

Modellierung und Analyse des instationären Verhaltens von Trennwandkolonnen mit kommerziellen Entwicklungswerkzeugen

G. Niggemann, G. Fieg
niggemann@tuhh.de, g.fieg@tuhh.de
TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich: Prozess- und Anlagentechnik
Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Roetzel zum 70. Geburtstag

Kurzfassung

Zur Regelung von Trennwandkolonnen wird der Einsatz einer dezentralen Prozessführungsstrategie vorgestellt. Basierend auf der theoretischen Gleichgewichtsstufe wurde ein Modell zur Beschreibung der instationären Vorgänge entwickelt. Zur Gewährleistung der geforderten Produktspezifikationen beim Auftreten von Störungen ist die Regelung des Prozesses unausweichlich. Für Störszenarien von praktischer Relevanz wurde das Systemverhalten bei geschlossenem Regelkreis untersucht.

1 Einleitung

In der chemischen Industrie werden überwiegend energieintensive Destillationsverfahren zur Trennung homogener Mehrkomponentengemische eingesetzt. Im Vergleich mit konventionellen Destillationsverfahren bietet der gezielte Einsatz von sogenannten Trennwandkolonnen Einsparpotenziale von bis zu 30% bei Investitions- und Betriebskosten [1]. Mit dieser innovativen und vielversprechenden Alternative lassen sich Mehrstoffgemische in lediglich einer Kolonne in Einzelfractionen mit hohen Reinheiten auftrennen. Für temperatursensitive Stoffen wird die thermische Belastung verringert, da lediglich einmal verdampft werden muss. Aufgrund des hohen Integrationsgrades von Trennwandkolonnen gehen Freiheitsgrade verloren, da im Vergleich mit konventioneller Kolonnenverschaltung nur ein Betriebsdruck gewählt werden kann. Die Fixierung auf einen Betriebsdruck resultiert in einer größeren Temperaturspanne zwischen Verdampfer- und Kondensatortemperatur und bedeutet letztlich eine größere Kolonnenbauhöhe [2].

Trennwandkolonnen sind seit mehr als 50 Jahren bekannt, werden aber trotz der genannten Einsparmöglichkeiten lediglich vereinzelt in der industriellen Praxis eingesetzt. Die größten Unsicherheiten betreffen dabei Vorhersagen zum instationären Verhalten, dessen detaillierte Kenntnis für eine sichere Prozessführung unerlässlich ist und gewährleistet sein muss.

2 Prinzip der Trennwandkolonne

Die Unterschiede zwischen Trennwand- und konventionellen Rektifikationskolonnen bestehen in der Konstruktion der Einbauten. Eine Trennwandkolonne besitzt im mittleren Bereich auf der Höhe von Zulauf- und Seitenabzugsstelle eine Längsunterteilung, die eine

Quervermischung von Dampf- und Flüssigkeitsströmen in diesem Bereich verhindert (Bild 1). Die Trennwand unterteilt die Kolonne im mittleren Bereich in einen Zulauf- und einen Seitenabzugsteil und ermöglicht, aus einer Rektifikationskolonne drei Fraktionen mit beliebiger Reinheit zu entnehmen.

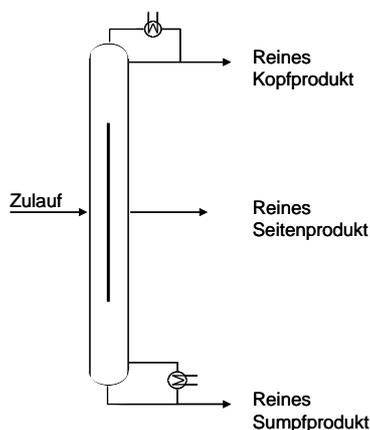


Bild 1: Schematische Darstellung einer Trennwandkolonne

Auf der Zulaufseite der Trennwand findet eine Vorfraktionierung des zu trennenden Mehrkomponentengemisches mit dem Ziel statt, dass am oberen Ende der Trennwand kein Schwersieder und am unteren Ende der Trennwand kein Leichtsieder mehr vorliegt. In den Trenneinheiten oberhalb und unterhalb der Trennwand werden dann quasi-binäre Fraktionen aufgetrennt. Die Fraktion des Mittelsieders gelangt sowohl am oberen als auch am unteren Ende der Trennwand vorbei vom Zulauf- in den Seitenabzugsteil.

3 Modellierung und Simulation im offenen Regelkreis

Die in diesem Beitrag durchgeführten Untersuchungen basieren auf Simulationen zum stationären und dynamischen Verhalten von Trennwandkolonnen. Dazu wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die physikalischen Vorgänge in einer Trennwandkolonne beschreibt. Bei der Analyse und Bewertung von Prozessführungskonzepten liegt der Fokus auf der dynamischen Antwort der Produktreinheiten für Änderungen im Prozess. Bei der Systemmodellierung wird ein Gleichgewichtsstufenmodell verwendet, wobei die Kolonne in einzelne Stufen diskretisiert wird. Für jede Stufe werden Massen-, Energiebilanzen und Gleichgewichtsbeziehungen formuliert. Dieses nichtlineare differential-algebraische Gleichungssystem wird in das kommerzielle Simulationswerkzeug Aspen Custom ModelerTM implementiert. Die entsprechenden Stoffeigenschaften werden über eine Schnittstelle von Aspen PropertiesTM eingebunden. Das in Bild 2 dargestellte Kolonnenmodell enthält sechs Trenneinheiten, einen Totkondensator mit einstellbarer Unterkühlung sowie einen Gleichgewichtsverdampfer.

Zunächst wird das entwickelte Modell für den stationären Betriebspunkt validiert. Dazu stehen experimentelle Daten aus der Literatur zur Verfügung [3]. Der Vergleich zeigt

gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis hinsichtlich der Reinheiten der Schlüsselkomponenten in den Produktströmen (Bild 3).

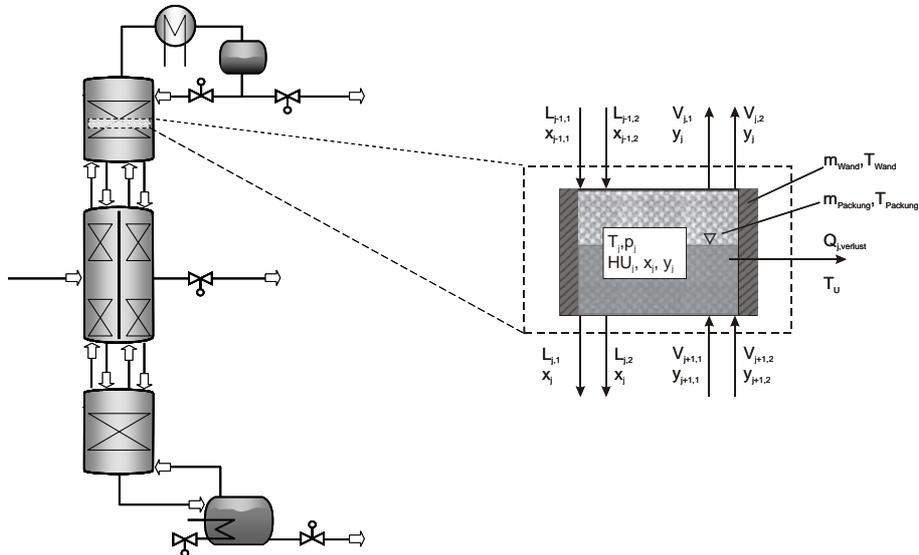


Bild 2: Stufenmodell zur Simulation der Trennwandkolonne

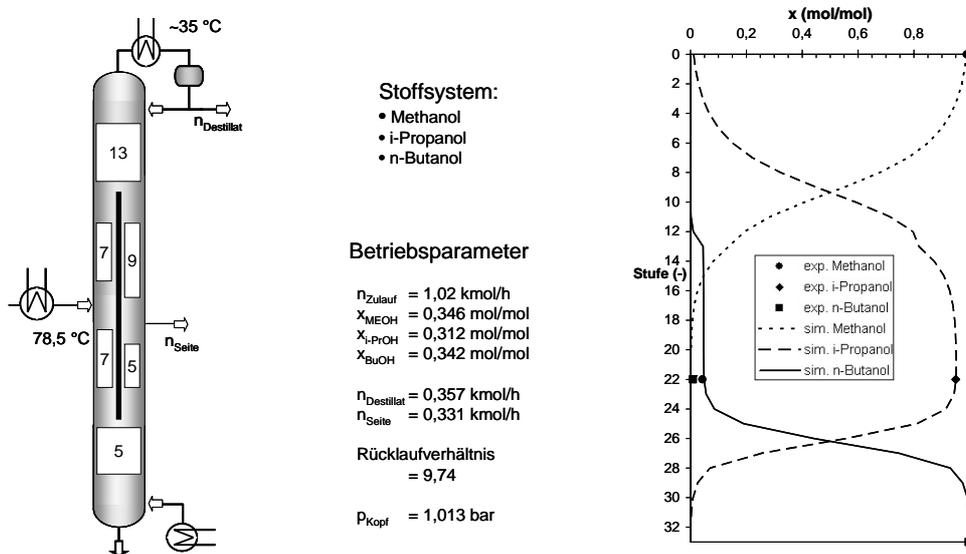


Bild 3: Modellvalidierung mit experimentellen Daten

In der zweiten Phase wird das instationäre Systemverhalten näher untersucht. Hierzu wird ein mehrkomponentiges Fettalkoholgemisch von industrieller Relevanz, bestehend aus Hexanol, Oktanol und Dekanol, vertieft analysiert. Ziel der Trennung ist die

Herstellung von Produkten mit sehr hohen Reinheitsanforderungen von 99 Mas.-% (Bild 4).

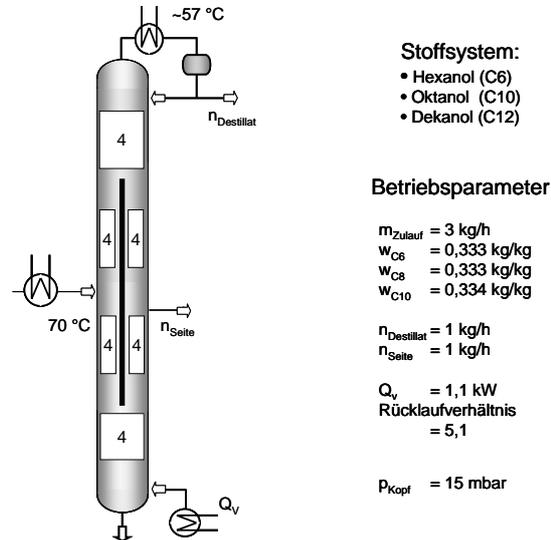


Bild 4: Stationärer Betriebszustand als Basis für Untersuchungen zum Störverhalten

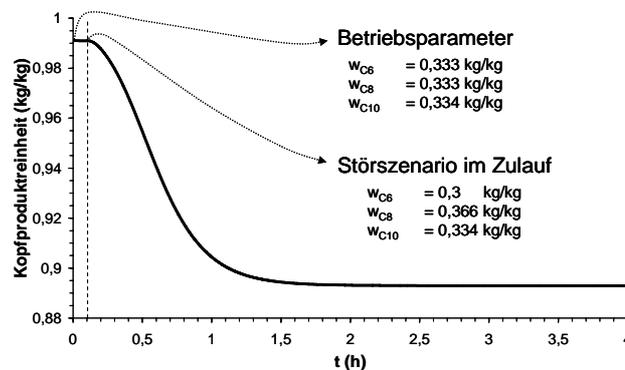


Bild 5: Zeitlicher Konzentrationsverlauf des Hexanols bei sprunghafter Störung der Zulaufstromzusammensetzung nach 0,1 h

Für diese Systemkonfiguration ist das Störverhalten untersucht worden. Dazu wird die Zusammensetzung im Zulaufstrom zum Zeitpunkt $t = 0,1 \text{ h}$ sprunghaft verändert (Bild 5), wobei die Konzentrationen von Oktanol angehoben und die des Hexanols abgesenkt wird.

Der zeitliche Konzentrationsverlauf ist stellvertretend nur für Hexanol im Kopfprodukt in Bild 5 dargestellt. Die Produktreinheit fällt deutlich unter den vom Kunden vorgegebenen Sollwert von 99 %. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Regelung der Produktkonzentrationen, um bei Störungen im Prozess die geforderten

Spezifikationen einzuhalten. Auf die Entwicklung einer Regelungsstruktur und die erzielten Ergebnisse soll im Folgenden näher eingegangen werden.

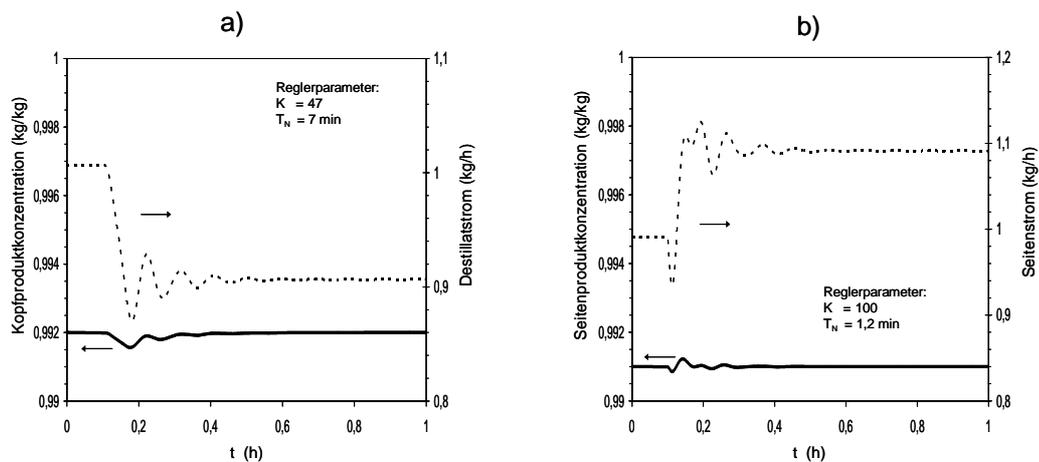
4 Dynamisches Verhalten im geschlossenen Regelkreis

Trennwandkolonnen sind komplexe Mehrgrößensysteme mit mehreren sich gegenseitig beeinflussenden Ein- und Ausgangsgrößen. Um die Regelungsstruktur überschaubar zu halten, erfolgt die Einteilung in Subsysteme.

Zur Regelung der Produktkonzentrationen der Schlüsselkomponenten in den drei Produktströmen stehen mit Destillat-, Seitenstrom und Verdampferleistung drei Stellgrößen zur Verfügung. Die Lösung dieses 3x3 Systems kann entweder durch einen Mehrgrößenregler oder aber mit Hilfe einer dezentralen Regelung erfolgen.

Bei dezentraler Regelung ist jeder Stellgröße exakt eine Regelgröße zugeordnet. Die zwischen den einzelnen Regelgrößen aufgrund der Kopplung über Stoffströme innerhalb der Kolonne auftretenden Wechselwirkungen werden allerdings nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zu Mehrgrößenreglern weisen sie demnach häufig eine geringere Regelgüte auf. In der industriellen Praxis werden überwiegend dezentrale Regler eingesetzt, wobei die Vorteile gegenüber Mehrgrößenregelungen in ihrer einfachen Struktur begründet sind. Beim Ausfall einzelner Sensoren oder Stellglieder bleibt die Funktionstüchtigkeit der übrigen Regelkreise erhalten. An der hier betrachteten Trennwandkolonne wird der Einsatz einer dezentralen Regelung erprobt.

Neben den geforderten Produktqualitäten müssen für den sicheren Betrieb einer kontinuierlichen Rektifikationskolonne auch die erforderlichen Füllstandsregelungen vorgenommen werden. Sinnvollerweise wird dem Füllstand im Kolonnensumpf als Stellgröße der Sumpfmassenstrom zugeordnet, um bei Stoffstromschwankungen im System schnellstmöglich einen konstanten Füllstand zu gewährleisten. Zur Regelung des Füllstandes im Destillatbehälter bietet sich aufgrund des Rücklaufverhältnisses der Rücklaufstrom am Kolonnenkopf an. Die letzten zwei verbleibenden Stellgrößen, der Dampfsplit am unteren Ende der Trennwand und der Flüssigkeitssplit am oberen Ende der Trennwand, verteilen Dampf und Flüssigkeit zu gleichen Teilen auf Zulauf- und Entnahmeseite der Trennwand.



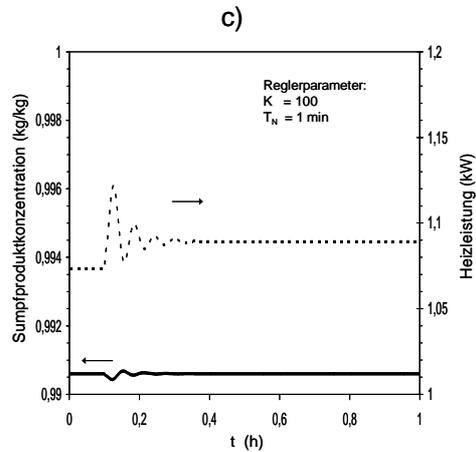


Bild 5a)-c): Zeitlicher Verlauf von Stell- und Regelgrößen für die DSV-Regelungsstruktur bei sprunghafter Störung im Zulaufstrom nach 0,1 h

Als Regelungsstruktur wird die DSV-Regelung angewandt. Dabei wird der Kopfkonzentration der Destillatmassenstrom, der Seitenproduktkonzentration der Seitenmassenstrom und der Sumpfproduktkonzentration als Stellgröße die Heizleistung zugeordnet. Als Regler werden in allen Regelkreisen PI-Regler eingesetzt, die mithilfe der Tyreus-Luyben Methode parametrieren worden sind [4].

Bei der Betrachtung des dynamischen Verhaltens zeigt sich bei geschlossenen Regelkreisen, dass die Störungen nach ca 30 min ausgeglichen (Bild 5) und die Produktspezifikationen von 99 Mas.-% eingehalten werden.

5 Zusammenfassung

Es wird der Einsatz einer dezentralen Prozessführungsstrategie zur Regelung von Trennwandkolonnen vorgestellt. Zunächst wird ein mathematisch-physikalisches Modell entwickelt, das basierend auf der theoretischen Gleichgewichtsstufe das dynamische Verhalten beschreibt. Um bei Störungen im Zulauf die geforderten Spezifikationen einzuhalten, muss der Prozess geregelt werden. Das Auftreten praktisch relevanter Störszenarien wird für den Fall des geschlossenen Regelkreises untersucht. Dieser Beitrag ist der Startpunkt für eingehende Analysen zur Mehrgrößenregelung und liefert gleichzeitig wichtige Erkenntnisse für anstehende, experimentelle Untersuchungen.

6 Literatur

- [1] Kaibel, G.: IChemE Symposium Series, 109, 1988, S. 43-59.
- [2] Kaibel, G. et. al.: Chem. Ing. Tech, 76(3), 2004, S. 258-263.
- [3] Abdul Mutalib, M.I.: Trans. IChemE, Part A, 76, 1998, S. 319-334.
- [4] Tyreus, B.D., Luyben, W.L.: I&EC Research, 31, 1992, S. 2625