

# Druckveränderungen in Rohrleitungen von mit Ammoniak betriebenen Kälteanlagen beim Auftreten verschiedener Aggregatzustände

Dieter Stahlhut

## 1. Fallbeschreibung

Anlaß für die hier vorgelegte Arbeit war der Auftrag eines Versicherers, die Ursache eines Schadens an einer Rohrleitung der Kälteanlage eines Schlachthofes zu ermitteln, um die Ersatzpflicht zu klären.

Es handelte sich um eine

### **Ammoniak-Kälteanlage [1]**

Baujahr: 1972/77 (Erweiterung)

mit Verdampfern, Verflüssigern, Sammlern, Verdichtern und Rohrleitungen, im  $-30^{\circ}\text{C}$ -Kreislauf eingesetzt zur Kühlung eines Schocktunnels auf  $-12^{\circ}\text{C}$ ,

einschließlich aller Armaturen und Steuereinrichtungen.

Bei dieser Anlage ist nach Betriebsschluß beim Umschalten vom Schocktunnel-Kühlbetrieb auf Heißdampfbeschickung (zum Abtauen der Verdampfer) die Schweißnaht eines Rohrblindstutzendeckels in der Pumpenrücklaufleitung vollständig abgerissen und aus der entstandenen Öffnung Ammoniakdampf ausgeströmt.

Während der an der Einrichtung eingetretene Schaden relativ gering war, entstand durch Wasser, das die Feuerwehr – vermutlich zum Niederschlagen der Ammoniakdämpfe – versprüht hat, und durch Ammoniak selbst in Decke und Isolierung des unter dem Rohrsystem liegenden Schocktunnels ein Gebäudeschaden von ca. 180 000,- DM. Durch Herabtropfen der Ammoniak/Wasser-Lösung auf die im Schocktunnel befindliche Fleischware erhöhte sich der Schaden um weitere ca. 200 000,- DM.

Die Dimension des Gesamtschadens war letztlich für den Versicherer Anlaß, die Ersatzpflicht sachverständig feststellen zu lassen.

---

Dieter Stahlhut

Beratender Ingenieur

Von der Industrie- und Handelskammer zu Hannover öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Maschinen, insbesondere Holzbearbeitungsmaschinen

Mitglied des Bundes Technischer Experten BTE

## 2. Schadenursachen

Für den eingetretenen Schaden sind drei Ursachen denkbar:

1. Wasserstoffversprödung in der abgerissenen Schweißnaht (nicht ersatzpflichtig für den Feuerversicherer),
2. Explosion durch chemische Umsetzung (ersatzpflichtig für den Feuerversicherer),
3. Unzulässig hoher Druckanstieg im Rohr aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Ammoniak (bei plötzlichem Druckausgleich ersatzpflichtig für den Feuerversicherer).

Nachdem die durchgeführten Ermittlungen zu dem Ergebnis geführt hatten, daß eine Ersatzpflicht des Versicherers nicht gegeben war, hat die Versicherungsnehmerin durch Vorlage eines Gutachtens eine Explosion durch chemische Umsetzung behauptet, deren Folgen ersatzpflichtig gewesen wären. Aus diesem Grunde wurden weitere Untersuchungen erforderlich, die als Nebenergebnis interessante Aspekte zur Anwendbarkeit des DIN-Entwurfs 2903 vom Dezember 1960 „Richtlinien zur Beurteilung von Explosionsschäden an Behältern und Rohrleitungen“ geliefert haben, über die hier berichtet werden soll. Dazu ist es allerdings erforderlich, alle drei möglichen Ursachen zu diskutieren.

## 3. Wasserstoffversprödung

Im Rahmen der im Auftrag der Versicherungsnehmerin durchgeführten Schadenermittlungen ist eine stereomikroskopische Untersuchung der Bruchflächen des abgerissenen Rohrdeckels erfolgt. Das – zusammengefaßte – Ergebnis schließt einen Dauerbruch aus und weist auf Ausscheidungen im Gefüge der Schweißnaht hin.

Während eine Tieftemperaturversprödung [2] als Schadenursache nicht in Frage kommt, weil der Schaden bei Heißgasbetrieb eingetreten ist, lassen sich die festgestellten Ausscheidungen an den Korngrenzen und im Korn selbst unter Umständen als Wasserstoffversprödung in der Schweißnaht deuten – über solche Schäden existiert Literatur –, eine chemische Analyse des Schweißmaterials

sowie eine rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zum Nachweis dieser Theorie sind jedoch nicht durchgeführt worden. Im vorliegenden Fall wäre hieraus eine Ersatzpflicht des Feuerversicherers ohnedies nicht zu folgern gewesen.

Der zur Wasserstoffversprödung in der Schweißnaht benötigte Wasserstoff könnte aus einer Ammoniakzersetzung stammen. Wie jedoch im nächsten Abschnitt gezeigt wird, ist das höchst unwahrscheinlich, so daß diese Schadenursache ausgeschlossen werden kann.

## 4. Chemische Umsetzung

In dem von der Versicherungsnehmerin vorgelegten Gutachten kommt der Verfasser zu dem Schluß, Zitat: „daß es innerhalb des Verteilers zu einer Drucküberhöhung infolge einer Explosion durch chemische Umsetzung gekommen sein muß“ (Zitat Ende).

Dazu wird angeführt, daß Ammoniak bei  $260^{\circ}\text{C}$  und Anwesenheit von katalytisch wirkenden Verunreinigungen durch einen Anteil von 0,5% öligen, eisenhaltigen Wassers in Stickstoff und Wasserstoff zerfällt. Wenn aber diese Zersetzung stattgefunden hätte, so wäre weiterhin zu einer Explosion Luft erforderlich, da ein zündfähiges Wasserstoff/Luft-Gemisch [6] nur im Bereich von 4,1–75 Vol. % Wasserstoff in Luft existiert. Da aber die Anlage laut Betriebsanleitung und -beschreibung nicht mit Unterdruck gefahren wird, kann Luft nicht eindringen; aus Leckagen würde eher Ammoniak austreten.

Die Zündtemperatur für Wasserstoff/Luft-Gemische liegt bei  $539^{\circ}\text{C}$ . Temperaturen über max.  $110^{\circ}\text{C}$  treten jedoch beim Betrieb der Anlage nicht auf, so daß weder der zur Wasserstoffversprödung benötigte Wasserstoff freigesetzt ( $260^{\circ}\text{C}$ ) noch ein Wasserstoff/Luft-Gemisch gezündet werden kann.

### 4.1 Explosionsdruck

Es besteht kein Zweifel darüber, daß der Rohrdeckel durch Überdruck vom Rohrstutzen abgerissen wurde. Eine Berechnung des aufgetretenen Rohrrinnendrucks aus Gewicht von Deckel und Isolierung, der Ausgangshöhe und der

Entfernung zwischen Rohrende und Auf-treffstelle ist jedoch nicht möglich: Die Weitenangabe von 35 m (lt. Versiche-rungsnehmerin) ist nicht gesichert, denn der Rohrdeckel samt Rohrendstück wurde vor Beginn der gutachtlichen Ermittlungen von der Kriminalpolizei sichergestellt. Der Originalzustand unmittelbar nach Schadeneintritt konnte also zur Ursachenerforschung nicht her-angezogen werden. Weiterhin muß ver-mutet werden, daß der Rohrdeckel schon durch die Löschmaßnahmen der Feuer-wehr von seiner ursprünglichen Auftreff-stelle entfernt worden ist, z.B. durch Berührung mit dem Löschwasserstrahl.

Selbst bei gesicherter Weitenangabe ließe die Rechnung keine konkreten Rückschlüsse auf den aufgetretenen Explosionsdruck zu, weil die Abhängig-keit der Anfangsgeschwindigkeit des Rohrdeckels ( $V_0$ ) vom Gasdruck nicht oder nur mit so vielen ungesicherten Annahmen zu ermitteln ist, daß ein aus-sagekräftiges Ergebnis nicht zustande kommt.

#### 4.2 Explosionswirkung

Wäre es wirklich in der Anlage zu einer „örtlichen“ Wasserstoff/Luft-Explosion gekommen, dann überrascht es, daß aus-gerechnet ein Rohrdeckel an einer Quer-naht abgerissen ist. Bei normal aus-geführter Schweißnaht würde das Rohr eher längs aufreißen. (Auf die konstruk-tive Ausführung des Rohrdeckels als Soll-bruchstelle wird später eingegangen.) Wenn überhaupt Luft in der Anlage vor-handen war – vorstehend wurde erläutert, daß infolge des Überdruckbetriebes keine Luft in die Anlage eindringen kann! – könnte es nur sehr wenig gewesen sein. Wegen des im Verhältnis zur Menge des Ammoniak-Heißgases sehr kleinen Anteils von explosionsfähigem Wasser-stoff/Luft-Gemisch hätte aufgrund der Kompressibilität des Heißgases eher ein Verlauf der Druckwelle in Richtung Ver-dampfer und damit ein nur geringfügiger Druckanstieg innerhalb der Gesamtan-lage erwartet werden müssen.

Nach Abreißen des Rohrdeckels ent-stände andererseits beim Ausströmen von Ammoniak sofort ein brennbares Ammoniak/Luft-Gemisch, das durch die beim Explodieren von Wasserstoff/Luft-Gemischen auftretenden hohen Tempe-raturen mit Sicherheit gezündet worden wäre. Zu einem Feuer außerhalb der Anlage ist es aber bei dem hier behandel-ten Schadenereignis nicht gekommen.

Zusammenfassend bleibt zu folgern, daß diese Schadenursache – die eine Ersatz-pflicht des Feuerversicherers begründet hätte – wenig Wahrscheinlichkeit hat.

### 5. Unzulässig hoher Druckanstieg im Rohr aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Ammoniak

5.1 Physikalische Konstanten von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) [3], [9] (soweit für das Verständnis der nachstehend dargestellten Vor-gänge erforderlich)

Kritische Temperatur:  $T_k = 132,4^\circ\text{C}$   
 Kritischer Druck:  $p_k = 115,5 \text{ Atm.} = 113,31 \text{ bar}$   
 Siedepunkt:  $-33,35^\circ\text{C}$  bei Atmosphärendruck  
 Zünd-temperatur:  $630^\circ\text{C}$

5.2 Kenndaten des Kühlkreis-laufes [1]

Der Schaden hat sich im Bereich des  $-30^\circ\text{C}$ -Kältekreislaufs ereignet. Für diesen Kreislauf gelten nach den vorliegen-den Informationen:

Temperatur des Ammoniak in den Verdampfern:  $-30^\circ\text{C}$   
 Temperatur des Ammoniak in der Pumpenrücklaufleitung ( $\text{NH}_3$  flüssig und dampfförmig im Sättigungszustand):  $-30^\circ\text{C}$   
 Heißgastemperatur (überhitzter  $\text{NH}_3$ - Dampf):  $100^\circ\text{C}$   
 Heißgasdruck im Mittel:  $13 \text{ bar}$   
 Dampfdruck von Ammoniak bei  $-30^\circ\text{C}$ :  $1,195 \text{ bar}$

5.3 Verhalten von Flüssigkei-ten beim Verdampfen [7]

Erwärmt man eine Flüssigkeit bei kon-stantem Druck bis zu ihrem Siedepunkt, so beginnt sie unter erheblicher Volumen-

vergrößerung zu verdampfen, wobei Flüssigkeit und Dampf die gleiche Temperatur haben. Führt man weiter Wärme zu, so ändert sich die Temperatur zunächst nicht. Der Zustand, bei dem sich Flüssig-keit und Dampf im Gleichgewicht befin-den, wird als Sättigungszustand bezeich-net und dieser definiert durch Sättigungs-temperatur und Sättigungsdruck. Erst wenn die gesamte Flüssigkeit zu Dampf geworden ist, steigt die Temperatur wei-ter an und der Dampf geht aus dem gesät-tigten in den überhitzten Zustand über.

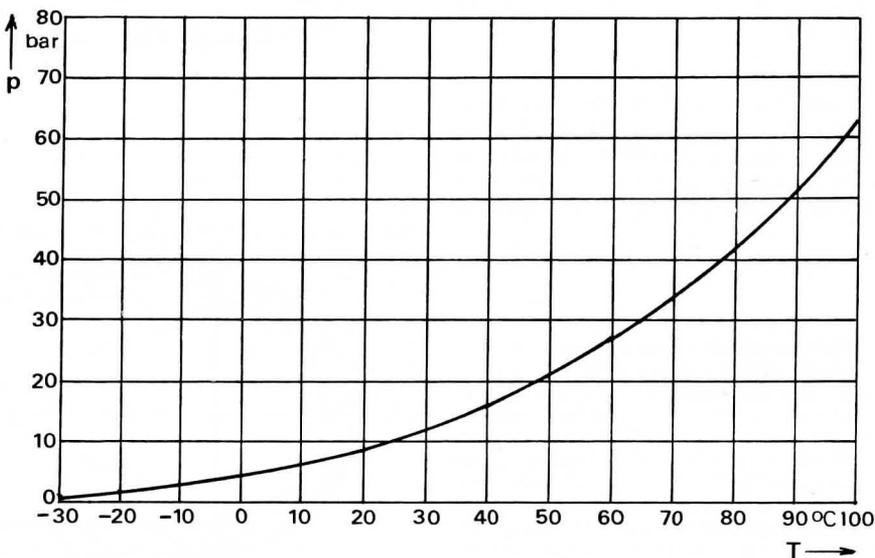
Führt man die Verdampfung unter Druckänderung durch, ändert sich die Verdampfungstemperatur: Wird der Druck erhöht, nimmt die Verdamp-fungstemperatur zu. Die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Sätti-gungstemperatur heißt Dampfdruckkur-ve [8], für Ammoniak ist diese als Über-sicht aufgezeichnet (Bild 1).

5.4 Betriebsvorgänge [1]

Zur Vereinfachung der Darstellung sei das Verhalten von Ammoniak nur für das vom Schaden betroffene Rohr und die darin vorkommenden Betriebszustände be-schrieben.

Beim Kühlvorgang wird dem Verdampfer flüssiges Ammoniak im Überschuß zuge-führt, um eine optimale Kühlleistung zu erhalten. Daher verdampft unter Beibe-haltung derselben Temperatur und des-selben Druckes ein Teil des Ammoniaks und gelangt aus dem Verdampfer über die Pumpenrücklaufleitung in den Sammler. In der Pumpenrücklaufleitung befindet sich also bei gleicher Temperatur und gleichem Druck sowohl flüssiges als auch gasförmiges Ammoniak im Sättigungs-zustand.

Bild 1. Dampfdruckkurve für  $\text{NH}_3$



Vor dem Abtauen wird der Kühlbetrieb unterbrochen und die Pumpenrücklaufleitung durch Ventile gegen flüssiges Ammoniak abgesperrt und entleert. Danach strömt in umgekehrter Richtung überhitzter Ammoniakdampf (Heißgas) aus dem Verdichter in den Verdampfer, so daß dieser durch Erwärmung von innen abtaut. Gleichzeitig kühlt sich das überhitzte Ammoniak durch Wärmeabgabe unter teilweiser Kondensation und Volumenverringering ab.

### 5.5 Schadenursache

Nach Ansicht des Verfassers kommt als Schadenursache allein das unbeabsichtigte Aufeinandertreffen von Ammoniak im Sättigungszustand bei  $-30^{\circ}\text{C}$  mit überhitztem Ammoniakgas (Heißdampf) von 13 bar bei  $100^{\circ}\text{C}$  in Frage. Hierzu kann z. B. die unvollständige Entleerung des Pumpenrücklaufrohres infolge Versagens oder Klemmens eines Absperrventils vor Beschickung des Rohres mit Heißgas geführt haben. Trifft das Heißgas auf das im Rohr verbliebene Ammoniak, so wird es zunächst unter Wärmeabgabe an dieses kondensieren und das kalte Ammoniak erwärmen, dessen flüssiger Anteil seinerseits an den Berührungsfächen zu verdampfen beginnt.

Das im Rohr in zwei Aggregatzuständen mit unterschiedlichen Temperaturen vorhandene Ammoniak strebt unter Wärmeaustausch einem Sättigungszustand (zwei Aggregatzustände bei gleicher Temperatur und dem dieser Temperatur korrespondierenden Sättigungsdruck) zu.

Bei 13 bar (Heißgasdruck) beträgt die Siedetemperatur von  $\text{NH}_3$  fast  $34^{\circ}\text{C}$ . Bis zum Erreichen dieser Temperatur wird der Rohrinneindruck von 13 bar durch die Anlage bestimmt. Die zur Aufheizung des flüssigen  $\text{NH}_3$  benötigte Energie kommt aus dem Heißdampf, der kondensiert und über die damit verbundene Volumenminderung die weitere Heißdampfzufuhr ermöglicht. Dieser Vorgang erfolgt kontinuierlich.

Bei Erreichen von  $34^{\circ}\text{C}$  im flüssigen  $\text{NH}_3$  findet keine Kondensation des Heißdampfes mehr statt, da sich das flüssige  $\text{NH}_3$  im Sättigungszustand befindet und das überhitzte Heißgas nicht mehr unter seine Siedetemperatur ( $34^{\circ}\text{C}$ ) abgekühlt

wird. Entsprechend dem Dampfdruckkurvenverlauf beginnt jetzt der Druck über 13 bar\* und damit aus den betriebsüblichen in kritische Bereiche zu steigen, weil die Energiezufuhr aus dem Heißgas (über Mischungsvorgänge) zum Verdampfen des im Rohr schon befindlichen  $\text{NH}_3$  führt. Diesem Druckanstieg folgen kontinuierlich Temperaturerhöhungen. Bei Erreichen eines einheitlichen Sättigungszustandes ist dieser Vorgang abgeschlossen. Abhängig von den Mengen- und Dichteverhältnissen wird der resultierende Sättigungszustand zwischen 13 bar bei  $34^{\circ}\text{C}$  und theoretisch maximal 63,53 bar bei  $100^{\circ}\text{C}$  liegen.

Für die aus den geschilderten Vorgängen entstehenden Drücke\* [4] ist das Kühlsystem mit Sicherheit nicht ausgelegt, und im vorliegenden Fall ist zwischen einem „Mischsättigungszustand“ von  $34^{\circ}\text{C}$  und 13 bar und dem theoretischen Endsättigungszustand von  $100^{\circ}\text{C}$  und 62,53 bar der Rohrdeckel abgesprengt worden. Infolge der entstandenen Öffnung konnte der Rohrinneindruck nicht mehr ansteigen, aber es hat kein plötzlicher Druckausgleich stattgefunden. Aus der Öffnung ist Ammoniakdampf wie aus einem Sicherheitsventil ausgeströmt (siehe „Raucherscheinungen“ als Brandhinweis für die Feuerwehr).

Zu einem plötzlichen Druckausgleich hätte es nur kommen können, wenn zum selben Zeitpunkt, zu dem die Öffnung entstanden ist, auch die Temperatur des flüssigen Ammoniaks schlagartig auf die dem Atmosphärendruck korrespondierende Siedetemperatur von  $-33,35^{\circ}\text{C}$  gefallen wäre. Da das unmöglich ist, muß gegenüber dem Atmosphärendruck ein von diesem verschiedener Innendruck im Rohr erhalten geblieben sein, bis alles flüssige Ammoniak im Rohr verdampft war. Dabei wirkt das Ammoniak dem öffnungsbedingten Druckabfall im Rohr, der zu seiner Überhitzung geführt hat, durch Abkühlung und damit verbundenes schnelleres Verdampfen entgegen.

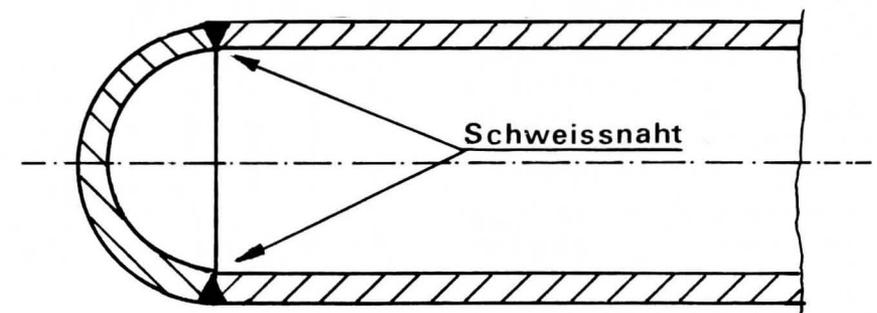
Der Zeitraum zwischen Entstehen der Öffnung und dem Druckloswerden des Rohres wäre berechenbar, würde man (unter anderem) die Menge des bei Schadeneintritt im Rohr vorhandenen flüssigen Ammoniaks und seinen Sättigungszustand kennen. Obwohl diese Daten nicht bekannt sind, folgt doch aus der theoretischen Berechenbarkeit oder Meßbarkeit des o.g. Zeitraumes der Gegensatz zur Plötzlichkeit.

Eine Explosion im Sinne der Feuerversicherungsbedingungen hat also nicht stattgefunden.

Bild 2. Schweißnahtausführung bei dem vom Schaden betroffenen Rohr.



Bild 3. Normale Ausführung der Schweißnaht bei stumpf geschweißten Rohrböden.



\* Hinweise auf einen Maximaldruck des Kühlsystems sind in der Betriebsanleitung nicht enthalten. Sie wären auch überflüssig, weil in den  $-45^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $-10^{\circ}\text{C}$ -Kreisläufen nur Drücke zwischen  $-0,65$  und  $+14,4$  bar vorkommen können, da sonst die Verdichter über Unter- und Überdruckschalter stillgesetzt werden. Der hier auftretende Druck baut sich jedoch durch die Energiezufuhr aus dem Heißgas auf und ist daher nicht anlagenspezifisch.

## 6. Bruchstelle

Mit Sicherheit ist der Bruch an der schwächsten Stelle des druckbeaufschlagten Anlagebereichs eingetreten, da sich bei Flüssigkeiten und Gasen im geschlossenen System der Druck nach allen Seiten gleichmäßig ausbreitet, die Innenwandbelastung folglich überall gleich ist. Da aber sowohl im Kesselbau als auch im Rohrleitungsbau die zulässige Quernahtbeanspruchung [2], [5] doppelt so groß ist wie die zulässige Längsnahtbeanspruchung, nimmt sich der Bruch an der eingetretenen Stelle – Abreißen eines stumpf aufgeschweißten Bodens – verwunderlich aus.

Der Versuch, die Schweißnaht nachzurechnen, ergab ebenfalls höhere zulässige Spannungen als für die Rohrwand selbst.

Andererseits widerspricht das im vorliegenden Fall durchgeführte stumpfe Aufschweißen eines Bodens an einem druckbelasteten Rohrende ohne Schweißnahtaufbereitung allen Gestaltungsregeln der Schweißtechnik [5] (Bild 2 und 3), weil der resultierende dreiachsige Spannungszustand für die Aufnahme von höheren Drücken sehr ungünstig ist.

Diese Auffälligkeiten führen zwangsläufig zur Frage nach dem Sinn einer solchen Konstruktion. Bei der nachfolgenden Untersuchung der Kältekreislaufschemazeichnung [1] der Anlage wurde festgestellt, daß alle Pumpenrücklaufleitungen in der gesamten Kälteanlage – und nur diese! – Blindrohrenden mit stumpfaufgeschweißten flach-gewölbten Böden haben und daß die jeweiligen Abgänge vor den Verdampfern zu den Hauptrücklaufleitungen nicht gerade, sondern über 90°-Krümmer angeschweißt sind.

Alle Pumpenrücklaufleitungen werden aber auch zum Abtauen der Verdampfer mit Heißgas beschickt. Das läßt die Vermutung zu, daß die Gefahr des unzulässig hohen Druckanstiegs beim Abtauvorgang herstellereitig bekannt war und die in Rede stehenden Blindrohrenden zum Schutz der Anlage bzw. der Verdampfer als Sollbruchstellen eingebaut worden sind.

\* Da der maximal entstehende Ausströmquerschnitt nicht größer als der doppelte Rohrquerschnitt sein kann, ist der DIN-Entwurf nur für Rohrleitungen mit mehr als 150 mm Durchmesser anwendbar. Explosionsartige Schäden an Rohrleitungen mit geringeren Durchmessern werden als Betriebsschäden angesehen bzw. fallen nicht in den Geltungsbereich des Entwurfs.

\*\* Der Einfluß der Rißlänge bleibt hier unberücksichtigt. Da jedoch Rohrleitungen selten ausschließlich waagrecht verlaufen und die Lage des Risses nur dann von Bedeutung ist, wenn er an der tiefsten Stelle des Rohres entsteht (Auslaufen des Ammoniaks), erscheint diese Vereinfachung zulässig.

## 7. DIN-Entwurf Nr. 2903

Im Verlauf des bisher Vorgetragenen wurde lediglich die Ursache des vorstehend dargestellten Schadenfalles ermittelt, und es gibt nur einen Hinweis auf den DIN-Entwurf zur Beurteilung von Rohrleitungsexplosionen, aus dem hier zitiert wird:

### 1. Explosionsdefinition

„Die Explosion (der Zerknall) eines mit Gas, Dampf und/oder über ihre Siedetemperatur bei Umgebungsdruck erwärmter Flüssigkeit gefüllten Behälters ist dadurch gekennzeichnet, daß infolge des Ausdehnungsbestrebens von Gasen oder Dämpfen die Wand des Behälters so weit aufreißt, daß durch Ausströmen von Gas, Dampf oder Flüssigkeit ein plötzlicher Druckausgleich zwischen dem Inneren des Behälters und der Umgebung stattfindet.“

### 2. Geltungsbereich für Rohrleitungen

„Im folgenden gelten als Rohrleitungen solche aus geschlossenen Rohren bestehenden Anlagenteile, die lediglich zur Fortleitung eines Gutes dienen und nicht zu den unter Abschnitt 1.1 genannten Behältern gehören.“

### 3. Befund

„Das Aufreißen einer Rohrleitung wird dann als Explosion angesehen, wenn der entstandene Ausströmquerschnitt mindestens 350 cm<sup>2</sup> beträgt.“

Um eine einfach anwendbare Beurteilungsgrundlage zu erhalten, wird in dem Entwurf das Kriterium Plötzlichkeit quasi ersetzt durch die Größe des Ausströmquerschnittes: Nur wenn bei dem Schadensvorgang der angegebene Mindestausströmquerschnitt erreicht wird, findet ein plötzlicher Druckausgleich statt, andernfalls lediglich ein mehr oder minder langsames Ausblasen.

Der Vollständigkeit halber sei hier also nachgetragen, daß das in Rede stehende Rohr einen Innendurchmesser von 76 mm hat, der entstandene Ausströmquerschnitt beträgt also 45,34 cm<sup>2</sup>. Da auf eine physikalische Schadenursache abgestellt wird, gilt in bezug auf den DIN-Entwurf die Formulierung „Ausdehnungsbestreben von Dämpfen und Gasen“, so daß hiernach eine Ersatzpflicht des Feuerversicherers nicht gegeben ist, weil der geforderte Mindestausströmquerschnitt von 350 cm<sup>2</sup> nicht erreicht wurde.

Allerdings stellt sich in diesem Zusammenhang folgende Frage: Was wäre geschehen, gäbe es diese Sollbruchstelle im System nicht?

Hierfür sind nur drei Möglichkeiten denkbar:

1. Der Schaden wäre nicht eingetreten.
2. Der Schaden hätte sich im Verdampfer ereignet.
3. Der Schaden wäre in der Pumpenrücklaufleitung an anderer Stelle eingetreten.

Die beiden ersten Möglichkeiten sind hier zu vernachlässigen. Ohne Schadenereignis (Fall 1) wären die Vorgänge unentdeckt geblieben, und ein Schaden im Verdampfer (Fall 2) hätte wohl so erhebliche Auswirkungen gehabt, daß für die Ursachenermittlung ganz andere Merkmale relevant geworden wären.

Aus Fall 3 ergibt sich der eigentliche Anlaß zu dieser Arbeit. Dazu sind die Gegebenheiten des Schadenereignisses wie folgt zu verallgemeinern:

„Es ist denkbar und theoretisch beweisbar, daß eine Rohrleitung von genügender Länge und einem Mindest-Innendurchmesser von 150 mm\*, die mit Ammoniak verschiedener Aggregatzustände, verschiedener Temperaturen und verschiedener Drücke absichtlich oder unabsichtlich beschickt wird, durch unzulässig hohen Druckanstieg mit einem Querschnitt von mehr als 350 cm<sup>2</sup> aufreißt, ohne daß ein plötzlicher Druckausgleich stattfindet.“\*\*

Diese Formulierung ist zulässig, wenn man sich vergegenwärtigt, wie ein solches Loch in einer Rohrleitung von 150 mm Durchmesser aussieht: Es hat – wobei Längsaufreißen vorausgesetzt wird – bei einer maximalen Breite von 150 mm (in der Mitte des Risses) eine Rißlänge von 466 mm. Eine Rißlänge von 500 mm z. B. würde nach dem DIN-Entwurf schon als hinreichendes Explosionskriterium gelten und genauere Untersuchungen überflüssig machen.

Bei einer (z. B. im vorliegenden Fall vorhandenen) Rohrlänge von mehr als 10 000 mm bliebe aber in den von der Öffnung entfernten Bereichen des Rohres ein Druckgradient infolge des Verdampfens von flüssigem Ammoniak erhalten.

Der Vorgang verläuft genau wie im beschriebenen Fall: Der durch die Öffnung entstehende Druckabfall führt zu einer Überhitzung des flüssigen Ammoniaks. Dieser Zustand ist instabil. Die Herstellung der Stabilität, das heißt, das Erreichen der dem jeweilig im Rohr herrschenden Druck analogen Siedetemperatur, erfolgt durch vermehrtes Verdampfen und wirkt damit dem Druckabfall entgegen, und zwar – abhängig vom entstandenen Öffnungsquerschnitt und den Strömungsbedingungen – so lange, bis das flüssige Ammoniak restlos verdampft ist. Erst dann ist der Druckausgleich zwischen Rohr und Umgebung abgeschlossen.

Für die Explosion von Dampfkesseln wird in der Literatur [10] Ähnliches beschrieben: Die Ausblasezeit ist einmal abhängig vom Anteil der flüssigen Phase am Gesamtvolumen, zum anderen von der Rißlage. Das bedeutet, je schneller sich die Flüssigkeit vermindert, also entweder durch Verdampfen oder Auslaufen (bei unterer Rißlage), desto eher kommt der Ausströmvorgang zum Stehen. Das heißt aber bei oberer Rißlage auch, daß der Druckausgleich erst beendet ist, wenn die gesamte Flüssigkeit durch Verdampfen und damit verbundenes Absinken der Temperatur Atmosphärendruck erreicht hat. Diesem entspricht bei Wasser eine Temperatur von 100 °C.

Bei dem hier behandelten Medium Ammoniak dauert dieser Vorgang jedoch deshalb länger – gleiche Mengen vorausgesetzt –, weil sich das Ammoniak auch bei Umgebungstemperatur noch immer in überhitztem Zustand befindet und der Druckgradient so lange bestehen bleibt, bis die Siedetemperatur bei Atmosphärendruck erreicht ist, nämlich – 33,5 °C.

Obwohl für Behälterexplosionen, insbesondere bei Dampfkesseln, die Einführung eines definierten Ausströmquerschnittes bei Annahme einer reinen Befüllung mit gasförmigen Stoffen nichts anderes bedeutet als die Vernachlässigung des Einflusses der flüssigen Phase auf die Ausströmzeit, so hat das als Vereinbarung selbstverständlich praktikable Vorteile gegenüber dem Zwang, den Begriff „plötzlich“ mathematisch definieren zu müssen. Wenn aber der Grund einer Rohrleitungsexplosion gerade im Auftreten eines Stoffes in zwei Aggregatzuständen mit unterschiedlichen Energiepotentialen innerhalb des Rohres besteht, ist es wohl nicht mehr zulässig, diese Tatsache zu ignorieren, zumal sich ja nach der Begriffsbestimmung Unterschiede ergeben: Während der Behälter (Kessel) seinen Inhalt „behalten“ soll, dient die Rohrleitung zur Fortleitung sowohl gasförmiger als auch flüssiger Stoffe.

Es gilt also auch hier das, was schon vorstehend unter „Schadenursache“ im letzten Abschnitt über die theoretische Bere-

chenbarkeit des Zeitraums zwischen dem Entstehen der Öffnung und dem Druckloswerden des Rohres gesagt worden ist.

Da es aber wissenschaftliche Praxis ist, aus der Anwesenheit eines – wenn auch spezifizierten – Widerspruchs gegen eine Theorie auf die Denkbarekeit auch anderer Widersprüche zu schließen und die Theorie damit als widerlegt zu betrachten, folgt aus der vorgetragenen Darstellung die Fragwürdigkeit der generellen Anwendbarkeit des zitierten DIN-Entwurfes zur Beurteilung von Rohrleitungsexplosionen.

### 8. Folgerungen für die Regulierungspraxis

In der Praxis der Schadenregulierung von Rohrexlosionen wird es künftig in vielen Fällen erforderlich sein, unabhängig von der Größe entstandener Ausströmungsquerschnitte die der „Explosion“ vorausgehenden Vorgänge zu analysieren und das für die Ersatzpflicht ausschlaggebende Kriterium „Plötzlichkeit“ exakt zu definieren.

Zwar wird im Normentwurf selbst auf seinen Richtliniencharakter in Verbindung mit den im Einzelfall vorliegenden besonderen Umständen hingewiesen, und auch in der begleitenden Literatur [10] finden sich Hinweise auf die Notwendigkeit der sorgfältigen Beurteilung aller einschlägigen Merkmale bei Grenzfällen, aber vielfach ist es zur Gewohnheit geworden, die Ersatzpflicht bei Explosionsschäden ausschließlich aus der Rißgröße zu folgern. Der hier diskutierte DIN-Entwurf ist für den erfahrenen Sachverständigen als Werkzeug sicher hilfreich, weil dieser sich nicht nur auf das Messen beschränkt, sondern auch die aus dem Umfeld resultierenden Einflüsse berücksichtigt. Wegen der anscheinend einfachen Anwendbarkeit des Entwurfes wird jedoch vom Laien leicht übersehen, daß durchaus die Gefahr besteht, zu Fehlurteilen zu kommen, die das Verhältnis zwischen Versicherer und Versichertem belasten, weil sie im Widerspruch zu dem durch die Explosionsklausel gewährten Versicherungsschutz stehen.

### Literaturverzeichnis

- [1] Betriebsanleitung der vom Schaden betroffenen Anlage
- [2] AD-Merkblätter BO (1977/79), B1 (1977/79), B10 (1977), W10 (1976), HPO (1982), W12 (1977)
- [3] Handbuch der gefährlichen Güter, 1970, 1974, 1980: Merkblätter 27, 26a, 26
- [4] DIN 8965, Seite 7
- [5] G. Niemann: Maschinenelemente, Neudruck 1955
- [6] Hütte II A, Maschinenbau, 28. Auflage
- [7] E. Schmidt, Thermodynamik, 7. Auflage, 1958
- [8] L. Haar and J. S. Gallagher: Thermodynamik Properties of Ammonia, 1978, S. 635–792
- [9] Ullmann 3
- [10] W. Bergmann, Behälterexplosionen, Sonderdruck aus „Zeitschrift für die gesamte Versicherungswirtschaft“, 4/1965