



**SIMULATION VON ENTLASTUNGSVORGÄNGEN AN  
REKTIFIKATIONSKOLONNEN**

Abschlussbericht

Daniel Staak, Günter Wozny

Kennziffer: 2665

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>2</b>
<b>4 Dynamische Modellierung</b>	<b>3</b>
<b>5 Modellvalidierung</b>	<b>7</b>
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>7 Eigene Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojekts</b>	<b>9</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>Literatur</b>	<b>10</b>

# 1 Abstract

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein vollständig dynamisches Simulationsmodell zur Beschreibung von Druckentlastungen infolge einer Betriebsstörung an Rektifikationskolonnen entwickelt und in gProms® implementiert. Das Modell wurde an einer Versuchsanlage erfolgreich validiert. Mit Hilfe des erstellten Modells ist es möglich Fehlfunktionen die eine Druckentlastung provozieren detailliert zu analysieren und die Erarbeitung von geeigneter Schutzmaßnahmen (z.B. die Auslegung von Sicherheitsventilen) effizienter zu gestalten.

# 2 Einleitung

Die Rektifikation zur thermischen Stofftrennung besitzt in der chemischen Industrie eine herausragende Bedeutung. [HUMPHREY 1995] schätzt die Anzahl der allein in den USA installierten Rektifikationskolonnen auf 40.000 mit einer Gesamtinvestitionssumme von über 8 Mrd. US \$. Aufgrund des meist großen Stoffinhalts, der häufig aus brennbaren und/oder toxischen Flüssigkeiten oder Dämpfen besteht, besitzen Rektifikationskolonnen ein hohes Gefahrenpotential. Zusätzlich befindet sich der Inhalt im Siedzustand, was bei einer Änderung des Energieeintrags zu starker Verdampfung oder Kondensation und damit zu starken Druckschwankungen führen kann. Der Ausfall einzelner Anlagenkomponenten kann so schnell zu einem Verlassen des bestimmungsgemäßen Betriebsbereichs führen und letztendlich sogar eine Notentlastung oder Notabschaltung erforderlich machen. Es stehen sich hier jedoch zwei Interessen gegenüber: Zum einen muss der Behälter sicher gegen unzulässigen Überdruck abgesichert werden, um ein Bersten und damit den „Worst Case“ unbedingt zu vermeiden, was einer Abführung eines möglichst großen Massenstrom entsprechen würde. Zum anderen sollte der abzuführende Massenstrom aber so klein wie möglich sein, um die Belastung für Mensch und Natur gering zu halten. In jüngster Zeit kommen daher bei der Vermeidung unzulässiger Überdrücke häufig PLT (Prozessleittechnik)- Schutzeinrichtungen zum Einsatz. Das Vorgehen wird in den nationalen und internationalen Normen DIN EN 61508, DIN EN 61511 und VDI/VDE 2180 geregelt [NETTER 2003]. Trotzdem ist die Installation von Druckentlastungseinrichtungen an Druckbehältern Industriestandard. Da wenig Detailwissen über die Dynamik des Entlastungsvorgangs existiert, erfolgt die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen bis zum heutigen Zeitpunkt meist nach Heuristiken oder Short-Cut-Methoden. Die Auslegung erfolgt dabei meist nach Richtlinien des AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE [API 2000]. Ebenfalls häufig verwendete Methoden sind die Anpassung der Entlastungskapazität an die Verdampferleistung oder den Brüdenstrom [CASSATA und DASGUPTA 1993]. Diese Methoden liefern schnell Ergebnisse, besitzen aber in ihrer Anwendbarkeit und Genauigkeit entscheidende Begrenzungen, da die Fluidodynamik innerhalb der Kolonne nicht berücksichtigt wird. Alternativ erfolgt die Auslegung von Entlastungseinrichtungen mit Hilfe von stark vereinfachten Simulationsrechnungen. Als Beispiel sei hier die Simulation eines Druckbehälters genannt. Auf Grund der starken Reduzierung des Modells gehen jedoch wertvolle Informationen verloren.

Die Forschungsarbeit ist in zwei Teile gegliedert. Da wenig experimentelle Daten über die Dynamik von Kolonnen im nichtbestimmungsgemäßen Betrieb veröffentlicht wurden, werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um ein tieferes Prozessverständnis zu entwickeln und die Auswirkung der jeweiligen Einflussgröße auf die Dynamik abschätzen zu können. Erste Schlussfolgerungen können bereits auf Basis dieser qualitativen Untersuchungen getroffen werden. Als besonders relevant erkannte Störszenarien werden experimentell nachgestellt und zur Modellvalidierung verwendet. Die Entwicklung eines geeigneten Simulationsmodells steht im Vordergrund der theoretischen Arbeiten. Die dynamische Prozesssimulation ermöglicht ein vertieftes Prozessverständnis und damit eine bessere Risikoabschätzung, womit der Grundstein für die Erarbeitung effizienter Sicherheitskonzepte gelegt ist.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentelle Modellvalidierung wurde eine Versuchsanlage im Pilotmaßstab verwendet. Eine möglichst große Übereinstimmung mit existierenden Prozessen und gute Übertragbarkeit auf industrielle Anlagen sind die Zielsetzungen bei der Auswahl des Anlagendesigns. Die verwendete Anlage im Technikummaßstab besitzt einen Durchmesser von 100mm und eine Höhe von ca. 4m. Bei solchen Dimensionen ist das Verhalten auf reale Anlagen übertragbar. Nach [EIDEN et al. 1995] ist weiterhin auf die Realisierung minimaler Wärmeverluste, Einhaltung üblicher Bauhöhen, Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten und die Auswahl gängiger Einbauten zu achten. Die wichtigsten Anlagendetails sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Kolonnenparameter

Durchmesser:	100 mm
Höhe:	4 m
Einbauten	16 Siebböden
Verdampferleistung	30 kW

Das Druck- und Temperaturprofil wird zeitabhängig über die Höhe der Anlage gemessen. Der Kolonnenkopf inklusive Sicherheitsventil ist eine Spezialkonstruktion. Die Montagevorrichtung des Sicherheitsventils wurde so gestaltet, dass ein einfacher Wechsel möglich ist, um verschiedene Ventilcharakteristiken und Ventilquerschnitte experimentell zu analysieren. Ein Fließbild der Anlage ist Abbildung 3.1 gezeigt.

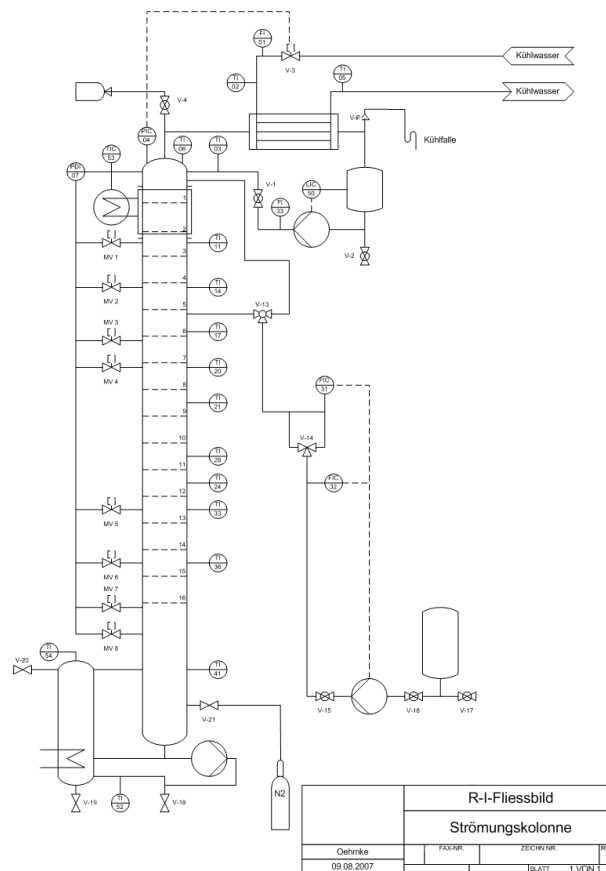


Abbildung 3.1: Fließbild Versuchsanlage

Da wenig über die Dynamik von Rektifikationskolonnen vor, während und nach einer Druckentlastung bekannt ist, wurden zunächst umfangreiche „Screening“-Experimente durchgeführt. Basierend auf diesen Experimenten können bereits erste qualitative Aussagen getroffen werden:

- **Schwerwiegendster Anlagenfehler:** Die verschiedenen Ursachen für einen ungewollten Druckanstieg werden ausführlich von [KISTER 1990] erörtert. Eigene experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass als einzelner Fehler der **Ausfall des Kondensators** den Druck in der Anlage am schnellsten steigen lässt.
- **Einfluss der Entlastungseinrichtung:** Der Durchmesser der Entlastungseinrichtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Fluidodynamik und den Druckverlauf in der Anlage. Überdimensionierte Durchmesser provozieren einen großen Differenzdruck über die Anlage, die Belastungen für Einbauten werden dadurch erhöht. Durch das verstärkte Entrainment wird die Wahrscheinlichkeit einer zweiphasigen Entlastung gesteigert. Zweiphasige Entlastungen sind jedoch möglichst zu vermeiden, da der Volumenstrom und damit die Druckreduzierung verringert wird, gleichzeitig wird der Massenstrom gesteigert, was eine Kapazitätserhöhung für nachfolgende Apparate zur Folge hat. Unterdimensionierte Entlastungseinrichtungen sind nicht in der Lage den Anlagendruck zu reduzieren. Ein weiterer Druckanstieg ist die Folge. Der zeitliche Verlauf des Öffnungs- und Schließvorgangs beeinflusst ebenfalls stark die Dynamik.
- **Belastungen für Kolonneneinbauten:** Die Belastungen auf Kolonneneinbauten wurden mit Hilfe der im Antrag beschriebenen Messtechnik basierend auf Dehnungsmessstreifen direkt während der Druckentlastungen gemessen. Bei stark überdimensionierten Sicherheitsventilen können Belastungen entstehen, welche die Auslegungsgrenze nach [ELLINGSEN 1988] und [SHIVELER 1995] übersteigen. Es hat sich gezeigt, dass eine Differenzdruckmessung kein zuverlässiger Indikator für die tatsächlich auf den Boden wirkende Belastung ist.
- **Alternativkonzept Verdampferabschaltung** Die Annahme, dass eine Unterbrechung der Energiezufuhr einen weiteren Druckanstieg verhindert trifft nicht immer zu. Eigene experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass auf Grund des Rückflusses des Leicht sieders aus dem Kopf der Anlage und der erneuten Verdampfung nach dem Zusammentreffen mit dem wärmeren Schwersieder im Sumpf, der Druck in der Anlage über den Druck zum Zeitpunkt der Verdampferabschaltung ansteigen kann. Wie groß der Anstieg ist, hängt dabei von dem Verhältnis der Siedetemperaturen, der Verdampfungsenthalpien und der Wärmekapazitäten der beteiligten Stoffe ab. Weiterhin hat die Rücklaufdynamik einen starken Einfluss.

## 4 Dynamische Modellierung

Die dynamische Prozesssimulation ermöglicht eine detaillierte Betrachtung und damit eine bessere Risikoabschätzung nach Betriebsstörungen und Fehlfunktionen, womit der Grundstein für die Erarbeitung effizienter Sicherheitskonzepte gelegt ist. Die Einflüsse verschiedener Betriebsparameter wie Stoffsystem, Temperatur und Druck auf den Entlastungsbedarf können untersucht werden. Die Auswirkungen verschiedener Entlastungsquerschnitte und Sicherheitsventilcharakteristiken auf den Anlagenzustand und die daraus resultierenden mechanischen Belastungen für Anlagenkomponenten (z.B. Einbauten) können ermittelt werden. Das Modell muss dafür die Gesamtanlage inklusive Wärmeübertrager, Regelkreise und Sicherheitsventil abbilden. Eine gegenüber Modellen für den stationären Betrieb erweiterte Modellierung der Fluidodynamik in der Kolonne ist hierfür erforderlich. Das vorgestellte Modell wurde in gProms® entwickelt und implementiert. Das Modell besteht aus einzelnen Modulen, welche zu dem kompletten Modell der Anlage zusammengefügt werden.

## 4.1 Kolonnenmodell

Der Stoffaustausch zwischen den einzelnen Teilmodellen erfolgt mit Hilfe von Strömen, welche die übergebene Masse, Druck, Temperatur und Zusammensetzung beinhalten. Der Aufbau des Gesamtmodells bestehend aus einzelnen Teilmodellen ist in Abbildung 4.1 wiedergegeben.

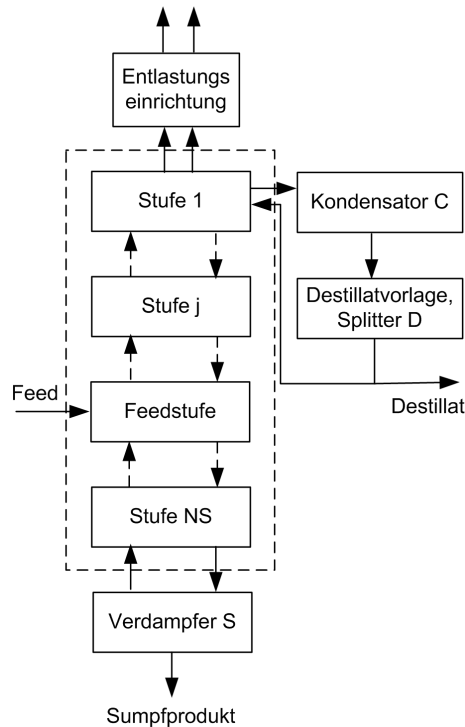


Abbildung 4.1: Mögliche Verschaltung zum Gesamtmodell

Die Trennstufen sowie der Kondensator und der Verdampfer werden dabei unter Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts mit Hilfe der Massen-, Komponenten- und Energiebilanzen modelliert. Die Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts bezogen auf Druck und Temperatur, nicht jedoch auf die Stoffkonzentration hat sich im Rahmen eigener Voruntersuchungen als gerechtfertigt erwiesen. Die Dampf- und die Flüssigkeitsphase der einzelnen Teilmodelle werden gemeinsam vollständig dynamisch bilanziert (Massen-, Energie- und Komponentenbilanz). Bei der Modellierung des Phasengleichgewichts zwischen Dampf- und Flüssigkeit werden die Aktivitätskoeffizienten der Flüssigkeitsphase mit dem Uniquac-Ansatz bestimmt und die Gasphase als ideales Gas betrachtet. Der den Boden verlassende Flüssigkeitsmassenstrom wird bei Abfluss über das Wehr mit der Francis-Wehrformel beschrieben [PERRY et al. 1999]. Der den Boden verlassende Dampfstrom wird über eine Druckverlustgleichung nach [SATTLER 1995] berechnet. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Modelle wurde von [STAACK et al. 2008] veröffentlicht. Auf Grund der geplanten Verwendung des Modells, lassen sich weitere Massenströme nicht vernachlässigen und werden im Modell berücksichtigt. Der Abfluss der Flüssigkeit durch den Boden („Regen“) bei zu geringer Gasbelastung wird über eine eigens entwickelte Regenkorrelation beschrieben. Der Mitriss von Flüssigkeit auf den nächst höheren Boden („Entrainment“) auf Grund einer zu großen Dampfbelastung wird über eine entwickelte Entrainmentkorrelation berücksichtigt.

## 4.2 Entlastungsstufe

In Abschnitt 3 wurde erläutert, dass die Charakteristik der Entlastungseinrichtung einen erheblichen Einfluss auf die Entlastungsdynamik hat. Eine möglichst genaue Modellierung dieser Charakteristik ist daher unbedingt erforderlich. Unter dem Begriff Entlastungseinrichtung sind Sicherheitsventile, Regelventile und Berstscheiben zusammengefasst. Im Gegensatz zu den Modellen der anderen Units, muss hier

berücksichtigt werden, dass sich der Zustand und die Eigenschaften des Apparates selbst und nicht nur der Zustand des Fluids während der Laufzeit ändern. Das Modell für die Entlastungsstufe wurde daher in drei weitere Untermodelle (Strömungsmodell, Öffnungscharakteristik, Hysterese) aufgegliedert, um neben den strömungstechnischen Einflüssen auch die Bauart und Dynamik des Ventils zu berücksichtigen. Das erste Teilmodell (Strömungsmodell) berücksichtigt dabei ausschließlich die Durchströmung mit dem Fluid. Die beiden weiteren Teilmodelle (Öffnungscharakteristik, Hysterese) beschreiben die Eigenschaften der Entlastungseinrichtung.

**Strömungsmodell:** Das Strömungsmodell beschreibt die thermodynamische Zustandsänderung des durch das Ventil strömenden Fluids. Es können sowohl einphasige wie auch zweiphasige Entlastungen beschrieben werden. Einigkeit herrscht in der Literatur bei der Beschreibung einphasiger Strömungszustände für Dampf/Gas bzw. Flüssigkeit. Dabei wird die Entlastungseinrichtung im gesamten Querschnitt entweder einphasig flüssig oder einphasig dampfförmig durchströmt. Ein Phasenübergang findet nicht statt. Der austretende Strom wird mit Hilfe der Ausflussfunktion  $\Psi$  berechnet.  $\Psi$  ist eine Funktion des Druckverhältnis  $p_{R,in}/p_{R,out}$  und des Isentropenexponenten  $\kappa$  und wird für flüssige und dampfförmige über- und unterkritische Strömungen entsprechend dem im Folgenden vorgestellten Strömungsmodellen berechnet. Die Berechnungsgleichungen für den einphasigen dampfförmigen bzw. flüssigen Durchfluss sind in Gleichung 4.1 gegeben.

$$F_{out} = \alpha A_R \Psi \frac{1}{\tilde{M}_R} \sqrt{\frac{2p_{R,in}}{v_{R,in}}} \quad (4.1)$$

Bei der Beschreibung zweiphasiger Entlastungen sind dagegen noch weitere Aspekte zu berücksichtigen. Eine Vielzahl von Modellen wurden in der Literatur veröffentlicht. Die Auswahl eines geeigneten Modells hängt dabei vom Stoffsystem ab. Bei Destillationskolonnen werden, da es sich um Dampfdrucksysteme handelt, nachverdampfende Gemische entlastet. Aufgrund des Druckabfalls der Entlastungseinrichtung kommt es daher zu einer Nachverdampfung. In wie weit sich auf Grund des sehr schnellen Strömungsvorgangs ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellen kann, wird in den verschiedenen Veröffentlichungen unterschiedlich bewertet. Die drei implementierten physikalischen Modelle bilden daher die untere Grenze (thermodynamisches Gleichgewicht), die obere Grenze (maximales Ungleichgewicht) und einen Mittelwert des Massenstroms ab. Als Black-Box Modell wurde eine Spline-Funktion basierend auf einem Polynom 3ter Ordnung implementiert:

- **Schmidt-Westphal** Das von [SCHMIDT und WESTPHAL 1997] vorgestellte Modell berücksichtigt die Nachverdampfung in der Entlastungseinrichtung über den von [LEUNG 1996] vorgestellten  $\omega$ -Parameter und ist daher für nachverdampfende Gemische geeignet. Ausgehend von diesem Modell lässt sich nach [CREMERS et al. 1998] die untere Grenze des maximal möglichen Massenstroms abschätzen .
- **Diener-Schmidt** Das von [DIENER und SCHMIDT 2004] vorgestellte Modell erweitert das Modell von [SCHMIDT und WESTPHAL 1997]. Besonders bei geringen Dampfgehalten des Entlastungsstroms unterschätzt das Modell von [SCHMIDT und WESTPHAL 1997] den tatsächlichen Massenstrom, da es zu einem Siedeverzug kommt. Dies wird durch die Einführung des Siedeverzugsparameters  $N$  berücksichtigt. Eine Abschätzung des mittleren Massenstroms mit diesem Modell ist daher möglich.
- **Frozen Flow** Die zu Grunde liegende Annahme ist, dass kein Phasenwechsel im Sicherheitsventil stattfindet, also ein vollständiger Siedeverzug vorliegt. Insbesondere bei niedrigen Strömungsmassendampfgehalt lässt sich nach [CREMERS et al. 1998] mit dieser Annahme die obere Grenze des Massenstroms abschätzen. Jede Phase durchströmt die Entlastungseinrichtung in ihrem Teil des freien Querschnitts. Die Aufteilung des Querschnitts erfolgt entsprechend dem spezifischen Volumenanteilen der beiden Phasen ( $A_R^V = (1 - \epsilon_L)A_R$  und  $A_R^L = \epsilon_L A_R$ ).
- **Polynom** Soll kein Strömungsmodell verwendet werden so kann ersatzweise ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem entlasteten Massenstrom und dem Differenzdruck aufgestellt werden. In

der Praxis hat dies Bedeutung, da viele Ventilhersteller Messwerte für die Durchströmung mit Wasser/Luft in Abhängigkeit vom Differenzdruck zur Verfügung stellen. Diese tabellierten Messwerte können dann durch ein Polynom 3ter Ordnung angenähert werden ( $F_{out} = f(\Delta P_R)$ ).

Als zusätzliche Berechnungsgröße für eine zweiphasige Entlastung ist der Massenanteil  $\dot{x}$  oder Volumenanteil  $\epsilon_L$ , der unter Stagnationsbedingungen in das Sicherheitsventil eingetragenen Flüssigkeit erforderlich. Diese Größe wird mit Hilfe des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Entrainmentansatzes berechnet.

**Öffnungscharakteristik:** Die Öffnungscharakteristik beschreibt den funktionellen Zusammenhang zwischen Ventilhub und freigegebener Querschnittsfläche (Gleichung 4.2). Sie spiegelt die Form des Ventilsitzes wieder.

$$A_R/A_{tot} = f(Lift/Lift_{tot}) \quad (4.2)$$

Die im Modell implementierten Öffnungscharakteristiken sind in Abbildung 4.2 wiedergegeben.

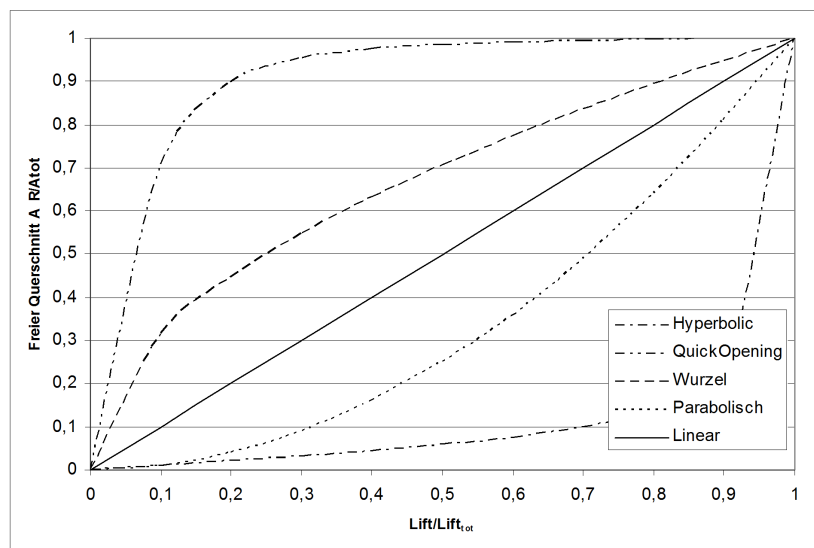


Abbildung 4.2: Öffnungscharakteristik einer Entlastungseinrichtung

**Hysterese:** Die Hysterese beschreibt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem im Behälter herrschenden Druck und den Hub des Ventils und spiegelt somit die Eigenschaften der Ventilsfeder wieder.

$$Lift/Lift_{tot} = f(P_{R,in}, P_{R,out}) \quad (4.3)$$

Die Implementierung sieht vier charakteristische Punkte der Drücke (Ansprechdruck, Vollhuböffnungsdruck, Vollhubschließdruck, Schließdruck) vor. Mit diesen wird der Öffnungs- und Schließzyklus beschrieben (siehe Abbildung 4.3). Durch setzen der vier Eckpunkte, kann das Verhalten des Ventils beschrieben werden. Die in der Literatur beschriebenen Ventilverhalten (Proportionalventil, Vollhubventil, Berstscheibe etc.) können auf diese Weise abgebildet werden.

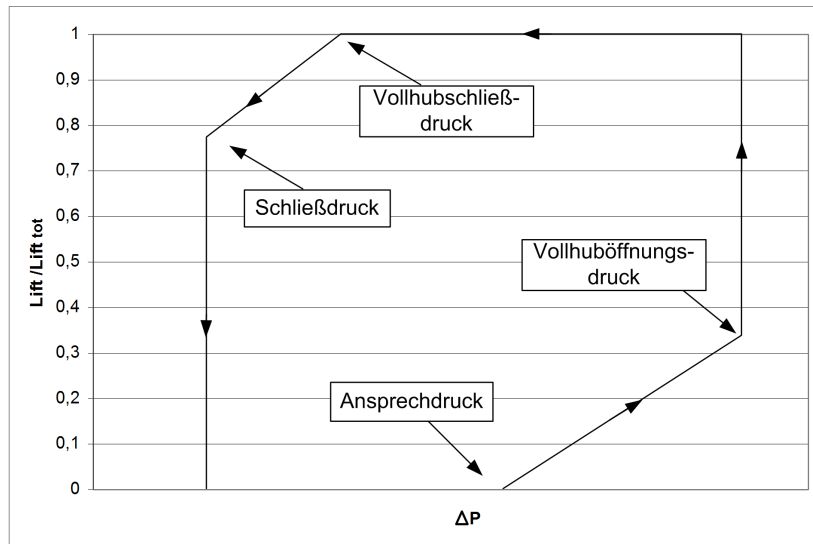


Abbildung 4.3: Mögliche Hysteresekurve einer Entlastungseinrichtung

## 5 Modellvalidierung

Das dynamische Simulationsmodell wurde mit Hilfe eigener experimenteller Untersuchungen an der in Abschnitt 3 vorgestellten Versuchsanlage erfolgreich validiert. Neben den Versuchsreihen mit Wasser, wurden weitere Versuchsreihen mit zwei weiteren Stoffgemischen (Methanol/Wasser und Acetonitril/Wasser) durchgeführt. Beispielhaft wird hier die Modellvalidierung für das Stoffsystem Methanol (20%)/Wasser (80%) und ein Vollhub sicherheitsventil mit einem freien Querschnitt von  $d = 9\text{mm}$  gezeigt. Weitere Eigenschaften des Ventils sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Anlage wurde ohne Produktentnahme, also mit totalem Rücklauf im Kopf und ohne Sumpfabzug betrieben. Um die Möglichkeiten des erstellten Simulationsmodells aufzuzeigen, wird ein mögliches vollständiges Fehlerszenario (Ausfall des Kondensators, Ansprechen des Sicherheitsventils, Abschalten des Verdampfers) nachgestellt. Die Anlage wurde zunächst in einen stationären Betriebspunkt gefahren ( $p=1018\text{ mbar}$ ). Anschließend wurde ein Kondensatorausfall simuliert. Auf Grund der fehlenden Kühlung steigt der Druck in der Anlage und erreicht schließlich den Ansprechdruck des Sicherheitsventils. Das verwendete Vollhub sicherheitsventil öffnet und ist in der Lage den Kopfdruck auf einem konstanten Wert zu halten. Das Ventil bleibt in seinem Proportionalbereich und erreicht nicht den Vollhuböffnungsdruck (siehe Abbildung 4.3). Die Entlastung bleibt über die gesamte Zeit einphasig. Anschließend erfolgt eine Notabschaltung des Verdampfers und ein Abfahren der Anlage. Das Ventil schließt wieder bei Erreichen des Schließdrucks.

Tabelle 5.1: Sicherheitsventil

Name	LESER, Type 462
Typ	Vollhub sicherheitsventil
Ansprechdruck	0,5 barg
Ausflussziffer	$\alpha = 0,7$ (Gase, Dämpfe)

Im Simulationsmodell wurde ein Vollhub sicherheitsventil mit einer linearen Öffnungscharakteristik (siehe Abbildung 4.2) und einer Hysteresekurve sowie der Ausflussziffer entsprechend den Herstellerangaben



implementiert. Das Strömungsmodell nach Schmidt und Westphal wurde verwendet. Der experimentelle wie auch der simulierte Verlauf des Kolonnenkopfdrucks, der Kondensator- und der Verdampferleistung sind in Abbildung 5.1 gezeigt.

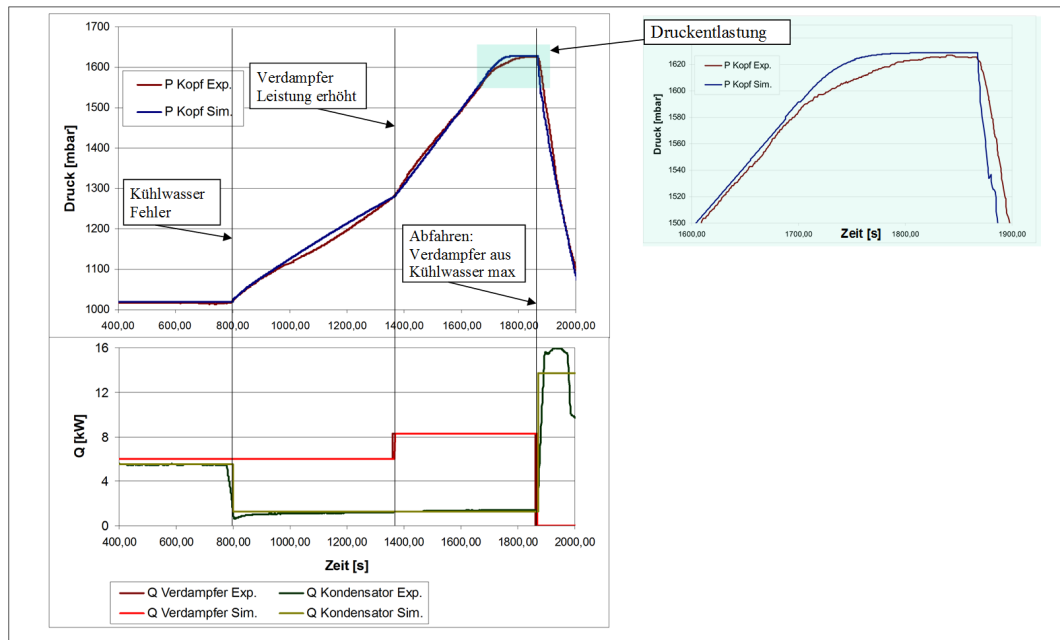


Abbildung 5.1: Ereignisablauf nach Kühlwasserausfall, Experiment und Simulation

Sowohl der stationäre Arbeitspunkt wie auch die Dynamik des Druckanstiegs infolge des Kondensatorfehlers werden sehr gut wiedergegeben. Auch die Dynamik der Entlastung selbst stimmt sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen überein. Interessant ist in diesem Zusammenhang besonders die Tatsache, dass das Vollhub Sicherheitsventil sowohl im Experiment wie auch in der Simulation im Proportionalbereich bleibt und nicht vollständig aufreißt. Der Druck wird daher konstant gehalten. Experiment und Simulation stimmen auch bei der Aussage überein, dass die Entlastung über den gesamten Zeitbereich einphasig bleibt. Das Entrainment ist zu schwach, um eine zweiphasige Entlastung zu provozieren. Bei dem anschließenden Abfahrvorgang, bei dem ein Abregnen der Böden im Simulationsmodell berücksichtigt wurde, stimmen die Verläufe ebenfalls sehr gut überein.

## 6 Zusammenfassung

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen über die Dynamik einer Rektifikationskolonne nach einer Fehlfunktion mit anschließender Druckentlastung wurden durchgeführt. Die Eigenschaften der Entlastungseinrichtung (Querschnitt, Öffnungsverhalten) haben erheblichen Einfluss auf die Entlastungsdynamik. Unterdimensionierte Entlastungseinrichtungen sind nicht in der Lage den Druck zu reduzieren, überdimensionierte Entlastungseinrichtungen provozieren eine mögliche zweiphasige Entlastung und Belastungen für Kolonneneinbauten, die auch über den Auslegungswerten liegen können.

Basierend auf den experimentellen Erkenntnissen wurde ein dynamisches Simulationsmodell zur Beschreibung von Druckentlastungsvorgängen entwickelt und in gProms® implementiert. Bei der Entwicklung des Modells wurde auf eine möglichst universelle Designabbildung geachtet. Zweiphasige Entlastungen lassen sich durch die Berücksichtigung des Entrainments vorhersagen und berechnen. Durch die Beschreibung des Abregnens lassen sich alternative Sicherheitskonzepte, wie eine Verdampferabschaltung untersuchen. Mit Hilfe des erstellten Modells bietet die dynamische Kolonnensimulation sowohl bei der erstmaligen Auslegung einer Anlage, wie auch nach deren Umbau schnelle und genaue Antworten auf die sich stellenden Schlüsselfragen. Für verschiedene Störszenarios (Kondensatorfehler, Energieausfall, Rücklauffehler

etc.) kann der notwendige freie Querschnitt des Sicherheitsventils und die notwendige Kapazität nachfolgender Apparate ermittelt bzw. überprüft werden. Der Druckverlauf und mögliche Belastungen für Kolonneneinbauten können berechnet und bei Überschreitung der Auslegungswerte ggf. durch Anpassung der Entlastungskapazität unter dem jeweiligen Grenzwert gehalten werden. Die Auswirkungen verschiedener Entlastungsquerschnitte und Öffnungscharakteristiken auf den Druckverlauf können ermittelt werden.

## 7 Eigene Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojekts

STAAK, D., JIMOH, M., WOZNY, G.: Druckentlastung von Rektifikationskolonnen im gestörten Betrieb. Dechema/GVC- Arbeitsausschuss "Sicherheitsgerechtes Auslegen von Chemieapparaten", 30. September 2005

STAAK, D., REPKE, J.-U., WOZNY, G.: Outflow conditions and strains on internals during pressure relief events on distillation columns. 9th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation (Pres), Prag, 27.-31. August 2006

STAAK, D., REPKE, J.-U., WOZNY, G.: Angepasste Dimensionierung von Sicherheitsventilen und Fackelsystemen mit Hilfe der dynamischen Simulation. GVC- Fachausschuss "Rohrleitungstechnik", Dechema-Arbeitsausschuss "Rechnergestützte Anlagenplanung", Frankfurt, 07. Dezember 2006

STAAK, D., REPKE, J.-U., WOZNY, G.: Dynamische Simulation von Entlastungsvorgängen bei Kolonnen im gestörten Betrieb. ProcessNet- Fachausschüsse "Prozess- und Anlagentechnik und Fluidverfahrenstechnik", Karlsruhe, 11.-13 Februar 2007

STAAK, D., REPKE, J.-U., WOZNY, G.: Two-phase-flow and stress on internals during pressure relief events on distillation columns: experimental investigation and dynamic simulation. AIChE Meeting, Houston, April 2007.

STAAK, D., REPKE, J.-U., WOZNY, G.: Simulation von Entlastungsvorgängen bei Rektifikationskolonnen. Chemie Ingenieur Technik, 80(1-2), S. 129-136, 2008

## Symbolverzeichnis

### Abkürzungen und Indices

in eingehend

out ausgehend

L Flüssigkeit

R Entlastungsstufe (Relief)

tot total

V Dampf

### Griechische Buchstaben

$\epsilon$  volumetrischer Dampfanteil

$\kappa$  Isentropenexponent

$\Psi$  Ausflussfunktion

## Lateinische Buchstaben

$\tilde{M}$	Molekülmasse	$g/mol$
$A$	Querschnittsfläche	$m^2$
$F$	Massenstrom	$mol/s$
$Lift$	Hub	$m$
$p$	Druck	$Pa$
$v$	spez. Volumen	$m^3/kg$

## Literatur

- [API 2000] API, 520 (2000). *Sizing, Selection and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries, Part 1: Sizing and Selection*. RP 520, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Washington D.C. 5. Aufl.
- [CASSATA und DASGUPTA 1993] CASSATA, J. und S. DASGUPTA (1993). *Modeling of tower relief dynamics- Part 1*. Hydrocarbon Processing, 10:71–76.
- [CREMERS et al. 1998] CREMERS, J., L. FRIEDEL und T. LENZING (1998). *Lower and upper limit for the full lift safety valve two phase discharge capacity*. In: *1st Internet Conference on Process Safety*.
- [DIENER und SCHMIDT 2004] DIENER, R. und J. SCHMIDT (2004). *Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two-Phase Flow Part 1: Safety Valves*. Process Safety Progress, 23(4):335–345.
- [EIDEN et al. 1995] EIDEN, U., R. KAISER, G. SCHUCH und D. WOLF (1995). *Scale-up von Destillationskolonnen*. Chemie Ingenieur Technik, 67(3):269–279.
- [ELLINGSEN 1988] ELLINGSEN, W.R. (1988). *Diagnosing and Preventing Tray Damage in Distillation Columns*. International Federation of Automatic Control (Hrsg.), S. 37–42.
- [HUMPHREY 1995] HUMPHREY, J. L. (1995). *Separation Processes: Playing a critical role*. Chemical Engineering Progress, 91(10):31–32.
- [KISTER 1990] KISTER, H. Z. (1990). *Distillation Operation*. McGraw-Hill, New York.
- [LEUNG 1996] LEUNG, J.C. (1996). *Easily Size Relief Devices and Piping for Two-Phase Flow*. Chemical Engineering Progress, S. 28–50.
- [NETTER 2003] NETTER, P. (2003). *Umsetzung der NAMUR Empfehlung 93 - Nachweis der sicherheitstechnischen Zuverlässigkeit von PLT-Schutzeinrichtungen*. Chemie Ingenieur Technik, 75(8):1094.
- [PERRY et al. 1999] PERRY, R. H., D. W. GREEN und J. O. MALONEY (1999). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. McGraw-Hill, New York. ISBN: 0-07-049841-5.
- [SATTLER 1995] SATTLER, K. (1995). *Thermische Trennverfahren*. VCH, Weinheim.
- [SCHMIDT und WESTPHAL 1997] SCHMIDT, J. und F. WESTPHAL (1997). *Praxisbezogenes Vorgehen bei der Auslegung von Sicherheitsventilen und deren Abblasleitungen für die Durchströmung mit Gas/Dampf-Flüssigkeitsgemischen-Teil 2*. Chemie Ingenieur Technik, 69(8):1074–1091.
- [SHIVELER 1995] SHIVELER, G.H. (1995). *Use Heavy-Duty Trays for Severe Services*. Chemical Engineering Progress, 91(8):72–81.
- [STAAK et al. 2008] STAAK, D., J.-U. REPKE und G. WOZNY (2008). *Simulation von Entlastungsvorgängen bei Rektifikationskolonnen*. Chemie Ingenieur Technik, 80(1-2):129–136.