

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSINSTITUT FÜR INDUSTRIE- UND  
SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT SOWIE ABFALLWIRTSCHAFT E. V. STUTT GART

**INSTITUT WAR – Bibliothek –**  
Wasserversorgung, Abwassertechnik,  
Abfalltechnik und Raumplanung  
Technische Hochschule Darmstadt  
Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt  
TEL. 0 61 51 / 16 36 59 + 16 27 48  
FAX 0 61 51 / 16 97 58

W. A. R. – Bibliothek  
Inv.-Nr. D 14145

10 SBS 1

**Gunther Kratz**

# **Untersuchungen zum Abbau von polaren und nicht polaren Abluftinhaltsstoffen in Biowäschern**

Bibliothek Wasser und Umwelt  
(TU Darmstadt)



61512330

KOMMISSIONSVERLAG R. OLDENBOURG, MÜNCHEN 1993

## Inhaltsverzeichnis

|         |   | Seite |
|---------|---|-------|
| 1.      | Einleitung  | 1     |
| 1.1     | Abluftreinigungsverfahren   | 1     |
| 1.2     | Auswahlkriterien für Abluftreinigungsverfahren  | 2     |
| 2.      | Aufgabenstellung und Vorgehensweise   | 3     |
| 2.1     | Problemstellung   | 3     |
| 2.2     | Stand des Wissens   | 4     |
| 2.3     | Vorgehensweise  | 6     |
| 3.      | Theoretische Grundlagen   | 8     |
| 3.1     | Beschreibung des Gesamtprozesses  | 8     |
| 3.1.1   | Belebter Schlamm als Waschflüssigkeit   | 9     |
| 3.1.1.1 | Gut wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe  | 9     |
| 3.1.1.2 | Schlecht wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe   | 9     |
| 3.1.2   | Dispersion aus belebtem Schlamm<br>und Silikonöl als Waschflüssigkeit                   | 10    |
| 3.1.2.1 | Gut wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe  | 10    |
| 3.1.2.2 | Schlecht wasserlösliche Abluftinhaltsstoffe   | 10    |
| 3.2     | Theoretische Grundlagen zum Gas-Flüssig-<br>Stoffübergang                               | 11    |
| 3.2.1   | Stoffübergang   | 11    |
| 3.2.2   | Phasengleichgewicht   | 12    |
| 3.2.3   | Technische Umsetzung im Bioabsorptionsprozeß  | 14    |
| 3.3     | Theoretische Grundlagen zum Flüssig-Flüssig-<br>Stoffübergang                           | 14    |
| 3.3.1   | Stoffübergang und Phasengleichgewicht   | 14    |
| 3.3.2   | Technische Umsetzung im Bioabsorptionsprozeß  | 15    |
| 3.4     | Theoretische Grundlagen zum Stoffübergang aus<br>einer Flüssigphase auf einen Feststoff | 15    |
| 3.4.1   | Stoffübergang und Phasengleichgewicht   | 15    |
| 3.4.2   | Technische Umsetzung im Bioabsorptionsprozeß  | 16    |
| 3.5     | Theoretische Grundlagen zum biologischen Abbau  | 16    |
| 4.      | Untersuchungen am Pilotbiowäscher   | 18    |
| 4.1     | Beschreibung der Pilotanlage 1  | 18    |
| 4.2     | Beschreibung der Pilotanlage 2  | 21    |

|             | <b>Seite</b>  |
|-------------|---|
| 4.3         | Meßmethoden zur Überwachung und Analyse 24  |
| 4.3.1       | Analyse der Waschflüssigkeit 24   |
| 4.3.1.1     | Routinemäßige Analysen 24   |
| 4.3.1.1.1   | Sauerstoffzehrungsmessungen 24  |
| 4.3.1.1.2   | Trockensubstanzbestimmungen 25  |
| 4.3.1.1.2.1 | Bestimmung der organischen Trockensubstanz<br>eines belebten Schlammes 25                               |
| 4.3.1.1.2.2 | Bestimmung der organischen Trockensubstanz<br>einer Dispersion aus belebtem Schlamm<br>und Silikonöl 26 |
| 4.3.1.1.2.3 | Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes 26  |
| 4.3.1.1.3   | pH-Messung 27   |
| 4.3.1.2     | Zeitweise durchgeführte Analysen 27   |
| 4.3.1.2.1   | Stickstoff- und Phosphorbestimmung 27   |
| 4.3.1.2.2   | DOC-Messung 27  |
| 4.3.1.2.3   | Gaschromatographische Analyse 27  |
| 4.3.2       | Analyse der Abluftströme 28   |
| 4.3.2.1     | Bestimmung von Einzelstoffen mit Hilfe<br>gaschromatographischer Analyse 28                             |
| 4.3.2.2     | Zeitweise Bestimmung von Summenparametern 30  |
| 4.3.2.2.1   | Messung mit dem Flammen-Ionisations-Detektor 30   |
| 4.3.2.2.2   | Olfaktometrische Messung 31   |
| 4.3.2.2.3   | Olfaktorische Beurteilung 32  |
| 4.4.        | Meßergebnisse 33  |
| 4.4.1       | Abluftbeladung 33   |
| 4.4.1.1     | Einzelstoffmessung mit Hilfe gas-<br>chromatographischer Analyse 33                                     |
| 4.4.1.2     | Vergleich von Einzelstoffmessung und FID-Messung 36   |
| 4.4.2       | Absorptionswirkungsgrade 38   |
| 4.4.2.1     | Pilotanlage 1 39  |
| 4.4.2.1.1   | Versuchsabschnitt 1 39  |
| 4.4.2.1.2   | Versuchsabschnitte 2 und 3 40   |
| 4.4.2.1.3   | Versuchsabschnitt 4 42  |
| 4.4.2.1.4   | Gesamtzeitraum 44   |
| 4.4.2.2     | Pilotanlage 2 48  |
| 4.4.2.2.1   | Versuchsabschnitt 5 48  |
| 4.4.2.2.2   | Versuchsabschnitt 6 50  |
| 4.4.3       | Geruchsminderungsleistung 52  |

|           | Seite  |    |
|-----------|--|----|
| 4.4.3.1   | Geruchsminderungswirkungsgrad                                      | 52 |
| 4.4.3.2   | Veränderung der Geruchsqualität                                    | 52 |
| 4.4.4     | Biologische Aktivität  | 53 |
| 4.4.4.1   | Organische Trockensubstanz in der Waschflüssigkeit                 | 53 |
| 4.4.4.2   | pH-Wert der Waschflüssigkeit                                       | 54 |
| 4.4.4.3   | Schlammbelastung   | 55 |
| 4.4.4.4   | Schlammalter   | 59 |
| 4.4.4.5   | Restbelastung der Waschflüssigkeit                                 | 59 |
| 4.5       | Beurteilung der Ergebnisse   | 61 |
| 4.5.1     | Gesamteliminationsleistung   | 61 |
| 4.5.1.1   | Belebter Schlamm als Waschflüssigkeit                              | 61 |
| 4.5.1.2   | Dispersion aus belebtem Schlamm und Silikonöl als Waschflüssigkeit | 62 |
| 4.5.2     | Betriebsweise des Belebungsbeckens                                 | 63 |
| 5.        | Laboruntersuchungen  | 64 |
| 5.1       | Gas-Flüssig-Phasengleichgewichtsmessungen am System $N_2/H_2O$     |    |
| 5.1.1     | Beschreibung der Laborapparatur                                    | 65 |
| 5.1.1.1   | Laborapparatur zur Kalibrierung des GC-Detektors                   | 66 |
| 5.1.1.2   | Laborapparatur zur Messung von Henrykoeffizienten                  | 67 |
| 5.1.2     | Versuchsdurchführung   | 69 |
| 5.1.2.1   | Detektorkalibrierung   | 69 |
| 5.1.2.2   | Messung von Henrykoeffizienten                                     | 69 |
| 5.1.3     | Auswertung der Messungen   | 70 |
| 5.1.3.1   | Allgemeine Grundlagen der Auswertung                               | 70 |
| 5.1.3.2   | Detektorkalibrierung   | 71 |
| 5.1.3.2.1 | Berechnung der Beladung des Kalibriergases                         | 72 |
| 5.1.3.2.2 | Berechnung des Fugazitätskoeffizienten in der Gasphase             | 74 |
| 5.1.3.2.3 | Berechnung der Kalibrierfaktoren                                   | 76 |
| 5.1.3.3   | Henrykoeffizienten   | 76 |
| 5.1.4     | Ergebnisse   | 77 |
| 5.1.4.1   | Ethanol  |    |
| 5.1.4.2   | Butylacetat  | 78 |
| 5.1.4.3   | Vinylacetat  | 80 |
| 5.1.4.4   | Diethoxymethan   | 81 |

|         | <b>Seite</b>  |     |
|---------|---|-----|
| 5.1.4.5 | Toluol  | 82  |
| 5.1.5   | Beurteilung der Ergebnisse  | 83  |
| 5.1.5.1 | Fehlerabschätzung   | 83  |
| 5.1.5.2 | Vergleich mit Literaturangaben  | 83  |
| 5.2     | Flüssig-Flüssig-Phasengleichgewichtsmessungen<br>am System Silikonöl/H <sub>2</sub> O | 85  |
| 5.2.1   | Beschreibung der Laborapparatur   | 86  |
| 5.2.2   | Versuchsdurchführung  | 87  |
| 5.2.3   | Auswertung der Messungen  | 88  |
| 5.2.4   | Ergebnisse  | 90  |
| 5.2.4.1 | Ethanol, i-Propanol, n-Butanol  | 90  |
| 5.2.4.2 | n-Oktan   | 90  |
| 5.2.4.3 | Toluol  | 91  |
| 5.2.4.4 | Vinylacetat   | 92  |
| 5.2.4.5 | Butylacetat   | 92  |
| 5.2.4.6 | Ethylacrylat  | 93  |
| 5.2.4.7 | Diethoxymethan  | 94  |
| 5.2.5   | Beurteilung der Ergebnisse  | 95  |
| 5.2.5.1 | Fehlerabschätzung   | 95  |
| 5.2.5.2 | Vergleich mit berechneten Daten   | 96  |
| 5.3     | Abbaukinetikmessungen mit belebtem Schlamm<br>aus der Versuchsanlage                  | 98  |
| 5.3.1   | Beschreibung der Laborapparatur und der<br>Versuchsdurchführung                       | 99  |
| 5.3.1.1 | Untersuchung der endogenen Atmung   | 99  |
| 5.3.1.2 | Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der<br>Atmungsaktivität                         | 99  |
| 5.3.1.3 | Bestimmung der pH-Wert-Abhängigkeit der<br>Atmungsaktivität                           | 102 |
| 5.3.1.4 | Bestimmung der organischen Trockensubstanz  | 104 |
| 5.3.1.5 | Abbaukinetikmessung mit Hilfe der<br>Sauerstoffzehrungsgeschwindigkeit                | 104 |
| 5.3.1.6 | Abbaukinetikmessung mit Hilfe von<br>gaschromatographischer Analyse                   | 106 |
| 5.3.2   | Auswertung der Messungen  | 107 |
| 5.3.2.1 | Einfache Sauerstoffzehrungsmessungen  | 107 |
| 5.3.2.2 | Abbaukinetikmessung mit Hilfe der Sauerstoff-<br>zehrungsgeschwindigkeit              | 108 |

|             | <b>Seite</b>   |     |
|-------------|--|-----|
| 5.3.2.3     | Abbaukinetikmessung mit Hilfe von gaschromato-<br>graphischer analyse                          | 109 |
| 5.3.3       | Ergebnisse   | 110 |
| 5.3.3.1     | Endogene Atmung  | 110 |
| 5.3.3.2     | Temperaturabhängigkeit der Atmungsaktivität  | 111 |
| 5.3.3.3     | pH-Wert-Abhängigkeit der Atmungsaktivität  | 112 |
| 5.3.3.4     | Abbaukinetikmessungen  | 114 |
| 5.3.3.4.1   | Abbaukinetikmessungen mit Hilfe der<br>Sauerstoffzehrungsgeschwindigkeit                       | 114 |
| 5.3.3.4.1.1 | Ethanol  | 114 |
| 5.3.3.4.1.2 | n-Butanol  | 117 |
| 5.3.3.4.1.3 | 2-Ethylhexanol   | 118 |
| 5.3.3.4.1.4 | Butylacetat  | 119 |
| 5.3.3.4.1.5 | Ethylacrylat   | 121 |
| 5.3.3.4.1.6 | Butylacrylat   | 123 |
| 5.3.3.4.1.7 | Diethylcarbonat  | 125 |
| 5.3.3.4.2   | Beurteilung der Ergebnisse   | 126 |
| 5.3.3.4.2.1 | Diskussion der Ergebnisse  | 126 |
| 5.3.3.4.2.2 | Vergleich mit einer anderen Meßmethode   | 129 |
| 5.3.3.4.2.3 | Fehlerabschätzung  | 129 |
| 6.          | Theoretische Berechnungen zur Stoffaustausch- und<br>Stoffeliminationsleistung der Pilotanlage | 131 |
| 6.1         | Grundlagen und mathematische Formulierungen  | 131 |
| 6.1.1       | Stoffübergang im Absorber  | 131 |
| 6.1.1.1     | Stoffbilanzen  | 131 |
| 6.1.1.2     | HTU/NTU-Modell   | 134 |
| 6.1.1.3     | Anpassung von Modellparametern   | 138 |
| 6.1.2       | Biologischer Abbau im Belebungsbecken  | 138 |
| 6.2         | Stoffaustauschleistung der Pilotanlage   | 142 |
| 6.2.1       | Ethanol, Versuchsabschnitte 4 bis 6  | 142 |
| 6.2.2       | Toluol, Versuchsabschnitte 4 und 5   | 143 |
| 6.2.3       | Toluol, Versuchsabschnitt 6  | 143 |
| 6.2.4       | Diskussion der Ergebnisse  | 144 |
| 6.2.4.1     | Adsorptionskapazität der Biomasse  | 144 |

|  | <b>Seite</b>  |
|--|---|
| 6.2.4.2  | Stoffübergangswiderstände, Toluol 144   |
| 6.3  | Stoffeliminationsleistung der Pilotanlage,<br>Überprüfung der Modellgleichungen 147                                     |
| 7.   | Auslegung einer GroBanlage 148  |
| 7.1  | Auslegung von Absorptionskolonne und Belebungsbecken 148  |
| 7.2  | Hinweise zum Betrieb der Anlage 149   |
| 7.3  | Kosten des Bioabsorptionsverfahrens 150   |
| 7.3.1  | Investitionskosten 150  |
| 7.3.2  | Betriebskosten 150  |
| 8.   | Zusammenfassung 152   |
| 9.   | Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen 158   |
| 10.  | Literaturverzeichnis 165  |
| Anhänge zu Abschnitt 5 175                             |   |
| Anhang 5.1   | Dampfdruckdaten 176   |
| Anhang 5.2   | Bestimmung der Kalibrierfaktoren für die<br>Laborapparatur zur Ermittlung von Gas-Flüssig-<br>Phasengleichgewichten 182 |
| Anhang 5.3   | Auswertung Henrykoeffizienten 196   |
| Anhang 5.4   | Auswertung Verteilungskoeffizienten 201   |
| Anhang 5.5   | Auswertung Abbaugeschwindigkeitsmessungen mit<br>Hilfe der Sauerstoffzehrungsgeschwindigkeit 216                        |
| Anhang 6   | Abhängigkeit des Henrykoeffizienten vom<br>Salzgehalt des Lösungsmittels 229  |
| <b>Anhang</b>  |   |
| Verzeichnis der  |   |
| Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 233 |   |