

Verlauf einer Druckentlastung bei Rückspeisung abgeschiedener Flüssigkeit in den Kessel

Von F. Klug, S. Muschelknautz und F. Mayinger¹⁾

1. Einleitung

Die Untersuchungen, die hier vorgestellt werden und von der „Gesellschaft für Verfahrenstechnik“ GVT mit Mitteln der „Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen“ AIF finanziert wurden, behandeln einen sicherheitstechnischen Bereich der chemischen Industrie. Wenn in einem Chemiereaktor eine exotherme Reaktion außer Kontrolle gerät, wird in der Regel versucht, die Reaktion durch Zusatz von reaktionshemmenden Additiven oder durch verstärkte Kühlung wieder abzufangen. Falls dies nicht gelingt, kann die Situation mit Hilfe einer Druckentlastung wieder unter Kontrolle gebracht werden. Dabei wird ein Teil des flüssigen Reaktorinhalts durch die bei der Reaktion freiwerdende Wärme und durch die Druckabsenkung verdampft. Der Dampf wird aus dem Reaktor in nachgeschaltete Systeme abgeführt. Auf diese Weise lassen sich Temperatur und Druck des Reaktorinhalts absenken. Leider ist die Dampfproduktion mit einem unerwünschten Anstieg des Flüssigkeitsspiegels verbunden. Bei üblichen Füllgraden von 80 % erreicht der Spiegel in der Regel den Austrittsstutzen, so daß zusammen mit dem Dampf erhebliche Flüssigkeitsmengen ausgetragen werden.

2. Stand der Technik

Bei den in Chemiereaktoren verwendeten Substanzen handelt es sich sehr oft um toxische oder explosive Stoffe. Deshalb ist man bestrebt, die Flüssigkeit vom Dampf zu trennen und in einem Sammelbehälter zurückzuhalten. Dabei sind verschiedene Arten von Trägheitsabscheidern üblich. Eine Übersicht findet sich bei S. Grossel [1]. In der Petrochemie ist es Standard, die bei einer Druckentlastung ausgegrenzte Masse in ein geschlossenes Fackelsystem zu leiten. Die Flüssigkeitsabtrennung erfolgt in sog. Blowdown-Behältern, die in die Fackelsammelleitung integriert sind und gewöhnlich nach der API 520 [2] ausgelegt werden. Spezielle Trennapparate wurden in der jüngsten Vergangenheit von S. Muschelknautz [3] entwickelt. Diese Untersuchungen basieren auf verschiedenen mechanischen Trägheitsabscheidern, die innerhalb eines druckfesten Sammelbehälters für die abgeschiedene Flüssigkeit in die Austrittsrohrleitung integriert sind. Dabei müssen sie in einer gewissen Höhe über dem Reaktor angeordnet werden, wenn die separierte Flüssigkeit noch während der Druckentlastung und ohne Fremdenergie [4, 5] durch eine zweite Rohrleitung in den Reaktor zurückfließen soll.

Die Rückleitung muß durch eine Rückschlagklappe so lange gegen den Kessel abgedichtet werden, bis die Wiedereinspeicherung der abgeschiedenen Flüssigkeit erfolgen kann. Der Dampf strömt in der Verlängerung der Austrittsleitung zum Entlastungsventil. Dieses muß hinter dem Abscheider angeordnet werden, weil dort wegen der kritischen Durchströmung ein großer Druckabfall auftritt. Das Volumen des Sammelbehälters kann klein gehalten werden, wenn die Wiedereinspeicherung bereits zu einem möglichst frühen Zeitpunkt der Druckentlastung erfolgt. Das bedingt entweder einen geringen Druckverlust oder eine große Höhendifferenz vom Reaktor bis zum Abscheider.

3.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die Messungen wurden mit dem Kältemittel R12 durchgeführt. Das Versuchsfluid befindet sich anfangs im Druckentlastungsbehälter mit einem Volumen von 250 l und einem Durchmesser von 492 mm (Bild 1). Mit Hilfe eines elektrischen Heizflansches wird der Kesselinhalt auf den Abblasedruck von 17 bar (Sättigungstemperatur 65°C) aufgeheizt. Die Druckentlastung wird durch Öffnen eines pneumatisch gesteuerten Kugelhahns eingeleitet, der den gesamten Rohrleitungsquerschnitt NW 50 zwischen Kessel und Abscheider freigibt. Das austretende Gemisch strömt durch die Rohrleitung in den Umlenkab-

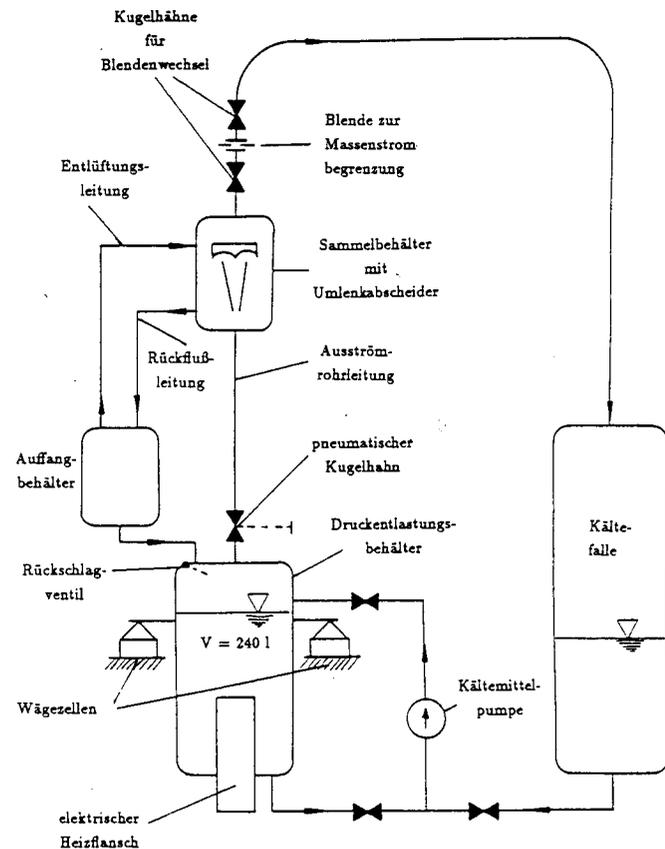


Bild 1: Schema der Druckentlastungs-Versuchsanlage

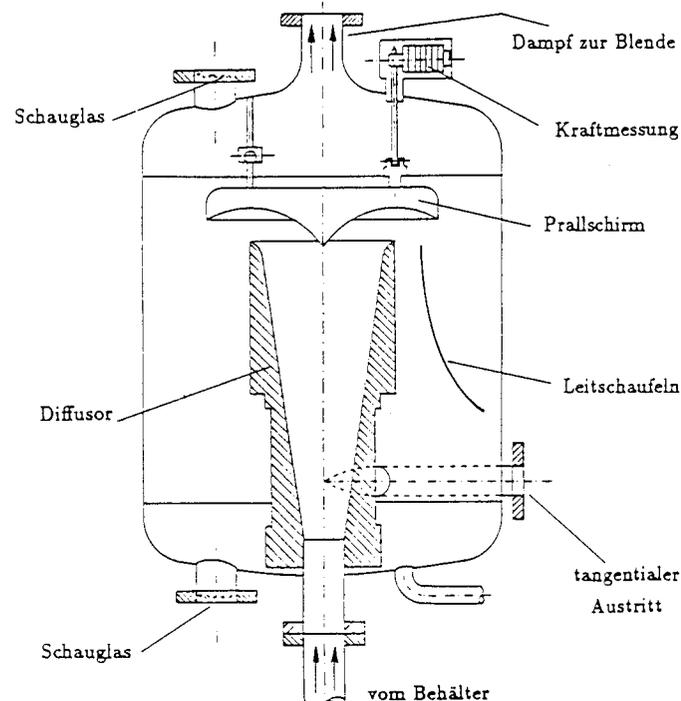


Bild 2: Schnitt durch den Sammelbehälter mit Umlenkabscheider

¹⁾ Dipl.-Ing. F. Klug, Dr.-Ing. S. Muschelknautz, Prof. Dr.-Ing. F. Mayinger, Lehrstuhl A für Thermodynamik, Techn. Universität München

scheider, der in einem druckfesten Sammelbehälter untergebracht ist und sich bei Versuchsbeginn auf dem Druckniveau der Kältefalle von ca. 1 bar befindet.

Im Umlenkabscheider (Bild 2) strömt das Gemisch durch eine konische Erweiterung, die als zweiphasig durchströmter Diffusor einen gewissen Druckanstieg erzeugt und prallt dann gegen den Prallschirm. Aufgrund der Trägheit lagert sich die Flüssigkeit als Film am Prallschirm an und strömt nach außen ab. Am äußeren Prallschirmrand sind acht Störkörper angeordnet, die den Film in Strahlen zerteilen, so daß Durchtrittsflächen für den Dampf geschaffen werden. Dadurch wird der Tropfenmitriß minimiert und gleichzeitig der Druckverlust für den Dampf verringert. Die Flüssigkeitsstrahlen treffen unter einem Winkel von 45° auf die Behälterwand und werden dort durch gewundene Leitbleche in Rotation versetzt, um die Phasenseparation bei Nachverdampfung der abgeschiedenen Flüssigkeit zu verbessern. Der Abfluß erfolgt durch einen tangentialen Auslauf im Behältersumpf. Der Dampf verläßt den Sammelbehälter durch einen abgerundeten Übergang, strömt durch eine Blende zur Massenstrombegrenzung und kondensiert in einer Kältefalle.

Die Versuche wurden mit 2 Blendengrößen von 10 mm bzw. 30 mm Durchmesser durchgeführt, was einem Flächenverhältnis von Ausströmrohrleitung zu Strömungsquerschnitt in der Blende A/A^* von 30 bzw. 3 entspricht. Die Versuche von Muschelknautz haben gezeigt, daß der interessierende Geschwindigkeitsbereich mit den zwei oben genannten Blendengrößen abgedeckt wird.

Die abgeschiedene Flüssigkeit fließt abwärts und wird in der Rückleitung und dem zwischengeschalteten Auffangbehälter aufgestaut. Es ist vorteilhaft, den Sammelbehälter nur so groß zu wählen, daß die separierte Flüssigkeit geordnet gesammelt und abgeleitet werden kann. Das bis zur Wiedereinspeicherung erforderliche Restspeichervolumen sollte vom sogenannten Auffangbehälter bereitgestellt werden, der – wie in Bild 1 eingezeichnet – unmittelbar oberhalb des Kessels angeordnet werden kann, wodurch die Aufstellung bedeutend vereinfacht wird. Am unteren Ende der Rückleitung befindet sich ein selbsttätiges Rückschlagventil, durch das die Flüssigkeit wieder in den Kessel zurückfließen kann. Um den Druckverlust bei der Beschleunigung des Gemisches am Kesselaustritt zu minimieren, wurde dieser abgerundet. Eine Kältemittelpumpe dient zur Umwälzung des Kesselinhalts und sorgt für eine homogene Temperaturverteilung im Kessel vor Versuchsbeginn.

Die Meßdaten wurden mit einem Datenerfassungssystem aufgezeichnet, gefiltert und anschließend mit Hilfe eines Auswerteprogrammes numerisch bearbeitet. Die darin enthaltene Berechnung der Mengenströme und Geschwindigkeiten ist in [6] detailliert beschrieben.

3.2 Meßtechnik

Neben einer Erfassung der Drücke und der Temperaturen sowohl des Fluids als auch der Behälterwände, wurde auch der Verlauf des Masseninhalts im Kessel gemessen. Zur Egalisierung des Ausströmpulses wurde eine Vorrichtung konstruiert, die den austretenden Massenstrom in zwei horizontale Teilströme aufteilt, anschließend wieder zusammenführt und zum Abscheider leitet (siehe Bild 3). Der Kessel ist frei an zwei DMS-Kraftaufnehmern aufgehängt. Um störende Kräfteinleitungen zu vermeiden, sind sämtliche Zuleitungen als flexible Metallschläuche ausgeführt, der am oberen T-Stück auftretende Impuls wird in einer Einspannung aufgenommen.

3.3 Rückschlagventil

Um den selbsttätigen Rückfluß der abgeschiedenen Flüssigkeit zu ermöglichen, wurde in der Kesseldecke ein Rückschlagventil eingebaut, das in Bild 4 im Schnitt dargestellt ist. Der Ventilteller wird mit der Feder unter geringer Vorspannkraft in der oberen geschlossenen Stellung gehalten. Eine Erhöhung des Kesseldrucks bewirkt eine Vergrößerung des Anpreßdrucks. Die abgeschiedene Flüssigkeit staut sich in der Rückleitung oberhalb des Ventils und erhöht dadurch den hydrostatischen Druck auf der Oberseite. Während der Druckentlastung sinkt der Kesseldruck allmählich ab, während sich der Druck im Sammelbehälter von unten dem Kesseldruck annähert. Sobald am Ventilteller Kräftegleichgewicht herrscht, kann das Ventil aufgedrückt werden, und die Wiedereinspeicherung beginnt.

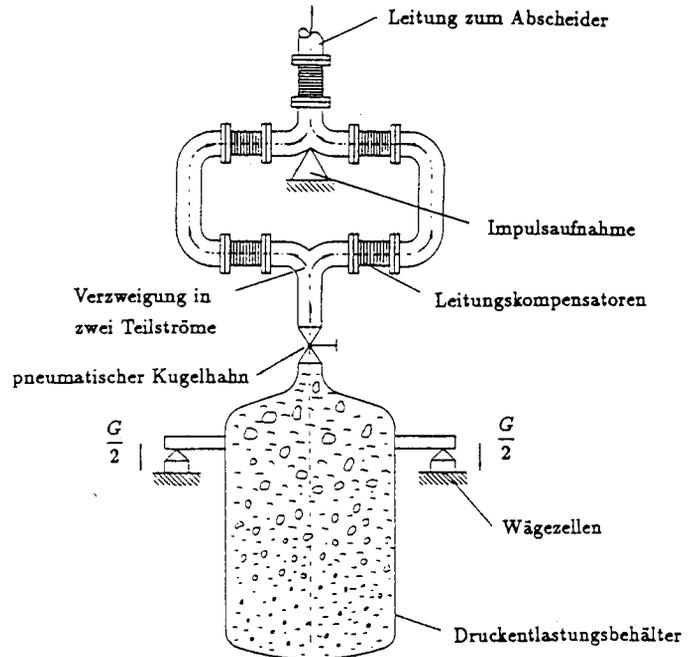


Bild 3: Vorrichtung zur Kesselwägung mit Kompensation des Ausströmpulses

3.4 Massenstromverzweigung im Sammelbehälter

In der ersten Phase der Druckentlastung wird mehr Dampf aus dem Kessel ausgetragen als durch die Blende abströmen kann. Da sich der Sammelbehälter zu Versuchsbeginn auf Umgebungstemperatur befindet, kondensiert ein Teil des einströmenden Dampfes an der Behälterwand. Der restliche Anteil wird gespeichert und bewirkt solange eine Druckerhöhung im Sammelbehälter, bis die zu- und abströmenden Volumenströme gleich groß sind. Die Verteilung der Massenströme im Sammelbehälter wird in Bild 5 veranschaulicht.

4. Versuchsergebnisse

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse in geraffter Form vorgestellt. Eine vollständige Übersicht findet sich unter [6]. Die Versuche mit Wiedereinspeicherung wurden mit einem Füllgrad des Kessels von ca. 95 % durchgeführt. Der zeitliche Verlauf einer typischen Druckentlastung mit Wiedereinspeicherung ist anhand der Drücke im Kessel und Sammelbehälter sowie anhand des Kesselinhaltes in Bild 6 dargestellt.

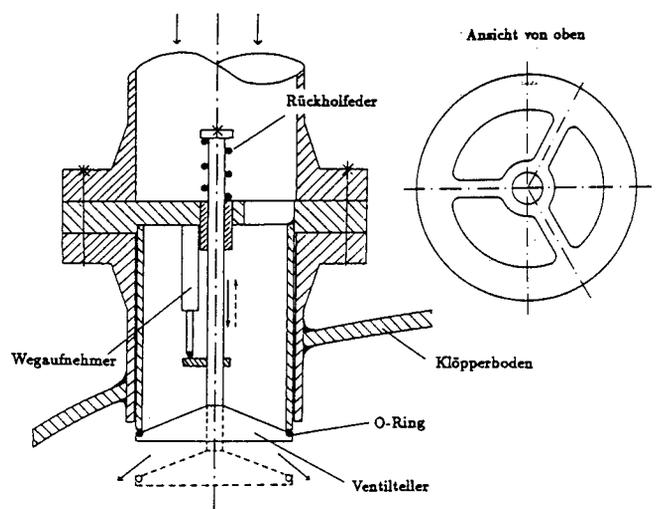


Bild 4: Schnitt durch das Rückschlagventil zur selbsttätigen Wiedereinspeicherung

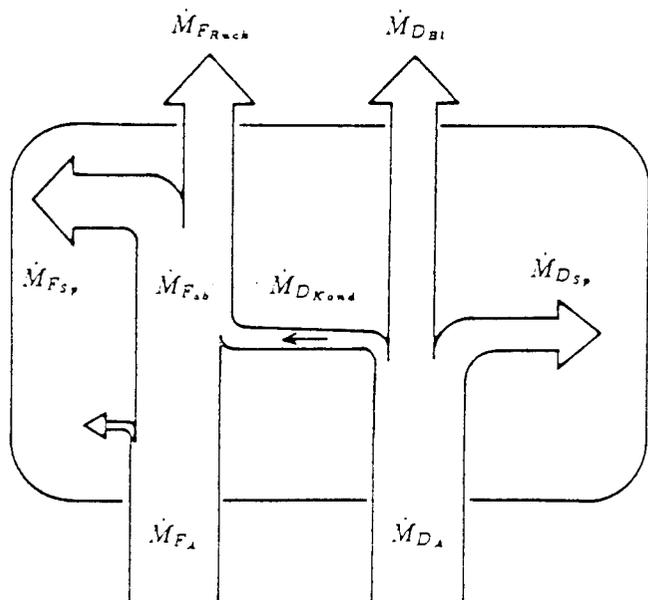


Bild 5: Verteilung der Massenströme im Sammelbehälter

Beim Öffnen des Entlastungsventils entströmt das Dampfpolster schlagartig und der Kesseldruck fällt rasch ab. Die Flüssigkeit wird stark überhitzt und die einsetzende heftige Entspannungsverdampfung führt zur Bildung von Dampfblasen im gesamten Fluidvolumen. Dadurch steigt der Gemischspiegel an und erreicht nach sehr kurzer Zeit den Austrittsstutzen. Bei der zweiphasigen Durchströmung des Entlastungsventils wird zunächst weniger Dampf ausgetragen als produziert wird, und der Kesseldruck steigt zwischenzeitlich wieder an. Nach Überschreiten eines Maximums, bei dem Gleichgewicht zwischen produziertem und abströmendem Dampfvolumen herrscht, fällt der Druck erwartungsgemäß stetig ab.

Zu Beginn der Druckentlastung befindet sich der Sammelbehälter auf dem niedrigen Druckniveau der Kältefalle. Da anfangs mehr Volumen aus dem Kessel zuströmt als durch die Blende abströmen kann, steigt der Druck im Sammelbehälter an. Die ausgetragene Flüssigkeit wird im Abscheider vom Dampf separiert und in der Rückleitung sowie im zwischengeschalteten Auffangbehälter oberhalb des Kessels aufgestaut. Sobald sich das Rückschlagventil durch die Gewichtskraft der aufgestauten Flüssigkeitssäule gegen den Kesseldruck öffnet, beginnt die Wiedereinspeicherung und die Kesselmasse steigt allmählich wieder an.

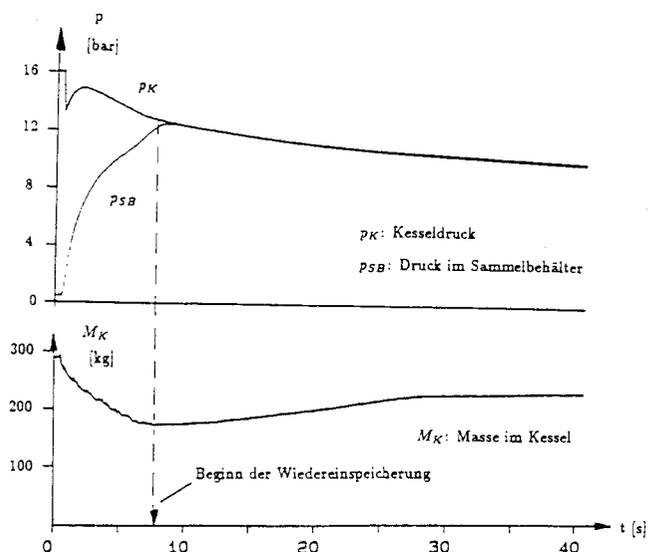


Bild 6: Zeitlicher Verlauf einer Druckentlastung mit Wiedereinspeicherung der abgeschiedenen Flüssigkeit

4.1 Dampfmengenströme am Kesselaustritt und vor dem Abscheider

Der Dampfmengenstrom am Kesselaustritt setzt sich aus dem Anteil, der durch die Abkühlung der Flüssigkeit im Kessel gebildet wird, dem Anteil, der durch die aus der Kesselwand freigesetzte Wärme produziert wird sowie aus dem Anteil zusammen, der infolge von Volumen- und Dichteänderung im Kessel ge- bzw. entspeichert wird.

Als Folge der schlagartigen Überhitzung des flüssigen Kesselinhalts bei Beginn der Druckentlastung setzt eine heftige Entspannungsverdampfung ein, demzufolge ist der erste Anteil in dieser Phase sehr groß. In den ersten Sekunden der Druckentlastung ist der zweite Anteil noch gering, weil das treibende Temperaturgefälle zwischen der Kesselwand und dem verdampfenden Gemisch klein ist. Mit zunehmender Temperaturdifferenz steigt er jedoch rasch an. Im Hinblick auf den dritten Anteil überwiegt in den ersten Sekunden der Druckentlastung der Dampfolumenzuwachs gegenüber der Dichteabsenkung, und vom produzierten Dampf wird ein großer Teil im Kessel gespeichert. Im weiteren Verlauf geht mit dem Flüssigkeitsaustrag auch der Dampfolumenzuwachs stark zurück und die Dichteabsenkung überwiegt. Dies äußert sich in einer zusätzlichen Entspeicherung von Dampf aus dem Kessel. Mit Beginn der Wiedereinspeicherung der abgeschiedenen Flüssigkeit wird der Dampfaustrag durch das verdrängte Volumen verstärkt.

Die Summe der 3 Anteile ist als Dampfmengenstrom \dot{M}_{D_0} am Kesselaustritt für Druckentlastungen mit Blendendurchmesser 30 bzw. 10 in Bild 7 gezeigt. Die Mengenströme weisen in den ersten Sekunden der Druckentlastung nahezu identischen Verlauf auf, da in dieser Phase der Sammelbehälter als Auffangkessel für das austretende Gemisch dient und die Blendengröße noch keinen Einfluß auf den Ausströmvorgang ausübt. Danach wird \dot{M}_{D_0} bei der Blende $\varnothing 30$ deutlich größer als bei der Blende $\varnothing 10$. Der Unterschied ist jedoch nicht so groß, wie aufgrund des Flächenverhältnisses der Blenden zu erwarten wäre, da der Druck vor der Blende $\varnothing 30$ zu diesem Zeitpunkt bereits deutlich kleiner ist als bei Blende $\varnothing 10$. Die Dampfspeicherung im Sammelbehälter ist zu diesem Zeitpunkt nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Der zunächst kontinuierlich ansteigende Dampfmengenstrom am Kesselaustritt geht je nach Blendengröße nach ca. 8 bis 11 Sekunden stark zurück. Zu diesem Zeitpunkt öffnet das Rückschlagventil und die zwischengespeicherte und an der Sammelbehälterwand abgekühlte Flüssigkeit strömt in den Kessel zurück. Dies führt im oberen Bereich des Kessels zur Kondensation eines Teils des produzierten Dampfes. Der Wärmeaustausch wird dadurch begünstigt, daß die Flüssigkeit beim Durchströmen des Rückschlagventils fein im Dampfraum verteilt wird.

In der Folge steigt die Dampfproduktion im Kessel wieder an. Dies liegt an zwei Ursachen: Zum einen wird die Flüssigkeitsmenge im Kessel im Verlauf der Wiedereinspeicherung wieder größer, was durch Verdrängung einen Anstieg des Dampfaustrags zur Folge hat. Andererseits nimmt die Dampfkondensation durch die wiedereingespeicherte Flüssigkeit ab, wenn die Temperatur der zurückfließenden Flüssigkeit

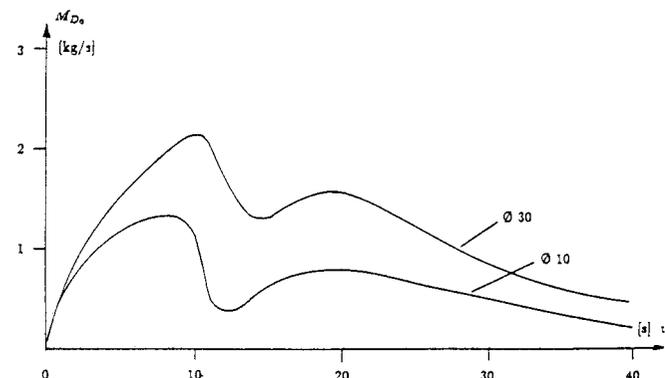


Bild 7: Zeitlicher Verlauf des Dampfmengenstroms am Kesselaustritt

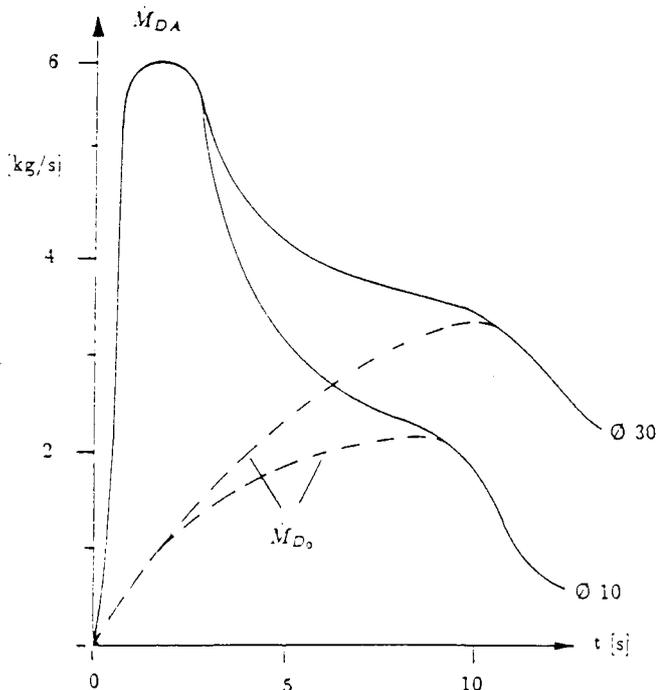


Bild 8: Zeitlicher Verlauf des Dampfmengenstroms vor dem Abscheider in der ersten Phase der Druckentlastung

aufgrund des wärmer werdenden Sammelbehälters ansteigt. Der Anstieg führt zu einem erneuten Maximum des Dampfaustrags, bis schließlich der Mengengstrom kontinuierlich zurückgeht.

Der Dampfmengenstrom vor dem Abscheider ist bei Beginn der Druckentlastung wesentlich größer als am Kesselaustritt, weil infolge des starken Druckgefälles zwischen Kessel und Sammelbehälter eine heftige Nachverdampfung in der Ausströmleitung auftritt (Bild 8). Im weiteren Verlauf der Druckentlastung geht die Nachverdampfung in der Rohrleitung gegen Null und \dot{M}_{DA} nähert sich \dot{M}_{D_0} am Kesselaustritt an, bis schließlich kein Unterschied mehr feststellbar ist.

4.2 Dampfgehalt am Kesselaustritt und vor dem Abscheider

Der Strömungsmassendampfgehalt \dot{x} ist definiert als

$$\dot{x} = \frac{\dot{M}_D}{\dot{M}_D + \dot{M}_F} \quad (1)$$

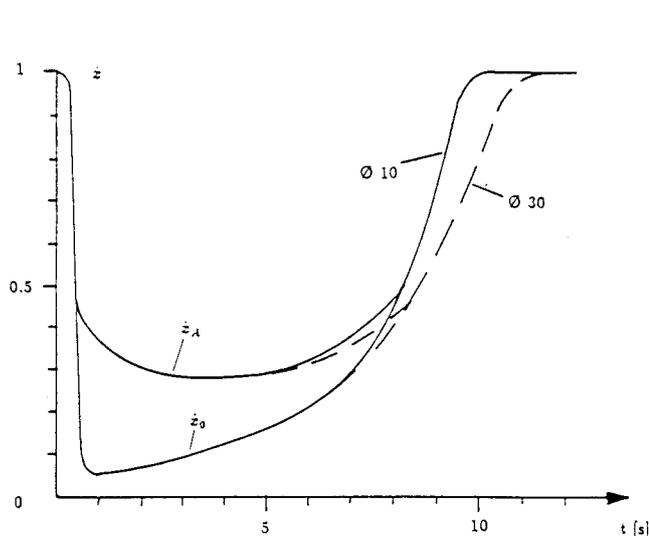


Bild 9: Zeitlicher Verlauf des Strömungsmassendampfgehalts \dot{x}_0 am Kesselaustritt und \dot{x}_A vor dem Abscheider

Er beschreibt den Flüssigkeitsanteil der Zweiphasenströmung und wurde mit Hilfe der Massenbilanz am Kesselaustritt ermittelt. Bild 9 zeigt den Verlauf von \dot{x}_0 während des zweiphasigen Austrags für zwei verschiedene Blendendurchmesser. Darüber hinaus ist auch der Verlauf des Strömungsmassendampfgehaltes \dot{x}_A vor dem Abscheider eingezeichnet. In den ersten Sekunden werden die Verläufe von \dot{x}_0 und \dot{x}_A vom Blendendurchmesser nicht merklich beeinflusst. Dies deckt sich mit der bereits oben beschriebenen Beobachtung, daß im Anfangsstadium der Druckentlastung das Speichervermögen des Sammelbehälters eine dominierende Rolle spielt und ein Blendeneinfluß nicht feststellbar ist.

Der Dampfgehalt vor dem Abscheider ist in den ersten Sekunden der Druckentlastung infolge der starken Nachverdampfung in der Rohrleitung deutlich größer als am Kesselaustritt. Mit abnehmender Druckdifferenz während der Druckentlastung geht auch die Nachverdampfung zurück und \dot{x}_A geht in \dot{x}_0 über. Je nach Blendengröße endet das zweiphasige Ausströmen nach 10 bis 12 s. Nachdem der Dampfgehalt den Wert Eins erreicht hat, bleibt am Kesselaustritt einphasiges Ausströmen bis zum Ende der Druckentlastung bestehen, obwohl der in Bild 7 gezeigte neuerliche Anstieg von \dot{M}_{D_0} im Verlauf der Wiedereinspeicherung auch einen erneuten Flüssigkeitsaustrag vermuten lassen könnte. Eine Wiedereinspeicherung in zeitlichen Schüben konnte nicht beobachtet werden.

4.3 Abgeführter Dampfmengenstrom

Bei Beginn der Druckentlastung wird durch den ausströmenden Dampf zuerst der Druck im Sammelbehälter erhöht, der sich anfangs auf dem Druckniveau der Kältefalle (ca. 1 bar) befindet. Vom einströmenden Dampf kondensiert ein Teil an der Wand des Sammelbehälters. Aufgrund des von Muschelknautz in [3] nachgewiesenen Abscheidegrades des verwendeten Umlenkabscheiders von $\eta' \approx 99\%$ kann die Blende in guter Näherung als rein einphasig durchströmt angesehen werden. Der mit den Gesetzen der Gasdynamik berechnete zeitliche Verlauf des Massenstromes $\dot{M}_{D_{Bl}}$ durch die Blende ist in Bild 10 für verschiedene Blendendurchmesser gezeigt. Nach ca. 9 s hat der Druck im Sammelbehälter seinen Maximalwert erreicht. Damit wird auch der Dampfmengenstrom durch die Blende zu diesem Zeitpunkt maximal.

4.4 Druckverteilung in der Anlage

Der Druckabfall zwischen Kessel und Abscheidereintritt setzt sich aus 3 Anteilen zusammen: dem Druckabfall zur Beschleunigung des Gemisches am Kesselaustritt Δp_{KA} , dem Druckabfall über der Rohrleitungsschleife zur Kompensation des Ausströimpulses bei der Behältererwägung $\Delta p_{Schleife}$ und dem Druckabfall über dem geraden Teil der Rohrleitung zwischen Kesselaustritt und Abscheider. Der

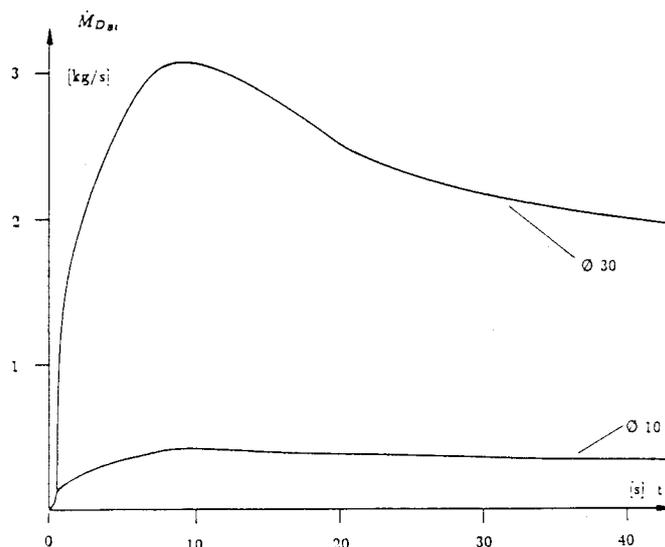


Bild 10: Zeitlicher Verlauf des Dampfmengenstroms durch die Blende

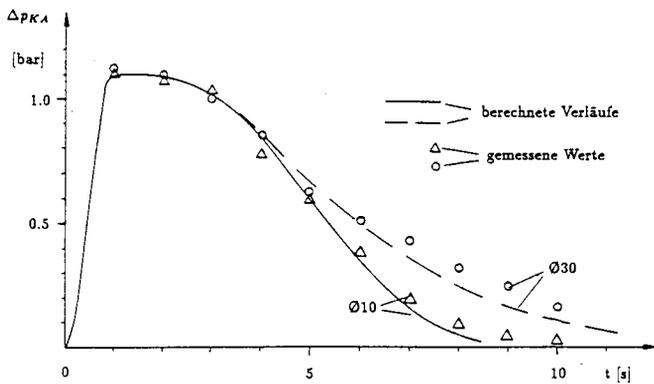


Bild 11: Zeitlicher Verlauf des Druckabfalls am Kesselaustritt

letzte Anteil besteht wiederum aus 3 Komponenten: der hydrostatischen Druckdifferenz des Gemisches $\Delta p_{hydr.}$, dem Beschleunigungsdruckabfall infolge der Nachverdampfung in der Rohrleitung Δp_B sowie dem Rohrreibungsdrukverlust Δp_R . Damit gilt die Beziehung:

$$p_K - p_A - \Delta p_{Schleife} = \Delta p_{KA} + \Delta p_{hydr.} + \Delta p_B + \Delta p_R \quad (2)$$

4.4.1 Druckabfall am Kesselaustritt

Das im Kessel nahezu in Ruhe befindliche Gemisch wird am Kesselaustritt beim Übergang in die Rohrleitung stark beschleunigt. Der Verlauf des gemessenen Beschleunigungsdruckabfalls Δp_{KA} ist in Bild 11 gezeigt. Δp_{KA} hat den größten Wert zu Beginn der Druckentlastung, da dann die maximale Menge Dampf und Flüssigkeit ausgetragen wird. Er fällt im weiteren Verlauf kontinuierlich ab.

Bei einem Anfangsüllgrad von 95% liegt der mittlere volumetrische Dampfgehalt im Kessel zu Versuchsbeginn bei 5%. Dies führt dazu, daß anfangs fast nur Flüssigkeit ausgetragen wird und \dot{x}_0 ebenfalls sehr gering ist. In den ersten Sekunden stellt die Flüssigkeit die umgebende Phase dar. Deshalb ist die Annahme berechtigt, daß das austretende Gemisch homogen beschleunigt wird und der Schlupf zwischen den Phasen näherungsweise $s = 1$ ist, siehe auch [3, 7]. Somit läßt sich über die Definitionsgleichung für den volumetrischen Dampfgehalt ($\varepsilon = V_D / (V_D + V_F)$)

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{1 + \frac{1 - \dot{x}_0}{\dot{x}_0} \cdot s \cdot \frac{\rho_D}{\rho_F}} \quad (3)$$

die mittlere Gemischdichte $\bar{\rho}$ am Kesselaustritt zu:

$$\bar{\rho} = (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_F + \varepsilon_0 \cdot \rho_D \quad (4)$$

bestimmen. Es wird davon ausgegangen, daß die Flüssigkeit als umgebende Phase bei der Beschleunigung auf ihrer Temperatur beharrt. Die Dampfspannung in der Beschleunigungszone soll wegen der großen Phasengrenzfläche und wegen des guten Wärmeübergangs zwischen Dampf und Flüssigkeit näherungsweise ebenfalls isotherm erfolgen. Außerdem kann das Gemisch mit einem maximalen Beschleunigungsdruckabfall von ca. 1,5 bar bei einem mittleren Absolutdruck von 12,5 bar in erster Näherung als inkompressibel angesehen werden. Damit ist die Bernoullische Energiegleichung anwendbar, wobei die kinetische Energie der beiden Phasen im Kessel vernachlässigt wird:

$$\Delta p_{KA} = \frac{\bar{\rho}}{2} \cdot w_0^2 \quad (5)$$

Die mittlere Gemischgeschwindigkeit w_0 am Kesselaustritt wurde mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung berechnet. Der mit Gl. 5 berechnete Verlauf von Δp_{KA} zeigt in den ersten Sekunden eine gute Übereinstimmung mit den Meßwerten (Bild 11). Im weiteren Verlauf liegen die Meßwerte jedoch über den berechneten Kurven. In diesem Bereich ist die Annahme homogener Strömung nicht mehr berechtigt, da jetzt der Dampf die umgebende Phase darstellt. Die Beschleunigung der Flüssigkeit geschieht jetzt durch Impulsübertragung vom Dampf. Bei der Umströmung der Flüssigkeitstropfen entstehen erhebliche Wärmeverluste durch Reibung, die in der Energiebilanz (Gl. 5) nicht berücksichtigt sind.

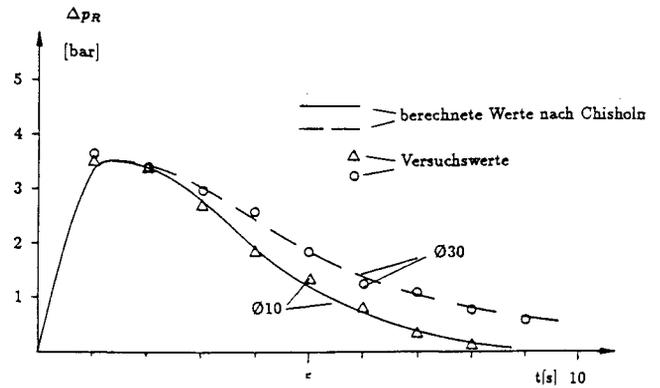


Bild 12: Zeitlicher Verlauf des Rohrreibungsdrukverlustes im geraden Teil der Ausströmleitung

4.4.2 Reibungsdruckverlust in der Rohrleitung

Bild 12 zeigt den Verlauf des gemessenen Reibungsdruckverlustes, der bereits um den Beschleunigungsdruckabfall und die hydrostatische Druckdifferenz der Zweiphasenströmung korrigiert wurde. Der Druckverlust ist in den ersten Sekunden der Druckentlastung sehr groß, weil der kritische Strömungsquerschnitt in dieser Phase am Abscheidereintritt liegt und die Dampfgeschwindigkeit in der Rohrleitung sehr hoch ist. In der Folge fällt Δp_R jedoch rasch ab.

In der Literatur sind mehrere unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des zweiphasigen Reibungsdruckverlustes in geraden Rohrleitungen bekannt. Um deren Eignung für die Verhältnisse während der Druckentlastung zu untersuchen, führte Muschelknautz für R12-Druckentlastungen die Nachrechnung des Rohrreibungsdrukverlustes nach verschiedenen bekannten Ansätzen durch. Er gibt für das Modell von D. Chisholm [8] die beste Übereinstimmung mit den Meßwerten an. Deshalb wurde die Nachrechnung für den geraden Teil der Rohrleitung – hinter der Schleife zur Impulskompensation – ebenfalls nach dem Ansatz von Chisholm durchgeführt. Hierzu wurde zunächst zum gemessenen Druck am Anfang der geraden Rohrleitung der zugehörige Dampfgehalt \dot{x}_R unter Annahme thermodynamischen Gleichgewichts bestimmt. Der Zweiphasenmultiplikator Φ^2 wurde aus dem arithmetischen Mittelwert von \dot{x}_R und \dot{x}_A gebildet. Der so berechnete Druckverlauf ist ebenfalls in Bild 12 eingezeichnet. Bei der Beurteilung der Genauigkeit ist zu berücksichtigen, daß sich die Geschwindigkeiten während einer Druckentlastung stark ändern und einen weiten Bereich abdecken.

4.5 Flüssigkeitsverteilung in der Anlage

Der zeitliche Verlauf der Masse im Kessel während einer Druckentlastung mit Wiedereinspeicherung ist in Bild 13 für die Blendendurchmesser 10 und 30 gezeigt. Man erkennt, daß in der ersten Phase der Druckentlastung die Kurven nahezu identischen Verlauf aufweisen und die Blendengröße noch keine Rolle spielt. Mit Blendendurchmesser 10 setzt nach ca. 8 s die Wiedereinspeicherung ein. Nach Beendigung der Wiedereinspeicherung ist wieder sehr viel Masse im Kessel vorhanden, da in der Zwischenzeit aufgrund des kleinen Blendendurchmessers nur relativ wenig Dampf durch die Blende abgeströmt ist.

Bei Druckentlastung mit Blende Ø 30 setzt die Wiedereinspeicherung erst zu einem späteren Zeitpunkt ein, wenn bereits mehr Kesselinhalt ausgetragen worden ist und fast nur noch Dampf aus dem Kessel ausströmt. Bis zur vollständigen Wiedereinspeicherung ist durch den großen Blendendurchmesser relativ viel Dampf ausgeströmt und der Kesselfüllgrad liegt deutlich niedriger als bei kleiner Blende. Zum besseren Verständnis sind in Bild 13 auch die zeitlichen Verläufe der durch die Blende abgeströmten Dampfmenge M_{Dbl} eingetragen. Die Differenz zwischen M_{Dbl} und M_{FK} wird durch die momentan im Sammelbehälter und in der Rückleitung gespeicherten Massen M_{Fsp} und M_{Dsp} sowie die nicht abgeschiedene Flüssigkeit $M_{Fverlust}$ gebildet, die mit dem Dampf durch die Blende abgeströmt ist. Im Rahmen der Genauigkeit der Versuchsauswertung war der Anteil von $M_{Fverlust}$ nicht meßbar und kann deshalb vernachlässigt werden.

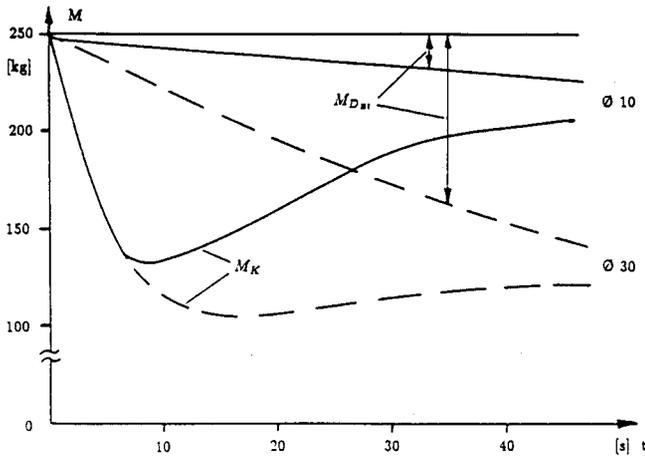


Bild 13: Zeitlicher Verlauf der Masse im Kessel während einer Druckentlastung mit Wiedereinspeicherung

Wie Muschelknautz [7] im Zusammenhang mit der Erprobung eines kesselinternen Umlaufsichters nachweist, liegt der Gesamtabscheidegrad über eine Druckentlastung

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{M_{\text{Fab}}}{\int_0^{t'} \dot{M}_{\text{FAdt}}} \quad (12)$$

zwangsläufig stets niedriger als der momentane Abscheidegrad

$$\eta' = \frac{M_{\text{Fab}}}{M_{\text{FA}}} \quad (13)$$

Aus der Beobachtung $M_{\text{Fverlust}} \approx 0$ folgt, daß der Gesamtabscheidegrad η nahe bei 1 liegt und deshalb auch der momentane Abscheidegrad des Umlenkabscheiders η' bei fast 100 % liegen muß. Die eingangs getroffene Annahme von $\eta' = 99\%$ ist in jedem Fall gerechtfertigt.

4.6 Beginn der Wiedereinspeicherung

Die Auslegung einer Druckentlastungsanlage zur Absicherung eines Kessels, in dem eine exotherme Reaktion abläuft, erfolgt nach der im Störfall abzuführenden Energiemenge. Durch die Art und Menge der verwendeten Reagenzien ergibt sich die Menge des abzuführenden Dampfstroms und damit auch die Blendengröße. Der Druckabfall in der Rohrleitung zwischen Kessel und Abscheider hängt von der Strömungsgeschwindigkeit und damit vom Rohrleitungsquerschnitt A ab. Somit läßt sich die Grenze für eine mögliche selbsttätige Wiedereinspeicherung in einem A/A^* über x_0 Diagramm darstellen [3]. Wenn das Flächenverhältnis A/A^* groß gewählt wird, herrscht in der Ausströmleitung eine geringe Dampfgeschwindigkeit. Dies führt zu einem relativ geringen Druckabfall und die Wiedereinspeicherung kann bereits zu einem früheren Zeitpunkt der Druckentlastung bei niedrigem Dampfgehalt x_0 erfolgen.

Bild 14 zeigt die Meßwerte für den Beginn der selbsttätigen Wiedereinspeicherung. Um den Verlauf der Wiedereinspeicherungsgrenze besser darstellen zu können, wurden hierfür zusätzliche Versuchsreihen mit 2 weiteren Blendendurchmessern von 16 mm bzw. 22 mm ausgewertet.

Eine genaue Analyse der Druckmessungen zeigt, daß die Öffnung des Rückschlagventils erst bei einem Überdruck von etwa 0,35 bar zwischen Flüssigkeitssäule und Kessel erfolgt.

Der Grund hierfür liegt in der Konstruktion des Rückschlagventils. Der Ventilteller wurde selbstschließend mit einer O-Ring-Dichtung ausgeführt. Im geschlossenen Zustand wird der O-Ring durch den Kesselüberdruck etwas flachgedrückt, so daß die Wirkungsflächen für den Kesseldruck und für den Druck der Flüssigkeitssäule verschieden groß sind. Da die Ventilöffnung jedoch bei Kräftegleichgewicht am Ventilteller erfolgt, gilt die Bedingung

$$p_{\text{Ruck}} \cdot A_2 = p_K \cdot A_1 \quad (14)$$

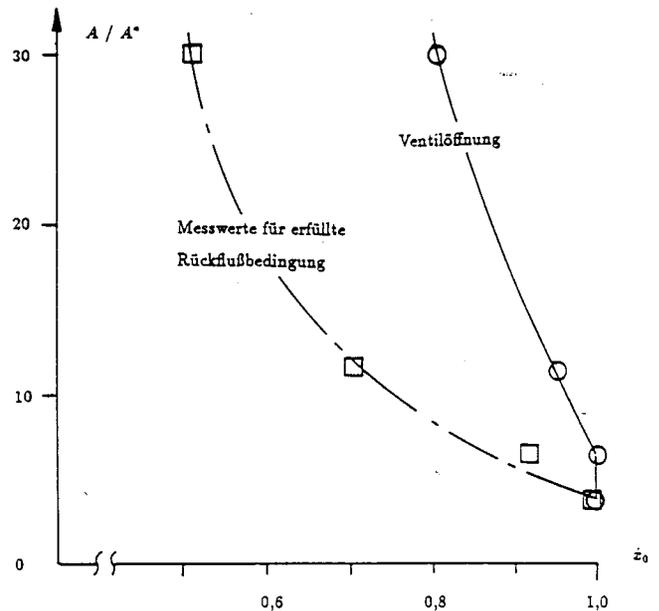


Bild 14: Grenze der möglichen Wiedereinspeicherung der abgeschiedenen Flüssigkeit für unterschiedliche Blendendurchmesser aufgetragen über dem Dampfgehalt am Kesselaustritt

Eine Differenz der Wirkungsgradien von 2,5 mm ergibt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Druckwerten bei Ventilöffnung. Eine Verminderung des Effektes kann erreicht werden, wenn z.B. eine scharfkantige Metall-Metall-Dichtung mit geringer Verformung für das Rückflußventil verwendet wird. Die Zeitpunkte, zu denen Druckgleichgewicht zwischen Rückleitung und Kessel herrscht, bezeichnen die Grenze der Wiedereinspeicherung mit einem idealen Ventil und sind ebenfalls in Bild 14 eingezeichnet. Die so erhaltene Grenzkurve liegt bei deutlich niedrigeren Dampfgehaltswerten und zeigt, daß der Beginn der Wiedereinspeicherung mit einer optimierten Ventildichtung wesentlich vorverlegt werden kann.

5. Zusammenfassung

Wenn in einem Chemiereaktor eine exotherme Reaktion außer Kontrolle gerät, erfolgt die nötige Energieabfuhr aus dem Reaktor in der Regel mit Hilfe einer Druckentlastung. Um zu verhindern, daß hierbei größere Mengen an toxischen oder explosiven Stoffen freigesetzt werden, muß die zusammen mit dem Dampf ausgetragene Flüssigkeit abgeschieden und aufgefangen werden. Der Schwerpunkt der hier vorgestellten Untersuchungen lag auf dem zeitlichen Verlauf der Druckentlastung mit selbsttätiger Wiedereinspeicherung der abgeschiedenen Flüssigkeit in den Kessel durch hydrostatischen Druckaufbau [3]. Im einzelnen sollte geklärt werden, wie stark die Druckentlastung durch die große Menge an wiedereingespeicherter Flüssigkeit in die Länge gezogen wird und wie lange der Massenausstrag zweiphasig erfolgt. Ferner sollte untersucht werden, ob die Wiedereinspeicherung kontinuierlich oder in mehreren Schüben abläuft. Die Versuche wurden mit dem Kältemittel R12 an einer Druckentlastungs-Versuchsanlage durchgeführt. Um die selbsttätige Wiedereinspeicherung zu ermöglichen, wurde ein spezielles Rückschlagventil konstruiert und gebaut, durch das die mit einem Umlenkabscheider separierte Flüssigkeit mit geringem Druckverlust in den Kessel zurückfließen kann.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Wiedereinspeicherung erst gegen Ende des zweiphasigen Ausströmens einsetzt, weil das Rückschlagventil wegen der konstruktionsbedingten Verformung der Ventildichtung erst bei einem gewissen Überdruck öffnet. Durch eine optimierte Ventildichtung läßt sich der für die Wiedereinspeicherung schädliche Überdruck gering halten und der Zeitpunkt der Ventilöffnung vorverlegen. Der Dampfstrom am Kesselaustritt geht aufgrund von Kondensation durch die rückfließende kühle Flüssigkeit bei Beginn der Wiedereinspeicherung stark zurück. Beim an-

schließenden Wiederanstieg infolge der Dampfverdrängung durch die eingespeicherte Flüssigkeit kommt es jedoch nicht zu einem erneuten Flüssigkeitsaustrag. Die Wiedereinspeicherung erfolgt kontinuierlich und wird erst mit dem vollständigen Rückfluß der abgetrennten Flüssigkeit in den Kessel beendet.

Schrifttum

- [1] Gossel, S.: Design and sizing of knock-out drums/catchtanks for reactor emergency relief systems. *Plant/Operations Progress*, Vol. 5, No. 3 (July 1986).
- [2] American Society of Petrol Engineers.
- [3] Muschelknautz, S.: Mechanische Phasentrennung bei Entspannungsverdampfung. Diss. TU München; VDI-Fortschrittsberichte Reihe 15, Nr. 71, VDI-Verlag Düsseldorf (1990).
- [4] Muschelknautz, S.: Protokoll d. GVT-Sitzung über Abscheiden von Flüssigkeiten aus Dampf bei Druckentlastung. Lehrstuhl A f. Thermodynamik, TU München, Mai 1983.
- [5] AIF-Antrag GVT-Projekt 8215 – „Abscheiden von Flüssigkeiten aus Dampf bei Druckentlastung“ 1983.
- [6] Klug, F.: Abscheidung und Wiedereinspeicherung von Flüssigkeiten aus Dampf bei Druckentlastung. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AIF 7403. München 1990.
- [7] Muschelknautz, S.: Abscheiden von Flüssigkeiten aus Dampf bei Druckentlastung. Abschlußbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 6148; München, 1988.
- [8] Chisholm, D.: *Int. J. Heat and Mass Transfer* 16, pp. 347 ff. (1973).