasserkreislaufführung der Papierindustrie in Deutschland	27
2.2.2.1 Gesetzliche Grundlagen zur Papierabwasserbehandlung in Deutschland	27
2.2.2.2 Abwasseranfall und Schmutzfracht	29
2.2.2.3 Stand der Abwasserbehandlung in der Papier- und Zellstoffindustrie in Deutschland	31
2.2.2.4 Stand der Wasserkreislaufführung in der Papier- und Zellstoffindustrie in Deutschland	33
2.2.2.5 Schlussfolgerungen hinsichtlich des bisherigen technischen Standes bei der Papierabwasserbehandlung in Deutschland	35
2.2.3 Abwasseranfall und Stand der Abwasserbehandlung und Wasserkreislaufführung der Papierindustrie in China	36
2.2.3.1 Gesetzliche Grundlagen zur Papierabwasserbehandlung in China	36

2.2.3.2	Abwasseranfall und Schmutzfracht	38
2.2.3.3	Laugerrückgewinnung bei der Zellstoffherstellung	44
2.2.3.4	Stand der Abwasserbehandlung in der Papier- und Zellstoffindustrie Chinas	46
2.2.3.5	Stand der Wasserkreislauführung in der Papier- und Zellstoffindustrie Chinas	53
2.2.3.6	Schlussfolgerungen bezüglich der Papierabwasserbehandlung in China.....	55
2.3	ZUSAMMENFASSUNG.....	56
3	WASSER- UND STOFFFLUSSBILANZ DER PAPIERFABRIK IN QUFU.....	58
3.1	EINLEITUNG	58
3.2	MATERIAL UND METHODEN.....	58
3.3	ERGEBNISSE.....	60
3.3.1	Messwerte aus verschiedenen Produktionsprozessen der Papierfabrik und verschiedener Behandlungsstufen der Kläranlage	60
3.3.2	Rohstoffaufbereitungsprozess und Kochung zur Zellstoffaufschlusslösung	62
3.3.3	Schwarzzellstoffwaschen, Schwarzlaugeabtrennung und Eindickung	65
3.3.4	Bleichen des Rohzellstoffs	67
3.3.5	Papierbildung	69
3.3.6	Laugerrückgewinnungsprozess	72
3.3.7	Kläranlage der Qufu-Papierfabrik	74
3.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	76
4	BIOLOGISCHE ABBAUBARKEIT VON PAPIERABWASSER (LABORMAßSTAB) 78	78
4.1	LIGNIN IM PAPIERABWASSER	78
4.2	MIKRO ELEKTROLYSEVERFAHREN (MEV)	79
4.2.1	Funktionsprinzipien des MEV	79
4.2.2	Einsatz des MEVs zur Papierabwasserbehandlung	81
4.3	MATERIAL UND METHODEN.....	81
4.3.1	Abwasser und Versuchsanlage	81
4.3.1.1	Abwasser	81
4.3.1.2	Laborversuchsanlage	81
4.3.2	Versuchungsprogramm und Versuchsdurchführung	82
4.3.2.1	Versuchsprogramm.....	82
4.3.2.2	Probenahme und Analyseprogramm.....	83
4.4	ERGEBNISSE.....	84
4.4.1	Einfluss der Reaktionszeit und des pH-Wertes	84
4.4.2	Einfluss der Gelöst- Sauerstoffkonzentration	87
4.4.3	Veränderung der biologischen Abbaubarkeit	88
4.4.4	Vergleich des MEV Verfahrens mit der chemischen Fällung	89
4.4.4.1	Material und Messgeräte zum Fällungstest.....	90
4.4.4.2	Durchführung der Fälltests	91
4.4.4.3	Versuchsergebnisse:	91
4.5	ZWISCHENZUSAMMENFASSUNG I UND SCHLUSSFOLGERUNG I.....	95

4.6	UNTERSUCHUNG DER ADSORPTIONSLEISTUNG DES MEVS (LABORMAßSTAB)	97
4.6.1	Allgemeines	97
4.6.2	Material und Methoden	98
4.6.3	Ergebnisse des Teil I	100
4.6.3.1	Veränderung der CSB-Konzentration.....	100
4.6.3.2	Einfluss der CSB-Konzentration des Abwassers	100
4.6.3.3	Einfluss der Dosiermenge des Adsorbens.....	101
4.6.4	Ergebnisse des Teil II	102
4.6.4.1	Adsorptionsisotherme nach der Freundlichen-Gleichung	102
4.6.5	Zwischenzusammenfassung II	103
4.7	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	104
5	DURCHFÜHRUNG DER HALBTECHNISCHEN VERSUCHE IN QUFU	105
5.1	ALLGEMEINES	105
5.2	MATERIAL UND METHODEN	105
5.2.1	Versuchsanlage	105
5.2.2	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	107
5.2.2.1	Versuchsplanung mittels Taguchi Methode.....	108
5.2.2.2	Betriebsphasen und Versuchsdurchführung	111
5.2.2.3	Probenahme und Analyseprogramm.....	116
5.3	VERSUCHSERGEBNISSE.....	121
5.3.1	Einfahrbetrieb bei den halbtechnischen Versuchen	121
5.3.2	Versuchsergebnisse der halbtechnischen Versuchsanlage	123
5.3.2.1	Vorbehandlungsstufe: Rechen + Vorklärung + Mikro-Elektrolyseverfahren	124
5.3.2.2	Aerob-aerobe Behandlungsstufe (Hochlastbelebung + Biofilter I)	134
5.3.2.3	Anaerob-aerobe Behandlungsstufe (UASB-Reaktor + Biofilter II)	144
5.3.2.4	Zwischenzusammenfassung I	155
5.3.3	Ermittlung der Bemessungsparameter der einzelnen Behandlungsstufen	156
5.3.3.1	Allgemeines.....	156
5.3.3.2	Taguchi-Methode zur Festlegung der Betriebsparameter	156
5.3.3.3	Vorbehandlungsstufe: Mikro-Elektrolyseverfahren	159
5.3.3.4	Hochlastbelebung	167
5.3.3.5	Biofilter I.....	171
5.3.3.6	UASB-Reaktor.....	177
5.3.3.7	Biofilter II.....	182
5.3.3.8	Zwischenzusammenfassung II.....	188
5.3.4	Molekulargewichtsverteilung der organischen Verschmutzungen und Veränderung des Ligningehaltes im Abwasser der verschiedenen Behandlungsstufen	189
5.3.4.1	Einleitung	189
5.3.4.2	Molekulargewichtsverteilung der organischen Verschmutzungen im Abwasser der verschiedenen Behandlungsstufen	190
5.3.4.3	Veränderung der Lignin-Konzentration im Abwasser der verschiedenen Behandlungsstufen	194

5.3.4.4	Zwischenzusammenfassung III.....	197
5.4	GESAMTZUSAMMENFASSUNG	198
6	OPTIMIERUNG DER VERFAHRENSKOMBINATIONEN IM LABORMAßSTAB. 200	
6.1	MATERIAL UND METHODEN.....	200
6.2	ERGEBNISSE.....	201
6.2.1	Einfahrphase	201
6.2.2	Versuchsergebnisse im Regelbetrieb	201
6.2.3	Leistungsvergleich der drei Belebungsverfahrensvarianten	204
6.2.4	Leistungsvergleich der nachgeschalteten Biofilter	206
6.3	ZUSAMMENFASSUNG.....	208
7	BEMESSUNG DER GEWÄHLTEN VERFAHRENSKOMBINATION	209
7.1	EINLEITUNG	209
7.2	BEMESSUNG DER KLÄRANLAGE.....	209
7.2.1	Randbedingungen der Bemessung	209
7.2.1.1	Abwasserzufluss	209
7.2.1.2	Schmutzkonzentration und -frachten / Ausbaugröße	209
7.2.2	Verfahrenstechnisches Konzept und Bemessung	210
7.2.2.1	Rechenanlage und Zulaufpumpwerk	213
7.2.2.2	Siebanlage (Siebtrommel) und Vorklärung	214
7.2.2.3	Vorbehandlungsstufe: Mikro-Elektrolyse Verfahren.....	215
7.2.2.4	UASB-Reaktor	216
7.2.2.5	Hochlastbelebung	217
7.2.2.6	Rücklaufschlammumpwerk	218
7.2.2.7	Nachklärung	218
7.2.2.8	Dosiereinrichtung	219
7.2.2.9	Schlammvorlagebehälter	220
7.2.2.10	Schlammentwässerung	220
7.2.2.11	Biofilter	221
7.2.2.12	Gebälsestation	223
7.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der verfahrenstechnischen Bemessung	223
8	SCHLUSSFOLGERUNG	227
8.1	WISSENSCHAFTLICHE SCHLUSSFOLGERUNG	227
8.2	SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS.....	230
9	ZUSAMMENFASSUNG.....	232
10	LITERATUR	237
11	ANHANG	242