

Dipl.-Ing. Martin Leemann, Heidelberg

**Einsatz der Dampf-  
permeation zur Abtrennung  
und Rückgewinnung  
organischer Lösungsmittel  
aus Abluft – Verfahren und  
Verfahrenskombinationen –**

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **446**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>X</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einführung und Stand der Technik</b>	<b>3</b>
1.1 Einführung	3
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Aufbau der Arbeit	8
<b>2 Grundlagen der Gastrennung mit Hilfe von Membranen</b>	<b>9</b>
2.1 Stofftransport in Porenmembranen	9
2.1.1 Knudsendiffusion	10
2.1.2 Stefan-Maxwell-Diffusion	11
2.1.3 Viskose Strömung	12
2.1.4 Oberflächendiffusion	13
2.1.5 Kapillarkondensation	14
2.1.6 Dusty-Gas-Modell	15
2.1.7 Bilanzgleichungen für den Gastransport in porösen Feststoffen	16
2.2 Stofftransport in dichten Elastomerfilmen	20
2.2.1 Modell des Lösungs-Diffusions-Mechanismus	20
2.2.2 Sorption in Elastomeren	22
2.2.2.1 Löslichkeiten nach Flory-Huggins und Flory-Rehner	22
2.2.2.2 Konzept der ungleichen Affinität	23
2.2.2.3 Differentielle dreidimensionale Löslichkeitsparameter	23
2.2.2.4 Korrelationen zu Lennard-Jones-Potential, kritischer Temperatur, Siedepunkt und Molmasse	24

2.2.3	Diffusion in Elastomeren	25
2.2.3.1	Free Volume und andere verwandte Theorien	25
2.2.3.2	Beschreibung über Aktivierungsenergie und Molmassen	27
2.2.4	Abhängigkeit der Permeabilität von Temperatur und Konzentration	29
2.2.5	Permeation von Gemischen	30
2.2.6	Bilanzgleichungen für den Stofftransport in dichten Elastomerfilmen	31
2.3	Stofftransport in den Bulkphasen von Kapillarmembranmodulen	33
2.3.1	Grenzschichten	33
2.3.2	Bilanzgleichungen in Feed- und Permeatraum	34
2.4	Kennzahlen für das Trennvermögen der Membran und das Betriebsverhalten von Membransystemen	40
<b>3.</b>	<b>Transport von organischen Lösungsmitteln, von Wasser und von Permanentgasen durch dünne Silikonfilme</b>	<b>43</b>
3.1	Polymerkenngrößen und Herstellung dünner Silikonfilme	43
3.1.1.	Filmherstellung	44
3.1.2	Charakterisierung der Filme	44
3.2	Einkomponentensysteme Butylacetat, Ethylacetat, Ethanol, Toluol, p-Xylol, MEK, Stickstoff und Sauerstoff	45
3.2.1	Versuchsanlagen und Meßprinzipien	45
3.2.1.1	Aufbau des Permeationsteststandes und Meßprinzip	45
3.2.1.2	Absorptionsteststände und ihre Meßprinzipien	48
3.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen an Einkomponentensystemen	50
3.2.2.1	Permeationskoeffizienten und Permselektivitäten	50
3.2.2.2	Sorptionsisothermen und Sorptionskoeffizienten	54
3.2.2.3	Diffusionskoeffizienten	58
3.2.2.4	Quantitative Beschreibung von Plastifizierungseffekten	60
3.2.2.5	Voraussage von Transportparametern bei anderen Betriebsbedingungen und für andere Komponenten	62

<b>4</b>	<b>Lösungsmittelrückgewinnung über Kapillarmembranmodule</b>	<b>67</b>
4.1	Eingesetzte Membranmodule und Modulkenngößen	68
4.2	Aufbau des Membranmodulteststandes, Meßtechnik und Meßwerterfassung	70
4.3	Untersuchungen von Gemischen organischer Lösemittel mit Luft ohne Stage-Cut	72
4.3.1	Systeme mit einer Lösemittelkomponente (Toluol-Luft, Ethylacetat-Luft)	73
4.3.1.1	Anreicherungsverhältnis für Toluol und Ethylacetat	73
4.3.1.2	Flüsse von Toluol, Ethylacetat und Luft	76
4.3.2	Systeme mit zwei Lösemittelkomponenten (Toluol-Ethylacetat-Luft)	78
4.3.2.1	Anreicherungsverhältnis für Toluol und Ethylacetat	78
4.3.3	Permeabilitäten und Selektivitäten des Moduls	81
4.4	Untersuchungen von Gemischen organischer Lösemittel mit Luft mit Stage-Cut	85
4.4.1	Abreinigungsgrad, Anreicherung und Flüsse als Funktion des Volumenstromes	86
4.4.2	Einfluß von Strömungsführung und Modulgeometrie	90
4.5	Standzeitverhalten der Membran	93
<b>5</b>	<b>Stofftransport in Kompositmembranen und Kapillarmembranmodulen</b>	<b>97</b>
5.1	Modellbildung des Stofftransports in Kompositmembranen und Kapillarmembranmodulen	97
5.1.1	Aufteilung der Unterstruktur	97
5.1.2	Das vollständige Modell	99
5.1.3	Parameteridentifikation	102
5.2	Simulationsergebnisse für die Charakteristik von Kompositmembranen	104
5.2.1	Einfluß der Deckschichtdicke	105
5.2.2	Einfluß des Permeatgesamtdrucks	105
5.2.3	Einfluß der Feedkonzentration	108
5.2.4	Einfluß der Permeatkonzentration	109
5.2.5	Einfluß der Temperatur	110
5.2.6	Interpretation der Membranveränderungen über der Betriebsdauer	111
5.2.7	Reduzierung des Modells	112
5.2.8	Einfluß von Unterstruktur und Grenzschicht auf die Selektivität von Kompositmembranen	115
5.2.9	Modellvalidierung	118

5.3	Simulationsergebnisse für Membranmodule	121
5.3.1	Die Gleichstromführung	121
5.3.2	Die Gegenstromführung	124
5.3.3	Die Kreuzstromführung	126
5.3.4	Modellreduktion für Membranmodule	126
5.3.5	Modellvalidierung	131
5.4	Spezielle Modulverschaltungen	131
5.4.1	Die Retentatverschaltung	134
5.4.2	Die Permeatverschaltung	136
<b>6.</b>	<b>Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung von Lösungsmitteln über die Dampfpermeation</b>	<b>138</b>
6.1	Konventionelle Verfahren zur Reinigung lösungsmittelkontaminierter Abluftströme und ihre Einsatzbereiche	138
6.2	Optimierte Betriebsbedingungen und Systemkosten	140
6.3	Systemvergleich und kostenoptimale Abluftreinigungsverfahren	148
<b>7.</b>	<b>Membranhybridverfahren zur Behandlung lösungsmittelkontaminierter Abluftströme</b>	<b>149</b>
7.1	Verfahrenskombinationen - Literaturüberblick	149
7.2	Adsorptions-Membran-Hybridverfahren	150
7.2.1	Verschaltungsmöglichkeiten	152
7.2.2	Modellbildung von Rotoradsorbern	154
7.2.2.1	Wärme- und Stoffaustausch bei Adsorption und Desorption	154
7.2.2.2	Anwendung auf rotierende Systeme	159
7.2.2.3	Modellparameter	160
7.2.2.4	Modellvalidierung	161
7.2.3	Ergebnisse	161
7.2.3.1	Vergleich der Verschaltungsvarianten	164
7.2.3.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Auslegungskriterien	171
7.3	Absorptions-Membran-Hybridverfahren	172

<b>Anhang</b>	<b>173</b>
A1: Vertafelte Reinstoffwerte	173
A2: Stoßquerschnitt $\sigma_{ij}$ und Kollisionsintegral $\Omega_{ij}$	173
A3: Sättigungsdampfdruck $p_\infty$	174
A4: Oberflächenspannung $\sigma_i$	174
A5: Parameter in den Beziehungen (5.1) und (5.2)	175
A6: Parametersatz für Modellvergleiche in Bild 5.10	175
A7: Datensatz für Adsorptionsrotor in Kap. 7.2	176
A8: Datensatz für Membranmodul in Kap. 7.2	177
A9: Datensatz für gefüllte Dialysemodule in Anhang A10	177
A10: Herstellung und Betrieb von Polymerabsorbern zur Reinigung lösungsmittelkontaminierter Abluftströme	179
A10.1 Polymerabsorber und ihre Herstellung	180
A10.1.1 Polymerauswahl	180
A10.1.2 Mögliche Bauformen und hergestellte Prototypen	180
A10.1.3 Voruntersuchungen zum Durchbruchverhalten und Absorberauswahl	181
A10.1.4 Charakterisierung	183
A10.2 Experimentelle Untersuchungen	185
A10.2.1 Sorptionsverhalten	185
A10.2.2 Desorption über Temperaturwechsel	186
A10.2.3 Desorption über eine Kombination von Temperatur- und Druckwechsel	189
A10.2.4 Sorptions-Desorptions-Zyklen	190
A10.3 Modellbildung und Simulation von Polymerabsorbere	191
A10.3.1 Wärme- und Stoffaustausch bei Absorption und Desorption	191
A10.3.2 Modellvalidierung	193
A10.3.3 Simulation von Sorptions-Desorptions-Zyklen	194
A10.3.4 Modellreduktion	196
A10.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	197
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>198</b>