

Chimia 49 (1995) 309–311
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
 ISSN 0009–4293

Kombi-Verdampferanlage zur Ausbildung von Chemiker/-innen und Ingenieur/-innen an der Ingenieurschule beider Basel

Men F. Barblan^{a)}* und Fred Steinegger^{b)}

Abstract. A pilot evaporation plant designed and built to train future chemists and process engineers at the Basle State Institute of Technology, Switzerland, is presented and first experiences from running it are discussed.

1. Ausbildungskonzept

Das Verfahrenstechnik-Zentrum (VTZ) der Ingenieurschule beider Basel (IBB) ist ein Gemeinschaftswerk der Abteilungen Chemie und Maschinenbau und umfasst unter anderem verfahrenstechnische Anlagen in kleintechnischem Massstab, die der Ausbildung von Studierenden beider Abteilungen dienen (vgl. [1]). Im Rahmen von Laborübungen sowie Semester- und Diplomarbeiten wird den Studierenden dort Gelegenheit gegeben, sowohl das im Unterricht erlernte theoretische Wissen in die Praxis umzusetzen als auch den Umgang mit Anlagen dieser Grössenordnung zu erproben. Das Spektrum der Tätigkeiten reicht dabei vom Erstellen des Versuchskonzeptes, inklusive Vorabschätzungen mittels Gleichgewichtsdaten, Massen- und Energiebilanzen, über die Aufnahme, Auswertung und Interpretation der Messwerte, bis zur Präsentation der Resultate vor Mitstudierenden.

Obwohl beide Abteilungen dieselben Anlagen benutzen, ist das Ausbildungsschwergewicht zum Teil unterschiedlich. Bei den Chemiestudenten/-innen, als potentielle zukünftige Betriebsleiter, steht naturgemäss der Umgang mit der Anlage selbst, das Vorausplanen der Trennaufgabe (Produktqualität, Zeit- und Energiebedarf) und das Überprüfen von Herstellerspezifikationen im Vordergrund. Im Gegensatz dazu werden Verfahrenstechniker später eher anlagenplanerische Aufgaben übernehmen. Dies beinhaltet das Erfassen der relevanten Vorgänge, um damit Berechnungsmodelle realistisch beurteilen zu können, ferner das Ermitteln von anlagen- und produktbezogenen Berechnungsdaten für Anlagenkomponenten, die Er-

probung von unterschiedlichen Regelstrategien und – nicht zuletzt – die Förderung des Verständnisses für die Bedürfnisse der Anlagenbetreiber.

2. Anlagenkonzept

Aufgabenstellung: eine Verdampferanlage zu bauen, an der sowohl angehende Chemiker/-innen als auch Studierende der Abteilung Maschinenbau, Fachrichtung Verfahrenstechnik, praxisorientiert ausgebildet werden können.

Dabei gilt es, folgenden Gesichtspunkten besonders Rechnung zu tragen:

- ein Grundkonzept, das es ermöglicht, die Versuche bezüglich Trennaufgabe, Stoffwahl, Mess- und Regelstrategien möglichst vielfältig zu gestalten
- Wahrnehmung von Ausbildungsgelegenheiten im Anlagenbau durch möglichst frühen Einbezug der Studierenden
- Minimierung der Engineering-Kosten durch Ausnutzung der schuleigenen Bearbeitungskapazitäten auf allen Ebenen (Dozenten, Assistenten, Studierende)
- optimale Nutzung des knappen Platzangebotes.

Für die kontinuierliche Eindampfung von Flüssigkeiten sind, je nach Eigenschaften der einzudampfenden Lösung, unterschiedliche Verdampfertypen vorteilhaft. Hauptkriterium bei der Verdampferauswahl ist, neben einer optimalen Wärmeübertragung, oftmals auch eine schonende Produktbehandlung oder die Vermeidung von Ablagerungen auf der Verdampferfläche. Um den Studierenden eine

breite Palette von unterschiedlichen Verdampfungsverfahren anbieten zu können, beabsichtigte man anfangs je einen Umlauf-, einen Fallfilm- und einen Entspannungsverdampfer in dieselbe Anlage zu integrieren. Aus Platzgründen musste aber leider auf den Umlaufverdampfer verzichtet werden.

Bei der Planung wurden vor allem zwei Verdampfungsaufgaben ins Auge gefasst:

- die Aufkonzentrierung eines gelösten Feststoffes
- die Trennung eines binären Gemisches aus flüchtigen Komponenten.

Letztere Aufgabe beinhaltet die Verwendung zumindest eines organischen Stoffes und bedingt daher – von chlorierten Lösungsmitteln abgesehen – eine Anlage in explosionsgeschützter Bauweise.

Ferner wurde die Anlage so konzipiert, dass – unabhängig vom Verdampfertyp – mit geringen Lösungsmittelmengen beliebig lange experimentiert werden kann, indem die Anlage im Kreislaufbetrieb gefahren wird.

Zusätzlich ist auch ein Betrieb unter Vakuum oder mit einem zusätzlich eingebauten Dephlegmator (Teilkondensator) möglich.

3. Das Projekt

Die Planung der Anlage erfolgte durch eine Zusammenarbeit der im VTZ zusammengeschlossenen Dozenten und der VTZ-Mitarbeiter unter Beizug eines Engineeringbüros für Mess- und Regeltechnik. Die Montage wurde zum Teil in eigener Regie ausgeführt. Studierende konnten erst in der Inbetriebnahmephase einen nennenswerten Beitrag leisten: die mechanische Funktionskontrolle und die Inbetriebnahme wurde im Rahmen einer Semester- und anschliessenden Diplomarbeit durch Studierende der Abteilung Maschinenbau durchgeführt. Dies erwies sich für die Studierenden als arbeitsintensive, aber auch sehr interessante und lehrreiche Tätigkeit. Nach Durchführung einiger kleinerer Änderungen an der Anlage, befassten sie sich

*Korrespondenz:

^{a)} Dr. M.F. Barblan

Leiter Verfahrenstechnik-Zentrum und Dozent für Verfahrens- und Reaktionstechnik an der Abteilung Chemie Ingenieurschule beider Basel
 Gründenstrasse 40
 CH-4132 Muttenz

^{b)} Prof. F. Steinegger

Dozent für Verfahrenstechnik an der Abteilung Maschinenbau der IBB

hauptsächlich mit den unterschiedlichen Regelstrategien, die sich erwartungsgemäss als zum Teil recht problematisch erwiesen, denn man wollte absichtlich nicht nur Bewährtes vorsehen.

Folgende Erfahrungen aus der Inbetriebnahme und den bisher durchgeführten Laborübungen sind erwähnenswert:

- Beim Betrieb der Anlage mit Sumpfrückführung (Bypass) zeigte sich, dass infolge der hohen Temperatur des, aus energetischen Gründen ungekühlten Bypass-Stromes, bei grosser Aufkonzentration des Gemisches die Pumpe plötzlich kavitiert. Trotz selbstansaugender Pumpe P1 wird das Gaspolster beim Betrieb des Entspannungsverdampfers nicht weggefördert, da der Gemisch-Überdruck PIC 4 der Förderung entgegenwirkt. Abhilfe bringt nur das Entlasten der Pumpendruckseite. Lösungsansatz: Aufkonzentrierungsgrad begrenzen oder Absenken der Temperatur des Bypass-Stromes durch einen zusätzlichen Kühler.
- Trotz korrekter Entlüftung des Sumpfrieselkühlers W4 gelang es nicht, dessen Auslaufstrom FIC 8 konstant zu halten, was zu Problemen beim Betrieb mit Sumpf-Bypass führte. Lösungsansatz: nicht den Entnahmestrom, sondern den Bypass-Strom als Regelgrösse benutzen.

- Die Regelcharakteristik der Führungsregler musste aus Stabilitätsgründen generell relativ träge eingestellt werden. Der Sollwert (z.B. von DIC 7 in Fig. 1) darf deshalb nur in kleinen Stufen verändert werden. Lösungsansatz: Einbau einer Sollwertrampe für die Führungsregler.
- Bei der Betriebsvariante *Entspannungsverdampfer* (Fig. 1) ist die Druckregelung PIC 4 über den Feed-Strom mit der Durchflussregelung FIC 2 gekoppelt. Zur Vermeidung einer Instabilität, dürfen grössere Sollwertänderungen nur stufenweise vorgenommen werden. Lösungsansatz: Sollwertrampen.
- Bei der Betriebsvariante *Fallfilmverdampfer* (Fig. 2) wird der Wärmetauscher W1 als Feed-Vorwärmer verwendet. Wird ein leichtsiedendes Gemisch vorgewärmt, so liegt die erforderliche Heiztemperatur meist deutlich unter 100°, d.h. es stellt sich ein Heizdampfdruck unter 1 bar ein, was zur Folge hat, dass das Kondensat nicht mehr abläuft. Problemlösung: Vakuumpumpe in Kondensatleitung einbauen oder frei belüfteter Kondensatablauf ohne Kondensatabscheider.

Aus Zeitgründen konnten noch nicht alle oben erwähnten Lösungsansätze realisiert werden. Das Konzept der Anlage –

mit ihren vielfältigen Möglichkeiten – hat sich jedoch trotzdem im Praktikumsbetrieb bereits bestens bewährt.

4. Regelkonzept

Der praktische Ausführungsrahmen der mess- und regeltechnischen Einrichtungen war von den bestehenden Anlagen her zur Zeit der Projektbearbeitung gegeben: ein Vor-Ort-Panel mit Flüssigkristall-Anzeige, ein Prozessrechner im Nicht-Ex-Bereich, Datenerfassung und Trend-Darstellung mittels PC.

Das Regelkonzept beinhaltet sowohl die Möglichkeit, die Anlage mit einem Minimum an sehr einfachen unvermaschten Regelkreisen zu betreiben, als auch unter verschiedenen komplexen Regelstrategien zu wählen. Auf eine Eindampfverhältnis-Regelung auf Durchflussbasis (Destillat/Feed) wurde verzichtet.

Beim 'flash'- bzw. *Entspannungsverdampfer* (Fig. 1) wird die Lösung unter Druck erwärmt und anschliessend in einem Abscheider unter Verdampfen entspannt. Dieser Verdampfer ist speziell geeignet für feststoffhaltige Lösungen, welche zur Verkrustung der Verdampferoberflächen neigen.

Für den 'flash'-Verdampfer wurden drei unterschiedliche Regelkonzepte vor-

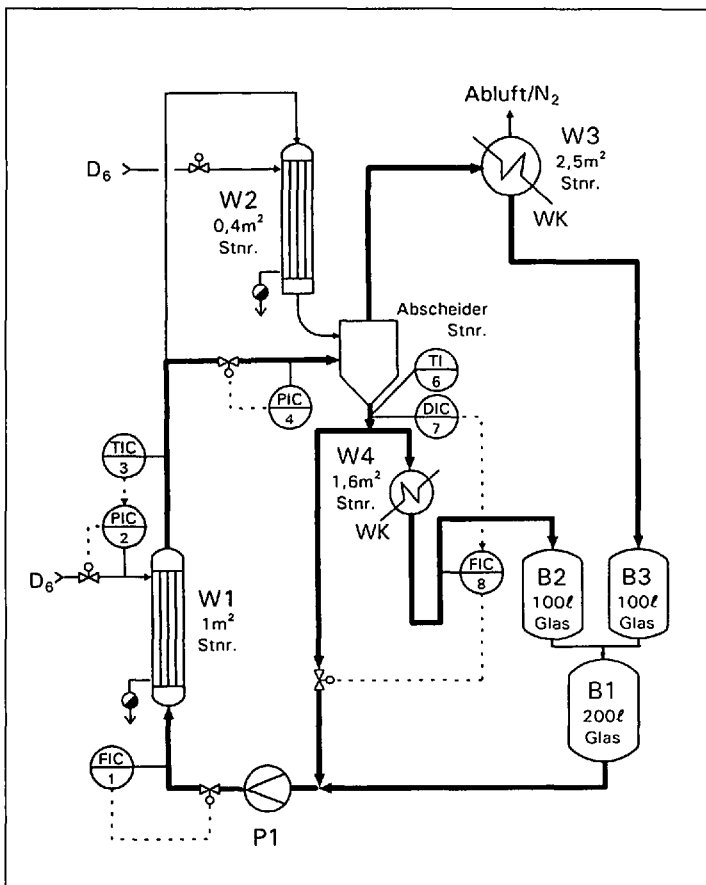


Fig. 1. Entspannungsverdampfer (Regelvariante 1.2)

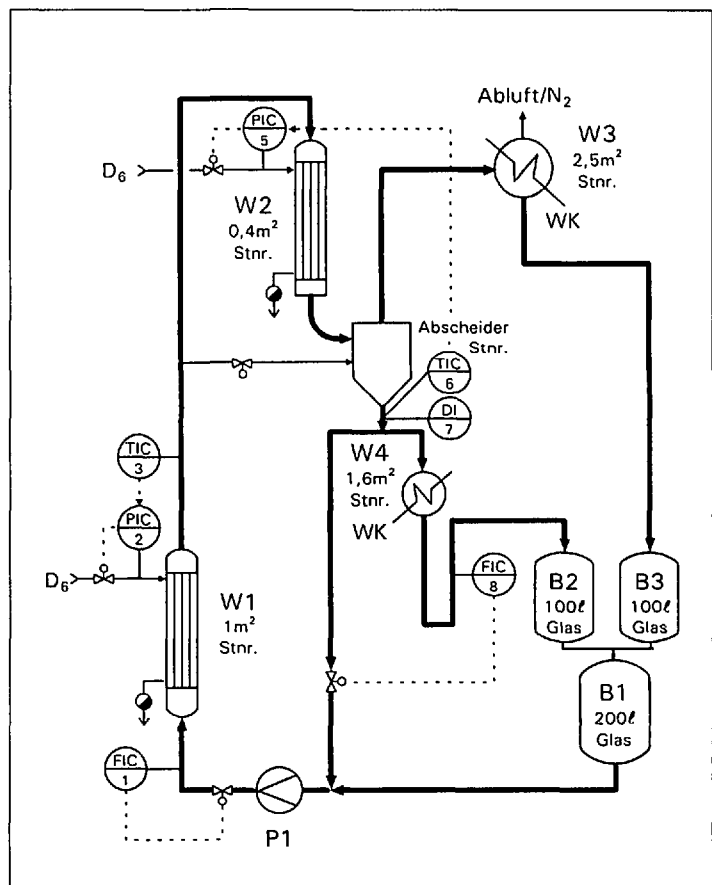


Fig. 2. Fallfilmverdampfer (Regelvariante 5.1)

Tab. 1. Übersichtstabelle Regelvarianten Entspannungsverdampfer

Varianten	Regelgrösse	Regelkreis	Hilfsregelgrösse	Regelkreis	Eingriff auf:
Basis-Regelung für alle Varianten:	Feedstrom	FIC 1	—————>		Feed-Ventil
	Feed-Überdruck	PIC 4	—————>		Druckhalte-Ventil
1.	Feed-Temperatur	TIC 3	—> Heizdampfdruck	PIC 2 —>	Heizdampf-Ventil
1.1 (mit Bypass)	Sumpf-Temperatur	TIC 6	—> Sumpf-Entnahme	FIC 8 —>	Bypass-Ventil
1.2 (mit Bypass)	Sumpf-Dichte	DIC 7	—> Sumpf-Entnahme	FIC 8 —>	Bypass-Ventil
2.	Sumpf-Temperatur	TIC 6	—> Heizdampfdruck	PIC 2 —>	Heizdampf-Ventil
2.1 (mit Bypass)	Sumpf-Entnahme	FIC 8	—————>		Bypass-Ventil
3.	Sumpf-Dichte	DIC 7	—> Heizdampfdruck	PIC 2 —>	Heizdampf-Ventil
3.1 (mit Bypass)	Sumpf-Entnahme	FIC 8	—————>		Bypass-Ventil

Tab. 2. Übersichtstabelle Regelvarianten Fallfilmverdampfer

Varianten	Regelgrösse	Regelkreis	Hilfsregelgrösse	Regelkreis	Eingriff auf:
Basis-Regelung für alle Varianten:	Feedstrom	FIC 1	—————>		Feed-Ventil
	Feed-Temperatur	TIC 3	—> Heizdampfdruck	PIC 2 —>	Heizdampf-Ventil
4.	Heizdampfdruck	PIC 5	—————>		Heizdampf-Ventil
4.1 (mit Bypass)	Sumpf-Temperatur	TIC 6	—> Sumpf-Entnahme	FIC 8 —>	Bypass-Ventil
4.2 (mit Bypass)	Sumpf-Dichte	DIC 7	—> Sumpf-Entnahme	FIC 8 —>	Bypass-Ventil
5.	Sumpf-Temperatur	TIC 6	—> Heizdampfdruck	PIC 5 —>	Heizdampf-Ventil
5.1 (mit Bypass)	Sumpf-Entnahme	FIC 8	—————>		Bypass-Ventil
6.	Sumpf-Dichte	DIC 7	—> Heizdampfdruck	PIC 5 —>	Heizdampf-Ventil
6.1 (mit Bypass)	Sumpf-Entnahme	FIC 8	—————>		Bypass-Ventil

gesehen. Allen Regelvarianten gemeinsam ist die Vorwahl des Feed-Massenstroms FIC 1 und des Gemisch-Überdrucks PIC 4 (s. Fig. 1 und Tab. 1).

Bei Regelvariante 1 wird die Gemischtemperatur TIC 3 vorgewählt und dem Heizdampfdruck PIC 2 als Führungsgrösse aufgeschaltet. Der Aufkonzentrierungsgrad der Lösung kann mittels des Sollwertes von Gemischtemperatur TIC 3 gesteuert werden. Die maximale Aufkonzentrierung wird begrenzt durch den Gemisch-Siedepunkt beim maximalen Gemisch-Überdruck PIC 4. Soll eine Anreicherung über diese physikalische Gegebenheit hinaus erzielt werden, kann durch Reduktion des Sumpf-Entnahmestroms FIC 8 ein Teilstrom des Sumpfproduktes im Bypass geführt und dadurch eine Feed-Vorkonzentrierung erzielt werden. Indem die Sumpftemperatur TIC 6 (Variante 1.1) bzw. die Sumpfdichte DIC 7 (Variante 1.2) dem Sumpf-Entnahmestrom FIC 8 als Führungsgrösse aufgeschaltet wird, kann, unabhängig von allfälligen Schwankungen der Feed-Konzentration, eine konstante Sumpf-Zusammensetzung erzielt werden.

Eine alternative Möglichkeit zur Erzielung einer konstanten Sumpf-Zusam-

ensetzung besteht darin, die Sumpftemperatur TIC 6 (Variante 2) oder die Sumpfdichte DIC 7 (Variante 3) dem Heizdampfdruck PIC 2 als Führungsgrösse aufzuschalten. Wahlweise kann zusätzlich, durch Begrenzung des Sumpf-Entnahmestroms FIC 8, ein Teilstrom des Sumpfproduktes im Bypass geführt werden (Varianten 2.1 und 3.1).

Der **Fallfilm- bzw. Fallstromverdampfer** (Fig. 2) ist für die Aufkonzentrierung temperaturempfindlicher, niederviskoser Flüssigkeitsgemische bestens geeignet. Bei dieser Betriebsvariante dient der Entspannungsverdampfer W1 als Wärmeaustauscher für das Vorwärmen der Lösung.

Analog zum 'flash'-Verdampfer wurden auch für den Fallfilmverdampfer drei unterschiedliche Regelkonzepte vorgesehen. Allen Konzepten gemeinsam ist die Vorwahl des Feed-Massenstroms FIC 1 und der Feed-Temperatur TIC 3, welche dem Heizdampfdruck PIC 2 als Führungsgrösse aufgeschaltet wird (s. Fig. 2 und Tab. 2).

Bei der Regelvariante 4 wird der Eindampfungsgrad durch die Wahl des Verdampfer-Heizdampfdrucks PIC 5 bestimmt. Durch teilweise Bypass-Führung des Sumpfproduktes kann eine Aufkon-

zentrierung der Lösung über den maximalen Heizdampfdruck hinaus erzielt werden. Wird die Sumpftemperatur TIC 6 (Variante 4.1) bzw. die Sumpfdichte DIC 7 (Variante 4.2) dem Sumpf-Entnahmestrom FIC 8 als Führungsgrösse aufgeschaltet, kann eine Feed-Vorkonzentrierung erreicht und damit, unabhängig von allfälligen Schwankungen der Feed-Konzentration, eine konstante Sumpf-Zusammensetzung erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzielung einer konstanten Sumpf-Zusammensetzung besteht darin, die Sumpftemperatur TIC 6 (Variante 5) oder die Sumpfdichte DIC 7 (Variante 6) dem Heizdampfdruck PIC 5 als Führungsgrösse aufzuschalten. Wahlweise kann zusätzlich, durch Begrenzung des Sumpf-Entnahmestroms FIC 8, ein Teilstrom des Sumpfproduktes im Bypass geführt werden (Varianten 5.1 und 6.1).

Dank gebührt den Herren *D. Mollet* für die Bauleitung und *H. Briellmann* für die Montage der Anlage.

Eingegangen am 30. Juni 1995

[1] M.F. Barblan, E. Hungerbühler, *Chimia* 1994, 48, 524.