

Abschlussbericht

Forschungsarbeit MBFSt-Kennziffer: 3326

Thema: Anwendung rotierender Stoffaustauschmaschinen für die Rektifikation und die Reaktivrektifikation

Autoren: Kolja Neumann, Daniel Sudhoff und Philip Lutze

Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik

Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen

Technische Universität Dortmund

Emil-Figge-Strasse 70

D-44227 Dortmund, Deutschland

Email: Philip.Lutze@bci.tu-dortmund.de

1. Einleitung und Motivation

Die Intensivierung von Prozessen und Apparaten in der chemischen Industrie bietet vielversprechende Lösungsansätze um den gesteigerten Anforderungen effizienterer und flexiblerer Produktionsprozessen zu begegnen. Dabei kann die Prozessintensivierung (PI), angefangen auf molekularer Ebene bis hin zur Entwicklung innovativer Prozesskonzepte, auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen [1]. Auf der Ebene der Intensivierung des Stofftransportes setzt die HiGEE-Technologie („High Gravity“) an, bei der die Gravitationskraft durch ein angelegtes Zentrifugalfeld ersetzt wird. Die nachfolgend beschriebenen rotierenden Stoffaustauschmaschinen, auch Rotating Packed Bed (RPB) genannt, bilden spätestens seit der Patentierung durch Ramshaw und Mallinson [2] einen Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der HiGEE-Technologie. Das zentrale Element des RPB bildet ein an einer Welle montierter Rotor mit zylindrischer Packung (Abbildung 1) auch Ausführungen mit mehreren Rotoren sind möglich. Die Intensivierung wird durch das durch Rotation der Packung hervorgerufene Zentrifugalfeld erreicht. Die Flüssigkeit wird im Zentrum der Packung aufgegeben und strömt durch das Zentrifugalfeld beschleunigt nach außen. Je nach Anwendungsfall kann der Dampf bzw. das Gas im Gegen-, Gleich oder auch Kreuzstrom zur Flüssigkeit geführt werden.

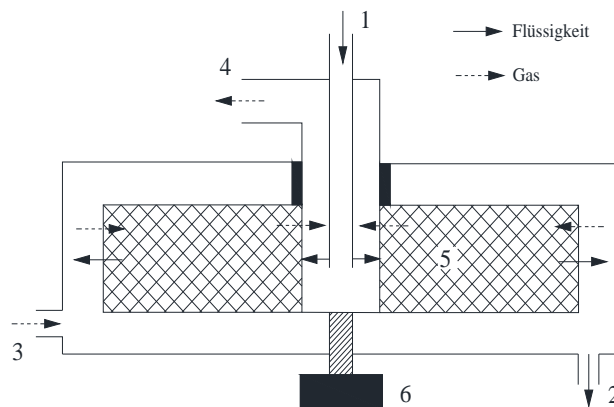


Abbildung 1: RPB im Gegenstrombetrieb, 1: Flüssigkeitseingang mit Flüssigkeitsverteiler; 2: Flüssigkeitsausgang; 3: Gaseingang; 4: Gasausgang; 5: Rotor mit Packung; 6: Motor mit Welle.

RPBs zeichnen sich gegenüber konventionellen Kolonnen durch größere Stofftransportraten und höhere Durchsätze aus, sodass die Größe des Apparates und damit der notwendige Platzbedarf innerhalb der Gesamtanlage reduziert werden. Zusammengefasst vereinen RPB die Anforderungen einer flexible Prozessführung mit einem kompakten Design. Seit der Patentierung 1981 [2] wurden von der Produktion von Nanopartikeln bis hin zur Auftrennung von Alkohol-Wasser Gemischen, in zahlreichen Veröffentlichungen unterschiedliche Einsatzgebiete für RPBs identifiziert.

2. Ziel der Arbeit

Trotz der genannten Vorteile und vielversprechender Ergebnisse fanden RPB bislang jedoch kaum industrielle Anwendung. Die Ursachen dafür liegen zum einen in den bislang fehlenden Werkzeugen welche eine Potentialanalyse der Industrie ermöglichen würde. Zum anderen erschwert das weiterhin fehlende Verständnis wirkender Mechanismen, die Erarbeitung von Modellen, Methoden und Regeln im Bereich des konzeptionellen Prozessentwurfs. So ist die

generelle Auslegung eines RPBs derzeit nur durch Fall-zu-Fall-Testen in bestehenden Laboranlagen möglich.

Ziel dieser Arbeit ist daher, die Erarbeitung einer systematischen experimentellen Charakterisierung der Anlage als auch der Entwicklung eines ausreichend geeigneten Modelles zur Beschreibung eines RPBs. Mit Hilfe dieser Werkzeuge kann dann das Potential von RPBs abgeschätzt werden um weitere Einsatzmöglichkeiten zu identifizieren. Die experimentellen Ergebnisse der Charakterisierung sowie die entwickelten Werkzeuge zum konzeptionellen Prozessentwurf können der Forschung und der Industrie als Grundlage zur Abschätzung des Potentials und im Rahmen der Prozesssynthese zur Bewertung der Einsatzfähigkeit dieses Apparates dienen. So könnte der Einsatz von RPBs für modulare Anlagen, für flexible Prozesse und für viele weitere Spezialanwendungen bewertet und ermöglicht werden.

3. Charakterisierung des Apparates

Analog zur vertikal ausgerichteten Kolonne steht bei der Charakterisierung von RPBs die Identifizierung des Einflusses wichtiger Konstruktionsmerkmale wie etwa trennwirksame und nicht-trennwirksame Einbauten. Ferner ist der Einfluss der gewählten Betriebsbedingungen auf die Hydrodynamik und den Stofftransport zu untersuchen. Dabei stehen Untersuchungen zum Druckverlust, zur Hydrodynamik und zum Stofftransport in Absorptions- und Rektifikationsprozessen im Vordergrund.

3.1. Grundlagen der Charakterisierung

- Hydrodynamik:

Das hydrodynamische Betriebsfenster eines RPBs hängt neben der Gas- und Flüssigkeitsbelastung auch von der Rotationsgeschwindigkeit und der konstruktiven Ausführung ab. So ergeben sich neben dem „klassischen“ Fluten auch aus der Anzahl der Rotoren in einem Apparat Limitierungen. Klassisches Fluten bezeichnet den Zustand des Flutens analog zu konventionellen Kolonnen, bei dem aufgrund großer wirkender Reibungskräfte zwischen Gas und Flüssigkeit, die Flüssigkeit mit dem Gas ausgetragen wird. In *Abbildung 2* ist links das hydrodynamische Betriebsfenster für die bestehende Pilotanlage mit drei Rotoren schematisch dargestellt. Die einzelnen Limitierungen welche das Betriebsfenster begrenzen, ergeben sich aus der detaillierten Betrachtung der Konstruktion (vgl. Kapitel 3.2) und sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Limitierungen des Betriebsfensters bei der verwendeten Pilotanlage

Bezeichnung	Ort	Beschreibung
Klassisches Fluten	Rotoraug	Niedrigsten Flüssigkeits- und höchsten Gasgeschwindigkeit. Flüssigkeit wird zum Auge hin ausgetragen. Kapazität nimmt mit steigender Rotationsgeschwindigkeit zu
Rückprall	Rotoraug	Häufig Lochbleche als Packungsträger eingesetzt. Auf dem Lochblech wird das Drahtgestrick aufgewickelt. Hohe Rotationsgeschwindigkeiten verursachen ein Zerschlagen der Flüssigkeit am Lochblech vor Eintritt in die Packung. Das Aerosol wird nach Innen ausgetragen.
Ablenken	Rotoraug	Flüssigkeit tritt aus dem Verteiler aus und der Flüssigkeitsstrahl wird durch den Gasstrom abgebremst. Austrag von Tropfen zum Rotoraug
Aufstauen	Zwischenboden	Flüssigkeit sammelt sich auf den Zwischenböden und fließt im Gravitationsfeld auf den nachfolgenden unteren Rotor. Bei hohen Gasgeschwindigkeiten aufgrund des kleinen Querschnitts am Rotoraug, wird das Abfließen der Flüssigkeit verhindert wodurch es zu einem Aufstauen auf den Zwischenböden kommt.

- Stofftransport:

Vereinfacht dargestellt wird die Trenneffizienz einer vertikal ausgerichteten Kolonne durch die Höhe und die Kapazität über den Durchmesser bestimmt (*Abbildung 2*, rechts). Zur Vermessung der Trennleistung bzw. des Stofftransportes, sind geeignete Stoffsysteme zu verwenden [3]. Des Weiteren ist eine große Sorgfalt bei der experimentellen Untersuchung gefordert, da die Auswahl des Aufbaus und verwendeten Equipments einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hat [4].

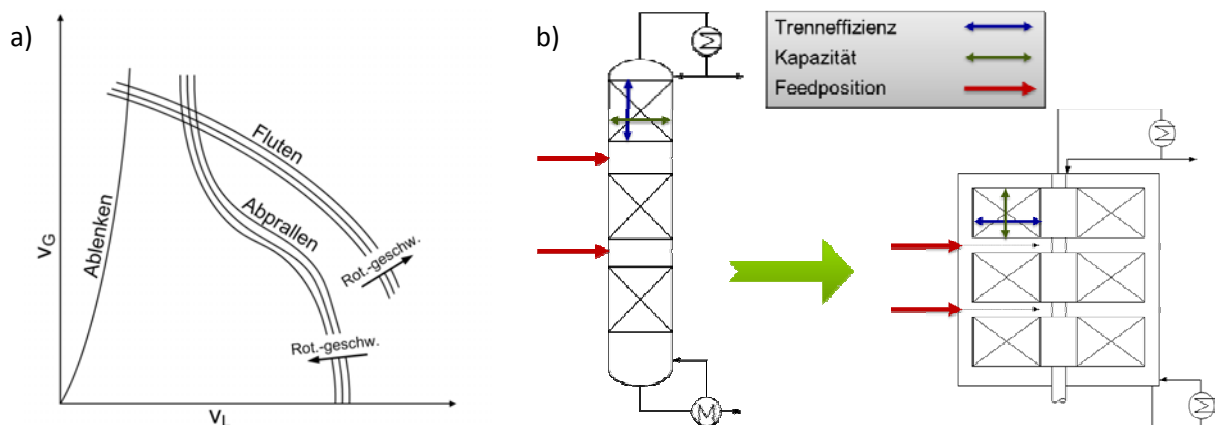


Abbildung 2: a) Hydrodynamisches Betriebsfenster des RPBs, b) Analogie Kapazität und Trenneffizienz zwischen Kolonnen und RPBs.

3.2. Beschreibung der Anlage

Bei der experimentell vermessenen Pilot-Anlage (siehe *Abbildung 3*) handelt es sich um eine rotierende Stoffaustauschmaschine mit drei Rotoren, welche im Gegenstrom betrieben wird (engl. Multi Stage Counter-Current Rotating Packed Bed, kurz: MSCC-RPB). Die drei grundsätzlich baugleichen Rotoren sind an einer Welle montiert und durch Zwischenböden

voneinander getrennt. Die Welle wird über einen Keilriemen durch einen Motor angetrieben und kann mit einer maximalen Frequenz von 12,5 Hz betrieben werden.

Abbildung 3 ist der schematische Aufbau der Pilotanlage zu entnehmen. Über Leitungen gelangt Flüssigkeit zum Auge des jeweiligen Rotors und wird durch Düsen auf die Packung versprüht. In der Packung wird die Flüssigkeit durch das angelegte Zentrifugalfeld nach außen beschleunigt, wo sie nach Verlassen der Packung auf die Wand des stationären Gehäuses trifft. Über den Zwischenboden läuft die Flüssigkeit zur Mitte des Apparates zurück und gelangt in den unteren Rotor. Über zusätzlich beim mittleren und unteren Rotor am Lochblech angebrachte Flügelbleche wird die vom oberen Zwischenboden ablaufende Flüssigkeit in der Packung verteilt. Dampf wird im unteren Teil des MSCC-RPB aufgegeben und strömt im Gegenstrom zur Flüssigkeit von außen durch die Packung zum Rotorausgang. Damit der Dampf durch die Packung strömt und nicht im Bypass am Rotor vorbei, befinden sich zwischen Rotor und Zwischenboden Labyrinthdichtungen.

Der Bereich im Rotorausgang zwischen der Mitte des Rotors und dem Beginn der Packung wird als innerer Durchmesser bezeichnet und hat einen Durchmesser von 160 mm. Als Packungsmaterial wird Drahtgestrick (Drahtdicke von 0,22 mm) und einer Maschenweite von ca. 8 mm verwendet. Der äußere Durchmesser des Rotors beträgt 596 mm und die axiale Höhe maximal 29 mm. Zur Reduktion der Kapazität kann die axiale Höhe durch das Einlegen von Scheiben reduziert werden.

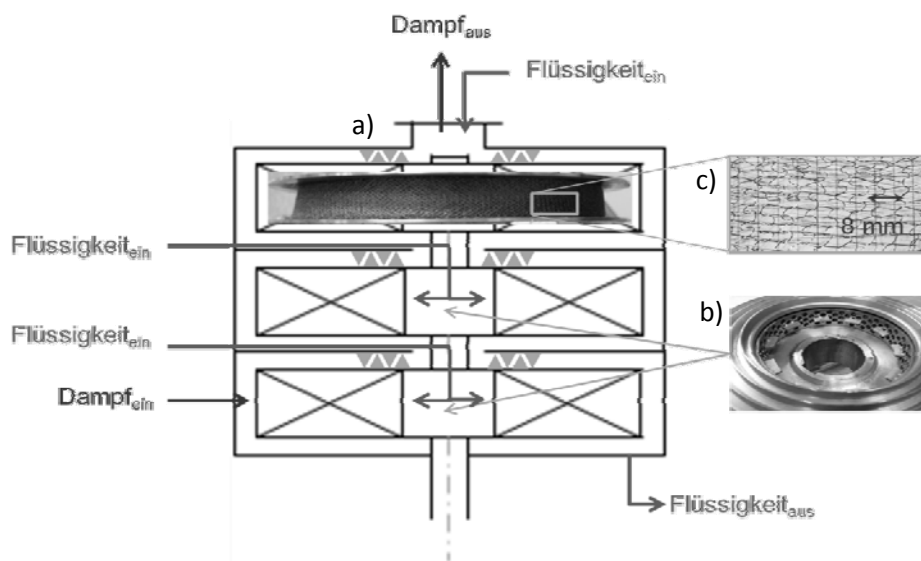


Abbildung 3: Schematische Zeichnung der MSCC-RPB Pilotanlage; a) Labyrinthdichtung (grüne Dreiecke), b) Drahtgestrick, c) Rotorausgang mit Lochblech und Flügelblechen.

3.3. Exemplarische Ergebnisse der Charakterisierung

Exemplarisch für die im Rahmen der Arbeit untersuchten experimentellen Ergebnisse, wird für die Versuchsanlage bestückt mit einem Rotor welcher bepackt mit einem Drahtgestrick als Packung die Ergebnisse der Hysterese-Versuche, der Hydrodynamik, des Einflusses der Viskosität auf den Stofftransport und der Hydrodynamik als auch der Vergleich eines intensivierten Rotors mit einem Standard-Rotor auf den Stofftransport gezeigt.

a) Hysterese Versuche

Olujic [4] verwies bereits bei der Charakterisierung der Effizienz von strukturierten Packungen in Rektifikationskolonnen auf die Bedeutung der Reihenfolge der eingestellten Betriebspunkte für die durchgeführten Experimente. Der sich einstellende beschriebene Hystereseeffekt ist auch bei RPBs festzustellen. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Bedeutung, die Reihenfolge in welcher die Versuche zu fahren sind, in einer standardisierten Messmethode festzuhalten.

b) Druckverluste

Bei der Vermessung der Hydrodynamik wurden trockene, nasse Druckverluste, sowie Flutpunkte vermessen. Eine besondere Herausforderung besteht in der hohen Kapazität von RPBs bzw. des breiten Betriebsbereiches. In Abbildung 4 sind exemplarisch die Verläufe für den trockenen und nassen Druckverlust für einen Rotor mit 15 mm Packungshöhe gezeigt. Anhand des gleichen Verlaufes und im Rahmen der Messfehler übereinstimmenden Werten von trockenem und nassem Druckverlust, zeigt sich die hohe Kapazität von RPBs, da der sogenannte „Loading Point“ noch nicht erreicht werden konnte.

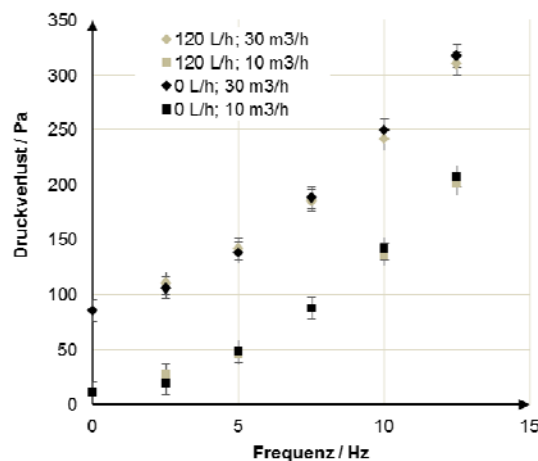


Abbildung 4: Vergleich zwischen dem nassen (120 L/h Wasser) und dem trockenen Druckverlust in Abhängigkeit der Frequenz bei verschiedenen Gasvolumenströmen.

c) Hydrodynamischen Betriebsfenster

Um das Flutverhalten in RPBs vermessen zu können, können zwei Methoden verfolgt werden. Zum einen können die Flüssigkeits- und Gasbelastung konstant gehalten werden und die Drehzahl wird sukzessive verringert und der Druckverlust vermessen [5]. Das Fluten ist anhand eines abrupten Anstiegs des Druckverlustes und einer stark erhöhten Akkumulation von Flüssigkeit im Rotorauge zu erkennen (Abbildung 5a). Zum anderen wird analog zu Flutversuchen in Kolonnen der Gasvolumenstrom langsam erhöht, die Flüssigkeitsbelastung und die Drehzahl im RPB werden konstant gehalten. Der Flutpunkt ist dann durch einen starken Anstieg des Druckverlustes zu erkennen (Abbildung 5b). Untersucht wurde zunächst das Flutverhalten des obersten Rotors. Alle in Abbildung 6 angegebenen Druckverluste beziehen sich auf den obersten Rotor.

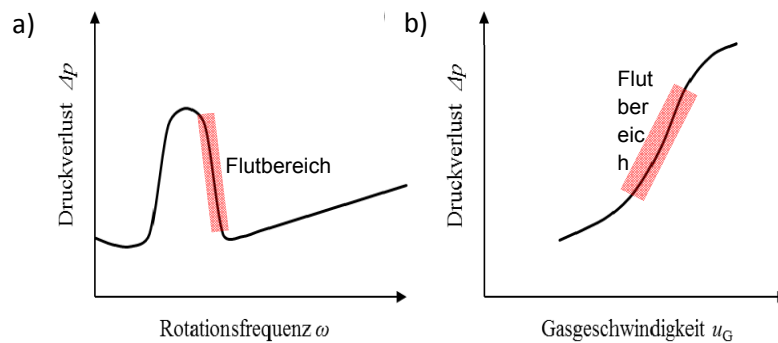


Abbildung 5: (a) Druckverlust gegen Rotationsfrequenz bei konstantem Gas- und Flüssigkeitsvolumenstrom zur Bestimmung des Flutpunktes in RPBs nach Rao [5]. (b) Druckverlust aufgetragen gegen die Gasgeschwindigkeit zur Bestimmung des Flutpunktes nach Lockett [6].

Da bei der zweiten Methode die Wallis-Gleichung [6] zur Beschreibung der Flutpunkte in Abhängigkeit der Kapazität und der Rotationsgeschwindigkeit angewandt werden kann, wurden die Experimente für eine erste Vermessung des hydrodynamischen Betriebsfensters nach Methode zwei durchgeführt (Abbildung 6a). Es zeigte sich der vermutete Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit auf das Betriebsfenster (Abbildung 6b).

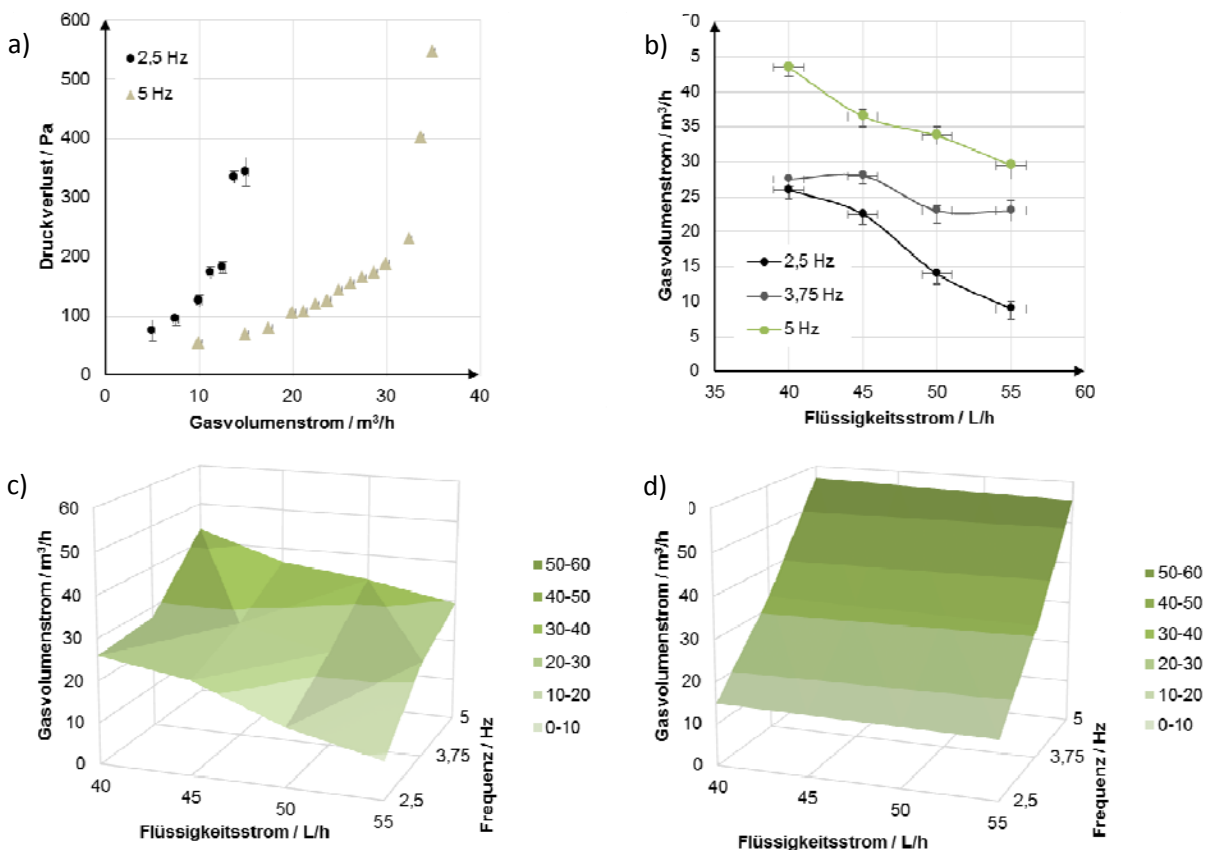


Abbildung 6: Flutmessungen mit hochviskoser Flüssigkeit ($\eta \approx 500$ mPas) bei einer Rotorhöhe von 10 mm a) Nach Methode 2 (siehe Abbildung 5b) bei verschiedenen Frequenzen und einem Flüssigkeitsvolumenstrom von 50 L/h, b) Hydrodynamisches Betriebsfenster durch Messpunkte nach Abbildung 6a generiert c) Experimentell ermitteltes Betriebsfenster d) Nach Wallis-Gleichung mit Literaturdaten [7] berechnetes Betriebsfenster.

Ein Gemisch aus Wasser und Polyvinylpyrrolidon (PVP) mit einer Viskosität von 600 mPas wurde verwendet, um einen ersten Betriebsbereich für eine Rotorhöhe von 10 mm zu vermessen. Die generierten Daten (Abbildung 6c) wurden dann mit den Vorhersagen der Wallis-Gleichung mit aus der Literatur entnommenen Parametern [7] verglichen (Abbildung 6c). Dabei zeigte sich in den Experimenten ein signifikanter Einfluss der Flüssigkeitsbeladung auf das Betriebsfenster, als bei den durch die Wallis-Gleichung berechneten Werten (Abbildung 6d).

d) Viskose Medien in RPBs

Zur Abschätzung der Eignung von RPBs zur Verarbeitung viskoser Medien in Rektifikation und Absorption/Desorption wurden Versuche zur CO₂ Absorption in 10 Gew.-%iger Monoethanolamin (MEA)-Lösung durchgeführt. Zur Erhöhung der Viskosität wurde erneut PVP eingesetzt. Die in *Abbildung 7* dargestellten Verläufe verdeutlichen die Eignung es Einsatzes von RPBs zur Verarbeitung viskoser Medien. So ist trotz der erheblichen Erhöhung der Viskosität der Lösemittel weiterhin eine Absorptionsleistung von über 50 % zu verzeichnen

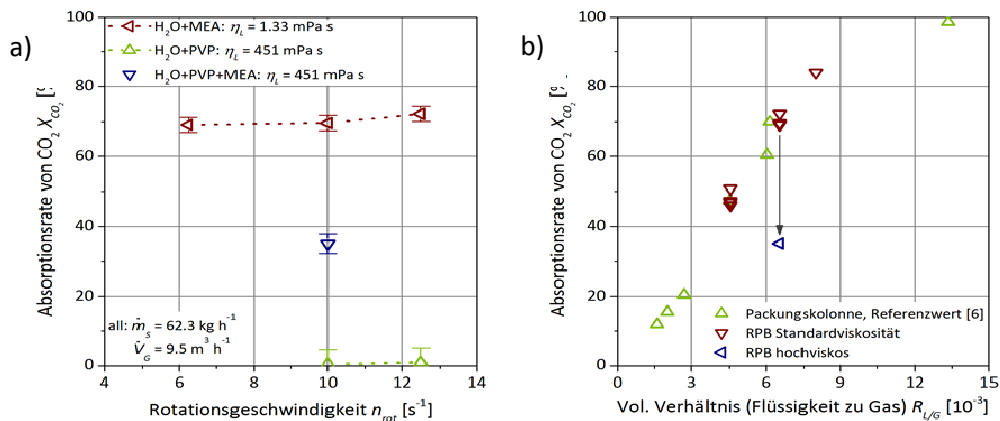


Abbildung 7: CO₂ Absorptionsversuche in der MSCC-RPB Pilotanlage mit 10 Mol.-% CO₂ im Eingangsgasstrom, a) Vergleich der Absorptionsraten zwischen normal und höher viskoser MEA-Lösung, b) Vergleich der Absorptionsraten zwischen RPB und einer konventionellen DN50 Packungskolonne (Sulzer-BX).

4. Modellierung

Simulationsstudien bieten eine sehr gute Möglichkeit zur Erstellung von Potentialanalyse und zur Identifizierung möglicher Einsatzgebiete von RPBs. Dazu ist die Erstellung eines auf Energie- und Stoffbilanzen basierenden detaillierten Modells notwendig. Grundlage des im Rahmen der Forschungsarbeit von Sudhoff et al. [8] entwickelten Modells bilden in der Literatur verfügbare Korrelationen zur Beschreibung der Hydrodynamik und des Stofftransportes. Das Modell wurde in die Softwareumgebung *Aspen Custom Modeler*TM implementiert und verfügt über unterschiedliche *Abbildung 8*.

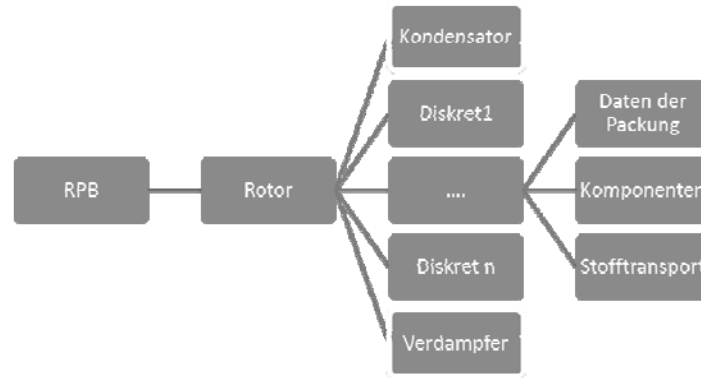


Abbildung 8: Struktur des Modells in ACM für die Rektifikation [8].

Das Kernelement bildet der entwickelte Ansatz der äquiarealen Diskretisierung. Bei Modellen zur Beschreibung von Trennprozessen in konventionellen Kolonnen wird die Kolonne i.d.R. in Diskrete gleichen Grundflächen (Kolonnenquerschnitt) und gleicher Höhe unterteilt. Da somit das Volumen in jedem Diskret konstant ist, können die experimentell bestimmten und in der Literatur durch Korrelationen beschriebenen volumetrischen Stofftransportkoeffizienten für die Modellierung eingesetzt werden. Da die Querschnittsfläche in RPBs mit dem Radius zunimmt, sind Diskrete mit gleicher Grundfläche zu wählen. Aus diesem Grund, um das Diskretvolumen konstant zu halten, ist die radiale Breite des Diskretes so zu wählen, dass äquiareale Diskrete, also Diskrete gleicher Grundfläche erhalten werden.

Aufgrund der Länge dieses Berichtes sind alle Modellgleichungen und Korrelationen in der Publikation von Sudhoff et al. [8] nachzulesen. Die Güte der verwendeten Korrelationen sind exemplarisch für den gaseitigen Stofftransportkoeffizienten $K_G a$ in *Abbildung 9* dargestellt. Die Güte des entwickelten Gesamtmodells ist exemplarisch für die Berechnung der molaren Konzentrationen im Destillat und Sumpf in *Abbildung 9* dargestellt. Die Korrelationen sowie das Gesamtprozessmodell können die experimentellen Werte mit hoher Genauigkeit wiedergeben.

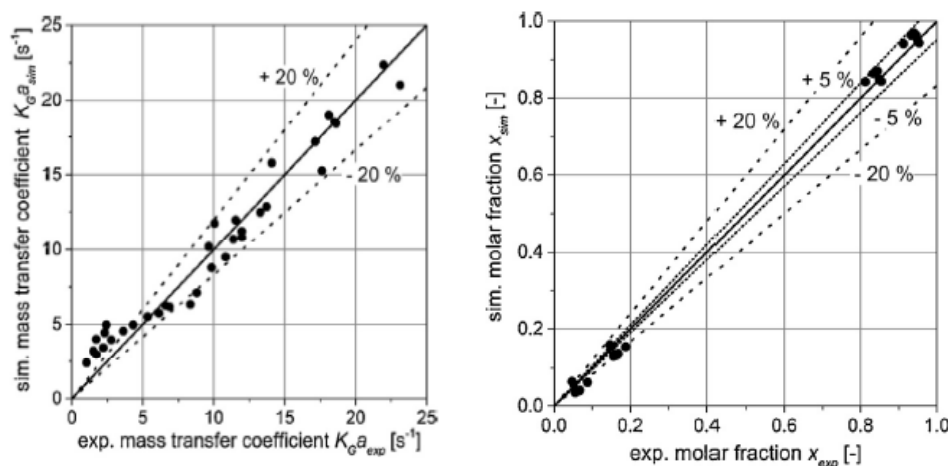


Abbildung 9: Paritätsplot experimenteller Daten [9] [10] und mit Hilfe des entwickelten Modells simulierten Daten für den gaseitigen volumetrischen Stofftransportkoeffizienten; Rechts: Paritätsplot experimenteller Daten [11] und mit Hilfe des entwickelten Modells simulierten Daten für molaren Konzentrationen im Destillat und Sumpf. (aus der im Rahmen dieser Arbeit veröffentlichten Publikation von Sudhoff et al.[8]).

5. : Zusammenfassung

Rotierende Stoffaustauschmaschinen, auch Rotating Packed Beds (RPBs) genannt, bieten einen vielversprechenden Ansatz zur Intensivierung des Energie- und Stofftransportes bei Rektifikationsprozessen. Aufgrund fehlender systematischer Untersuchungen der Technologie wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit Ansätze zur Charakterisierung von RPBs entwickelt. Diese enthalten neben standardisierten Versuchsprotokollen zur Druckverlustmessung auch Vorgaben zur Vermessung des hydrodynamischen Betriebsfensters. Exemplarisch wurde das Betriebsfenster eines Rotors mit 10 mm Packungshöhe bei erhöhter Viskosität vermessen und mit berechneten Werten verglichen. Dabei zeigte sich, dass wie erwartet eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit eine Verbreiterung des Betriebsfensters bewirkt. Da bei normalviskosen Systemen der trockene dem nassen Druckverlust entspricht, zeigt sich, dass die Apparate meist weit von der Betriebsgrenze betrieben werden und folglich nicht das ganze Potential der Technologie genutzt wird. Auch in Hinblick auf einen intensiven und gleichmäßigen Stoffaustausch über den gesamten Rotor sind neue Rotorkonzepte zu entwickeln. Erste Tests zur Abschätzung der Eignung von RPBs zur Verarbeitung von viskosen Medien waren sehr vielversprechend. So konnten auch in viskoser MEA-Lösung hohe Absorptionsraten erzielt werden.

Für eine erste Potentialabschätzung wurde ein Modell in die Softwareumgebung des Aspen Custom ModellersTM implementiert und anhand von veröffentlichten experimentellen Daten erfolgreich validiert. Ausgehend von dem Modell wurden anschließend eine Design Methode und weitere Werkzeuge zur Auslegung von RPBs entwickelt [8]. Die Anwendung der entwickelten Werkzeuge wurde im Anschluss dieser Arbeit genutzt um eine Potentialabschätzung von RPBs für flexible Prozesse durchzuführen [8]. Des Weiteren wurde als Industriebeispiel der Einsatz von modularen RPBs zur Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen und als Alternative zu Kolonnen für den Floating Methanol Prozess berechnet [8].

Literaturverzeichnis

- [1] Freund, H.; Sundmacher, K.: Process Intensification, 1. Fundamentals and Molecular Level, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (2011)
- [2] Ramshaw, C.; Mallinson R.H.; *US 4,283,255* (1981)
- [3] Onken, U.; Arlt, W.: Recommended test mixtures for distillation columns, *Institution of Chemical Engineers*, London (1990)
- [4] Olujic, Z.; Standardization of structured packing efficiency measurements, *Report Version 1* (2008)
- [5] Rao, D.; Bhowal, A.; Goswami, P.: Process Intensification in Rotating Packed Beds (HIGEE): An Appraisal, *Ind. Eng. Chem. Res.* **43** (2004), p. 1150–1162.
- [6] Lockett, M.: Flooding of rotating structured packing and its application to conventional packed columns, *Trans IChemE* (1995), p. 379–384.
- [7] Rajan, S.; Kumar, M.; Ansari, M.; Rao, D.; Kaistha, N.: Limiting Gas Liquid Flows and Mass Transfer in a Novel Rotating Packed Bed (HiGee), *Ind. Eng. Chem. Res.* **50** (2010), p. 986–997.
- [8] Sudhoff, D.; Leimbrink, M.; Schleinitz, M.; Górak, A.; Lutze, P.: Modelling, design and flexibility analysis of rotating packed beds for distillation, *Chem. Eng. Res. Design* **94** (2015), p. 72–89.
- [9] Lin, C. C.; Ho, T. J.; Liu, W. T.: Distillation in a rotating packed bed, *J. Chem. Eng. Jpn.* (2002), p. 1298–1304
- [10] Mondal, A.; Pramanik, A.; Bhowal, A.; Datta, S.: Distillation studies in rotating packed bed with split packing, *Chem. Eng. Res. Des.* **90** (2011), p. 453–457
- [11] Chu, G. W.; Gao, X.; Luo, Y.; Zou, H. K.; Shao, L.; Chen, J.: Distillation studies in a two-stage counter-current rotating packed bed, *Sep. Purif. Technol.* **102**, (2013), p. 62–66

Liste an Veröffentlichungen und Präsentationen im Rahmen dieser Arbeit

Sudhoff, D.; Leimbrink, M.; Schleinitz, M.; Górak, A.; Lutze, P.: Modelling, design and flexibility analysis of rotating packed beds for distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, **94**, 2015, 72–89.

Sudhoff, D.; Leimbrink, M.; Lutze, P.; Górak, A. Bestimmung der Trennleistung einer dreistufigen rotierenden Stoffaustauschmaschine für die Rektifikation, Präsentation beim Jahrestreffen der Fachgemeinschaft Fluidodynamik und Trenntechnik (2013), Würzburg, Deutschland.

Neumann, K.; Sudhoff, D.; Schleinitz, M.; Lutze, P.; Gorak, A.: Absorption von CO₂ in hochviskosen Medien, Präsentation auf der ProcessNet-Jahrestagung und 31. Jahrestagung der Biotechnologen (2014), Aachen, Deutschland.