

Dipl.-Ing. Andreas Pirsing, Willstätt

**Reaktionstechnische Unter-  
suchung und mathematische  
Modellierung der Nitrifikation  
in hochbelasteten Abwässern**

Reihe **15**: Umwelttechnik

Nr. **156**

# Reaktionstechnische Untersuchung und mathematische Modellierung der Nitrifikation in hochbelasteten Abwässern

1.	Einleitung	1
2.	Übersicht über Vorkommen, ökologische Auswirkungen und Verfahren zur Elimination von Ammonium	4
2.1	Herkunft ammoniumreicher Abwässer	4
2.2	Ökologische Aspekte des Ammoniumeintrags in die Umwelt	5
2.3	Verfahrensübersicht zur Abtrennung von Ammonium aus Industrieabwässern	6
2.3.1	Desorptionsverfahren	7
2.3.2	Knickpunkt-Chlorung	7
2.3.3	Flüssigmembranprozesse	8
2.3.4	Ionenaustauscherverfahren	8
2.3.5	MAP-Fällung	8
2.3.6	Biologische Verfahren	9
2.4	Bekannte Ergebnisse zur Nitrifikation von Abwässern mit hoher Ammoniumkonzentration	9
3.	Grundlagen und mathematische Ansätze zur Beschreibung der biologischen Stickstoffelimination	12
3.1	Mikrobiologie der Nitrifikation	12
3.1.1	Taxonomie nitrifizierender Bakterien	12
3.1.2	Stoffwechselstöchiometrien	13
3.1.3	Flockenbildung	16
3.2	Reaktionskinetik	18
3.2.1	Formalkinetiken biologischer Reaktionen	18
3.2.2	Dissoziationsgleichgewichte	23
3.3	Stoffübergang in Biosuspensionen	29
3.3.1	Sorptionscharakteristik für Rührbehälter	32
3.3.2	Sorptionscharakteristik für Blasensäulen	33
3.4	Mathematische Modellierung biologischer Prozesse	34
3.4.1	Numerische Verfahren zur Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen	36
3.4.2	Überblick über Prozeßmodelle für die Nitrifikation	38
3.5	Modellvorstellungen für Systeme mit Verzögerungen	41
3.5.1	Modellansätze und Stabilität	41
3.5.2	Einfache strukturierte Modellansätze	44
4.	Formulierung des dynamischen Prozeßmodells	47
4.1	Voraussetzungen für die Modellierung	47
4.2	Bestimmung der Eintrittskonzentrationen und Bezeichnungen	47
4.3	Modellierung des Bioreaktors	48
4.4	Modellierung des Sedimenters	55
4.5	Modellierung des pH-Regelkreises	56

5.	Material und Methoden	5
5.1	Begaster Rührreaktor	5
5.2	Airlift-Schlaufensuspensionsreaktor	6
5.3	Verwendete Stoffe	6
5.4	Meßverfahren	6
5.4.1	Probenaufbereitung und Konservierung	6
5.4.2	Kontinuierliche Meßverfahren	6
5.4.3	Diskontinuierliche Meßverfahren	6
5.4.4	Weitere Meßverfahren	6
6.	Ergebnisse und Diskussion	6
6.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen	6
6.1.1	Bestimmung des Verweilzeitverhalten	6
6.1.2	Experimentelle Bestimmung des volumenbezogenen Stoffübergangskoeffizienten	6
6.2	Experimentelle Überprüfung des Prozeßmodells	7
6.2.1	Versuche am Rührreaktor	7
6.2.2	Versuche am Airlift-Schlaufensuspensionsreaktor	8
6.3	Simulation der pH-Regelung	8
6.4	On-line-Prozeßüberwachung durch Abgasanalyse	8
6.4.1	Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeiten aus den naßchemischen Stickstoffanalysen	9
6.4.2	Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeiten aus der Abgasanalyse	9
6.4.3	Vergleich der gasanalytisch und naßchemisch bestimmten Reaktionsgeschwindigkeiten	9
6.4.4	Empfindlichkeitsuntersuchungen	9
6.5	Auswahl der Regelgrößen für die Regelung des Nitrifikationsprozesses	10
6.5.1	Reproduzierbarkeit der Shift-Experimente	10
6.5.2	Eignung des pH-Wertes als Regelgröße	10
6.5.3	Eignung der Sauerstoffkonzentration als Regelgröße	10
6.5.4	Hinweise für die Auswahl der Regelgrößen	11
6.6	Überlegungen zur Erweiterung des Reaktionsmodells	11
7.	Konzepte für eine Regelungsstrategie	11
7.1	Linearisierende Regelung	11
7.2	Wissensbasierte Regelung	11
8.	Zusammenfassung und Ausblick	12

Anhang		
Anhang A1:	Bekannte Ergebnisse zur Nitrifikation von Abwässern mit hoher Ammoniumkonzentration	125
Anhang A2:	Zusammenstellung der kinetische Koeffizienten der Nitrifikanten	127
Anhang A3:	Verteilung der Kohlensäure auf die Formen Carbonat, Hydrogencarbonat und Kohlendioxid	129
Anhang A4:	Dissoziationsgleichgewicht der Kohlensäure	130
Anhang A5:	Bestimmung der Bakterienverteilung	131
Anhang A6:	Bestimmung des pH-Werts der eingesetzten Natriumcarbonatlösung	133
Anhang A7:	Berechnung der Dissoziationsraten für die Protonenbilanz	134
Anhang A8:	Berechnung der Rücklaufkonzentrationen im Sedimenter	139
Anhang A9:	Übersicht über On-line-Meßgeräte zur Messung der Stickstoffverbindungen Ammonium, Nitrit und Nitrat	141
Anhang A10:	Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeiten aus den naßchemischen Stickstoffanalysen	143
Anhang A11:	Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeiten aus der Abgasanalyse	144
Anhang A12:	Korrektur der Meßgerätedynamik mit $VZ_1$ -Gliedern	149
Literatur		151