

KB 025
kurz & bündig



Druck und Druckentlastung

Gefährdungen in Prozessanlagen

VISION ZERO.
NULL UNFÄLLE – GESUND ARBEITEN!

Bei der Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen müssen Aspekte des Drucks in verschiedenen Facetten berücksichtigt werden. Denn unzulässiger Über- bzw. Unterdruck kann schwere Schäden verursachen und Menschen gefährden.

Druck – eine spezielle Form der Energie

Ein beliebtes Spiel an Kinderfesten: Luftballone aufblasen. Wer schafft es als erstes, mit einem lauten Knall den Ballon zum Platzen zu bringen? Auf die Mechanik reduziert: hier wird durch Aufblasen Luft verdichtet und somit Pusten in gespeicherte Energie umgewandelt, die dann bei Überschreiten der Festigkeitsgrenzen zu einer Druckwelle mutiert und als Schall bzw. Knall wieder entspannt.

Ähnlich verhält es sich, wenn Gase oder Flüssigkeiten mittels Pumpen in einem Behälter verdichtet werden – und sei es nur, um die angegebene Druckfestigkeit zu beweisen. Der Unterschied zwischen einer Flüssigkeit und einem Gas liegt in der gespeicherten Energie. Weil Flüssigkeiten nahezu inkompressibel sind, reicht wenig Energie aus, um hohe Drücke zu erzeugen. Anders sieht es aus bei den Gasen: hier muss richtig viel Energie aufgewandt werden, die wiederum im System gespeichert und beim Bersten freigesetzt wird. Ein Größenvergleich: Bei einem Rauminhalt von 2000 Liter und einem Druck von 100 bar kann eine Flüssigkeit eine Masse von 100 Tonnen knapp drei Zentimeter anpuffen bzw. auf 2,7 km/h beschleunigen, ein Gas die gleiche Masse rund 180 Meter hoch schleudern bzw. auf 210 km/h beschleunigen. Ein Gas unter Druck enthält somit rund 10.000 mal mehr Energie als eine Flüssigkeit unter Druck!

Ereignis: Tankverlagerung bei Druckprüfung

(Quelle: <http://sache.org/beacon/files/2007/10/de/read/2007-10-Beacon-German-s.pdf>)

In einer Anlage wurden Druckprüfungen mit Luft an einer Leitung durchgeführt. Die Leitung war mit einem Tank verbunden. Sie war zum Tank hin nicht abgesteckt, sondern nur durch eine Armatur getrennt. Die Armatur wurde undicht. Im Tank baute sich Druck auf. Der Tank wurde überdrückt. Er riss am Boden auf, hob ab und landete oben auf der Anlage.



Abbildung 1: Abheben eines Tanks infolge Überdrucks

Fragen zur Druckentstehung

- › Für welchen Druck ist der Behälter ausgelegt bzw. zugelassen?
- › Welchen Druck können die angeschlossenen oder internen Druckerzeuger aufbauen?
- › Ist die Druckanstiegsgeschwindigkeit bekannt?
- › Sind andere Apparate angeschlossen?
- › Welche Druckzulassung haben diese, welche die verbindenden Rohrleitungen?
- › Ist die Überschreitung des zugelassenen Druckes durch Einrichtungen der Prozessleittechnik zuverlässig verhindert?

Wie in Behältern Druck entstehen kann

Ein Druckaufbau, der möglicherweise zu einer Überschreitung des zulässigen Betriebsdruckes führen kann, ergibt sich beispielsweise durch

- › Verbindung mit Anlagenteilen, die ein höheres Druckniveau besitzen, z. B. Ringnetze für Stickstoff oder Medien,
- › Verbindung mit Anlagenteilen, die geodätisch höher stehen und so einen hydrostatischen Druck erzeugen, z. B. Vorlagen und Vorratsbehälter,
- › Überschreitung des zulässigen Füllgrades, z. B. mittels Pumpen,
- › Überschreitung des zulässigen Fülldrucks, z. B. mittels Verdichter,
- › behinderte Wärmeausdehnung eingeschlossener Flüssigkeiten oder von Gasen in Flüssigphase,
- › Fördern gegen geschlossene Armaturen,
- › abgesperrte oder verstopfte Entlüftungsleitungen, Gaspendelleitungen oder Flammensperren,
- › Ausfall bzw. Fehlfunktion von Steuer- oder Regeleinrichtungen,
- › externe Wärmeeinwirkung durch Brand,
- › Explosionen in der Gasphase durch Zündung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre,
- › exotherme chemische Synthese- oder Zerfallsreaktionen,
- › physikalische Explosionen, die beim Kontakt von kalten Flüssigkeiten mit heißen Schmelzen bzw. Flüssigkeiten (z. B. Metallschmelzen, organische Wärmeträgeröle), deren Temperatur über der Siedetemperatur der kalten Flüssigkeit liegt, entstehen können oder
- › Druckstößen, z. B. durch Flüssigkeitsschlag und Kavitation.

Diese umfassende Aufstellung ist in Analogie der Technischen Regel für Betriebssicherheit TRBS 2141 „Gefährdungen durch Dampf und Druck“ entnommen. Sind entsprechende Druckquellen im Betrieb vorhanden, müssen sie dem zulässigen Betriebsdruck gegenübergestellt werden. Kann dieser überschritten werden, sind geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen.

Ereignis: Druckstoß infolge spontaner Verdampfung

(Quelle: <https://processnet.org/ereignisdb.html>, Ereignis 08/1998)

Beim Anfahren einer Anlage kam es durch eine kurzzeitige Druckspitze zum Bruch einer Manometermembran und zum Austritt von flüssigem Propylen. Eine Zündung der Gaswolke konnte vermieden werden, weil die betreffende Anlage explosionsgeschützt ausgerüstet war. Außerdem verhinderte ein durch das gleichzeitige Ansprechen mehrerer Gasdetektoren aktivierter Dampfvorhang eine Ausbreitung der Wolke in Richtung der Zündquellen in den Elektro-Schalträumen.

Wie konnte es zu dem Ereignis kommen?

Die Warmwasser-Beheizung eines Vorwärmers war während einer mehrstündigen Betriebsunterbrechung nicht abgestellt worden. Der Inhalt des betreffenden Apparates war inzwischen verdampft. Als der leere Wärmetauscher beim Anfahren wieder geflutet wurde, kam es an der heißen Oberfläche zu einer spontanen Verdampfung mit sehr steilem Druckanstieg. Die vorhandenen Sicherheitsventile sprachen zwar an, konnten jedoch den kurzzeitig sehr hohen Massenstrom nicht abführen, sodass das Manometer als schwächstes Glied versagte.

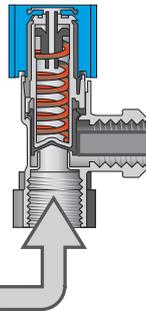
Ereignis: Behälterschaden durch plötzlichen Druckanstieg

(Quelle: <https://processnet.org/ereignisdb.html>, Ereignis 02/2000)

In einer mit Dampf beheizten Vorlage musste das Produkt aufgrund des gestörten betrieblichen Ablaufs längere Zeit bei ca. 80 °C aufbewahrt werden. Nach 5 Tagen kam es zu einem plötzlichen Druckanstieg, der zur Beschädigung des Behälters und einer Stofffreisetzung führte.

Wie konnte es zu dem Ereignis kommen?

Die Beheizung auf 80 °C erfolgte durch wiederholtes kurzzeitiges Aufheizen mit Dampf. Die Heizmitteltemperatur betrug ca. 130 °C. Die Vorlage wurde nicht gerührt. Der vorhandene Rührer war seit Tagen defekt, die Reparatur hatte sich verzögert. Somit konnte es in wandnahen Bereichen zu Produkttemperaturen oberhalb von 80 °C kommen, was zu einer unzulässig hohen Temperaturbeanspruchung des Produktes und langfristig zur Zersetzung führte.



Fragen zur Druckentlastung

- › Welche Kriterien wurden bei der Auswahl der Druckentlastungseinrichtung (Sicherheitsventil/Berstscheibe) zugrunde gelegt?
- › Erfolgte die Dimensionierung entsprechend Aggregatzustand und Füllstand, wurde ein- oder mehrphasiges Ausströmen berechnet?
- › Wurde die Möglichkeit des Verklebens/Verkrustens der Druckentlastungseinrichtung bedacht?
- › Wurden Maßnahmen getroffen, damit die Leitung nicht durch Ausfrieren oder Auskondensieren verstopfen kann?
- › Wurde bei der Auslegung der Entspannungsleitung die mechanische Beanspruchung durch den Impuls berücksichtigt?
- › Wurde bei langen und verwinkelten Leitungen sowie bei verbundenen Systemen der mögliche Gegendruck berücksichtigt?

Was bei einer Druckentlastung schief gehen kann

Häufig sind Druckbehälter „ab Werk“ bereits mit einer Druckentlastungseinrichtung ausgestattet, die als Schutz gegen einen Überdruck vorgesehen ist. Bei der Einbindung eines Druckbehälters in verfahrenstechnische Anlagen ist zu prüfen, ob alle möglichen druckerzeugenden Effekte mit dem vorhandenen Sicherheitsventil bzw. der Berstscheibe beherrscht werden können.

Damit die Funktion des Sicherheitsventils gewährleistet ist, darf der Ansprechdruck nicht durch Manipulation der Feder erhöht werden. Und das Ventil muss regelmäßig gewartet werden. Die Zeitabstände der Kontrollen sind abhängig von den inneren und äußeren Umgebungsbedingungen, beispielsweise, ob besonders korrosive oder verklebende Medien gehandhabt werden. Besteht die Gefahr der Korrosion oder des Verklebens, kann das Ventil gegebenenfalls mittels einer vorgelagerten Berstscheibe vor einem Medienangriff geschützt werden.

Bei der Auslegung ist weiterhin zu berücksichtigen, ob eine reine Einphasenströmung abzuleiten ist oder gegebenenfalls eine Mehrphasenströmung zu beherrschen ist, die den wirksamen Entlastungsquerschnitt erheblich beeinträchtigen und in der Folge zu einem Versagen des Druckbehälters führen kann. Diese Frage kann meist nur unter der Annahme von vielen Randbedingun-

gen beantwortet werden. Dazu zählen Stoffdaten, geometrische Abmessungen von Einrichtungen oder auch eine Erwartung von physikalischen Abläufen bei einem Ereignis. Entsprechende Kriterien sind daher u. a. die Medien mit ihrem Aggregatzustand und Füllstand im Druckbehälter sowie deren Neigung zum Schäumen und Aufwallen. In der Regel sollte von einer Mehrphasenströmung ausgegangen werden, wenn der Füllstand im Behälter 70 % übersteigt.

Informationen zu dieser Thematik finden sich beispielsweise von EURISG, der European Industrial Sizing Group (siehe <https://cse-engineering.de/eurisg/berichte/>) oder im Leitfaden TAA-GS-18 des Technischen Ausschusses für Anlagensicherheit.

Die bei dem Ansprechen der Druckentlastungseinrichtung austretenden Medien üben einen Impuls auf das nachgeschaltete Rohrleitungssystem aus, der sich im Wesentlichen aus dem Druck, der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit und dem Aggregatzustand der austretenden Medien ergibt. Insbesondere Rohrbögen und Verjüngungen haben sich in der Vergangenheit immer wieder als Schwachstellen eines solchen Systems herausgestellt. Reißt die Halterung ab und die Rohrleitung auf, kommt es in der Regel zu einem Produktaustritt innerhalb des Produktionsgebäudes. In dem Video „Druckbildende Reaktionen“ der BG RCI (unter www.bgrci.de/gase-unter-druck/startseite/medien/videos/) ist zu sehen, wie es zu einem solchen Leitungsabriss kommt.

Ein weiterer Gefährdungsfaktor, der insbesondere bei der Verbindung mehrerer Sicherheitsventile in einer Sammelleitung zu berücksichtigen ist, gilt dem Aspekt des möglichen Gegendruckes. Kommt es in einer Abblaseleitung zu Kondensationseffekten, könnte sich Kondensat je nach Einbindung der einzelnen Leitungen auf der vermeintlich drucklosen Seite des Sicherheitsventils sammeln und so die Ableitung behindern, was zu einem ungeplanten Druckanstieg in dem Behälter führen kann. Dieser Effekt muss durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Auch die Möglichkeit, dass mehrere Druckentlastungseinrichtungen gleichzeitig ansprechen und so der effektive Rohrleitungsquerschnitt verkleinert wird, bedarf einer sicherheitstechnischen Diskussion. Insbesondere so genannte „common-cause-Fehler“ (Abweichungen mit gemeinsamer Ursache) sind hier zu hinterfragen, wenn beispielsweise aufgrund eines Stromausfalls an allen angeschlossenen Behältern gleichzeitig der Rührer oder die Kühlmittelpumpe ausfällt. Die entsprechenden Ursachen und Auswirkungen sind betriebsspezifisch zu klären.

Fragen zur Ableitung der austretenden Medien

- › **Nach welchen Kriterien wurden Ausblaseort und -richtung festgelegt?**
- › **Wurden dabei die Gefahrstoffeigenschaften sowie die Temperatur der austretenden Medien berücksichtigt?**
- › **Wird regelmäßig kontrolliert, dass der Auslass der Leitung nicht durch Wespen- oder Vogelnester behindert ist?**
- › **Wie wird ein Ansprechen der Druckentlastungseinrichtung erkannt?**

Was bei einer Freisetzung von Medien zu beachten ist

Bei Freisetzung von Medien können beispielsweise Gefährdungen durch Freistrahlimpulse, Ersticken, Vergiften, Verätzen, Verbrennen oder Erfrieren für Beschäftigte oder Dritte auftreten.

Nach TRBS 2141 „Gefährdungen durch Dampf und Druck“ muss die Gefährdungsbeurteilung daher bei der Ableitung aus Sicherheitsventilen, Berstscheiben, Druckentlastungsklappen, Entlüftungs- und Entspannungsleitungen berücksichtigen:

- › gefährliche Konzentrationen an Arbeitsplätzen bei gefährlichen Stoffen und Gemischen nach der Gefahrstoffverordnung,
- › Überschreitung von anerkannten Grenzwerten in der Atmosphäre, bei Stoffen und Zubereitungen mit Eigenschaftsmerkmalen nach der Gefahrstoffverordnung (z. B. Werte nach AEGL-2 [Acute Exposure Guideline Levels] oder ERPG-2 [Emergency Response Planning Guidelines]),
- › Bildung von explosionsfähiger Atmosphäre,
- › Medienbeaufschlagung bei Stoffen ohne Eigenschaftsmerkmale nach der Gefahrstoffverordnung (z. B. Verdrängung von Luftsauerstoff durch inerte Gase).

Zur Bewertung der Gefährdungen infolge Ableitens von Medien aus Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung kann beispielsweise wie folgt vorgegangen werden:

- › Einteilung der Medien in Abhängigkeit von der Einstufung in Gefahrenklassen nach der Gefahrstoffverordnung. Bei Gasen und Dämpfen ohne solche Gefährlichkeitsmerkmale müssen auch Gefahren durch Verdrängung des Luftsauerstoffs berücksichtigt werden.

- › Ermittlung der maximal freisetzbaren Stoffmenge, bestimmbar über den Massenstrom an der Austrittsstelle und die maximale Ausblasedauer, gegebenenfalls das Volumen des Apparates,
- › Bestimmung der Freisetzungsbedingungen, welche sich ergeben aus Ort, Richtung und Höhe der Austrittsöffnung, den Aggregatzustand und die Temperatur der Stoffe, den Impuls der Austrittsströmung (Richtung, Geschwindigkeit) und die Umgebungssituation,
- › Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens mit Hilfe anerkannter Modelle zur Freistrahlm- und atmosphärischen Ausbreitung,
- › Abschätzung des zeitlichen Verlaufes und der Höhe der Konzentration eines Stoffes am Aufpunkt in Abhängigkeit von der Entfernung des Quellterms,
- › Vergleich der Konzentrationen am Aufpunkt mit anerkannten Grenzwerten (z. B. AEGL-2 oder ERPG-2 Konzentrationsleitwerte bzw. UEG-Grenzwerte (untere Explosionsgrenze) bei brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln).

Eine gefahrlose Ableitung in ein Behandlungssystem ist vorzusehen, wenn eine Ableitung in die Atmosphäre ohne weitere Maßnahmen oder aufgrund einer Überschreitung der Grenzwerte nicht zulässig ist (siehe Anhang zur TRBS 2141). Beispiele hierzu sind:

- › Gezielte Ableitung in ein Entsorgungssystem, z. B. bei akut toxischen (Kategorie 3) Fluiden. Zu den Entsorgungssystemen zählen beispielsweise Abscheider, Wäscher, Fackeln, thermische Abgasreinigung.
- › Gezielte Ableitung in geschlossene Auffangsysteme, z. B. bei akut toxischen (Kategorie 1, 2) oder karzinogenen (Kategorie 1A, 1B) Fluiden.



Abbildung 2: Fackeln dienen der gefahrlosen Ableitung von Stoffen

Auch Unterdruck kann Probleme bereiten

Neben dem Überdruck kann es auch Unterdruck sein, der für Schäden an der Anlage verantwortlich ist. Insbesondere Flachbodentanks können relativ leicht beschädigt werden, wenn bei der Entleerung nicht für einen Druckausgleich gesorgt wird.

Eine Unterschreitung des zulässigen Betriebsdrucks ist beispielsweise möglich infolge von

- › Abkühlung von Flüssigkeiten,
- › Auskondensieren von Dämpfen,
- › Saugseitige Verstopfung von Filtern,
- › Entleerung des Druckgerätes.

Als Unterdruckabsicherung können neben Belüftungsventilen auch Berstscheiben mit niedrigen Ansprechdrücken eingesetzt werden.

Ereignis: Lagertank durch eingetauchte Be- und Entlüftungsleitung zusammengezogen

(Quelle: <https://processnet.org/ereignisdb.html>, Ereignis 01/2014)

In einem Unternehmen wurde im laufenden Betrieb die routinemäßige Dichtheitsprüfung an einer Tankwanne durchgeführt. Dazu wurde Wasser in die Tankwanne gefüllt. Als aus einem in der Tankwanne stehenden Tank Natronlauge entnommen wurde, zog sich dieser zusammen.

Wie konnte es zu dem Ereignis kommen?

Die Be- und Entlüftungsleitung des Tanks war vor einigen Jahren vom Tankdom aus rund 10 m Höhe bis knapp über den Boden der Tankwanne geführt worden. Durch diese Maßnahme sollte im Falle einer Tanküberfüllung ein Verspritzen von Natronlauge durch die Be- und Entlüftungsleitung vermieden werden. Als am Tag des Ereignisses mit der Entnahme begonnen wurde, befand sich die Öffnung der Be- und Entlüftungsleitung unbemerkt unter dem Wasserspiegel der für die Dichtheitsprüfung gefüllten Tankwanne. Bei der Entnahme von Natronlauge aus dem Tank entstand im Inneren Unterdruck. Da der Tank nicht vakuumfest war, zog sich die Tankhülle zusammen.

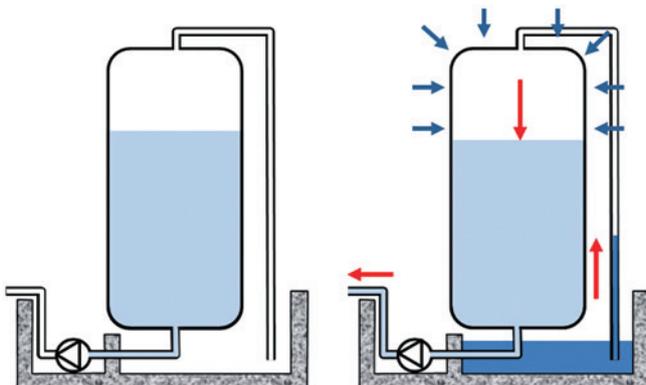


Abbildung 3: Zusammenziehen einer Tankhülle durch Unterdruck

Ereignis: Schaden an einem Tankfahrzeug

(Quelle: <http://sache.org/beacon/files/2017/07/de/read/2017-07-%20Beacon-%20German-s.pdf>)

Ein Tankwagen wurde vom Speditionseigner selbst mit einem Schlauchanschluss ausgerüstet, sodass die Stickstoffbeaufschlagung angeschlossen werden konnte, ohne dass eine Person auf den Tankwagen steigen musste. In der Stickstoffleitung befand sich nun ein Ventil, dessen Bedienung der TKW-Fahrer missverstanden und es geschlossen ließ, als er den TKW für die Entladung vorbereitete. Der TKW wurde mittels einer Pumpe entleert und da kein Stickstoff zum Druckausgleich einströmte, entstand Unterdruck, durch den sich der Tank folgenscherwer zusammenzog.



Abbildung 4: Zusammenziehen eines Tanks durch Unterdruck

Ereignis: Behälterschaden

(Quelle: <http://downloadcenter.bgrci.de/shop/ivss>, IVSS, Sektion Chemie, Broschüre „Instandhaltung und Änderungen. Besondere Gefährdungen und Risiken bei Prozessanlagen - Hinweise für die Praxis“)

Ein 1000 m³ großer Lagerbehälter wurde zur Verschrottung vorbereitet. Dazu wurde er mit Wasser gespült und mit Wasserdampf „ausgekocht“. Bei einem einsetzenden Gewitterregen nach dem Reinigungsschritt wurde die Wandung des Behälters eingezogen und deformiert.

Wie konnte es zu dem Ereignis kommen?

Zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen während des Ausdampfens hatte jemand in guter Absicht die offenen Flansche mit Aluminiumfolie abgedeckt. Durch den heftigen Gewitterregen kühlte sich der Behälter plötzlich stark ab. Dadurch kondensierte der Wasserdampf an der Behälterinnenwand, ohne dass durch die abgedeckten Flansche im gleichen Maße Luft von außen nachströmen konnte. Der Behälter wurde durch den Unterdruck stark eingezogen.

Bildnachweis:

Titelbild: BG RCI

Abbildung 1 und 4:

American Institute of Chemical Engineers (AIChE), www.aiche.org

Abbildung 2:

BASF SE, 67056 Ludwigshafen

Abbildung 3:

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., www.dechema.de

Postfach 10 14 80
69004 Heidelberg
Kurfürsten-Anlage 62
69115 Heidelberg
www.bgrci.de

Diese Schrift können Sie über den Medienshop unter medienshop.bgrci.de beziehen.

Haben Sie zu dieser Schrift Fragen, Anregungen, Kritik? Dann nehmen Sie bitte mit uns Kontakt auf.

- › Schriftlich:
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Prävention, KC Präventionsprodukte und -marketing, Referat Medien
Postfach 10 14 80, 69004 Heidelberg
- › E-Mail: praeventionsprodukte@bgrci.de
- › Kontaktformular: www.bgrci.de/kontakt-schriften

VISION ZERO.

NULL UNFÄLLE – GESUND ARBEITEN!

Die VISION ZERO ist die Vision einer Welt ohne Arbeitsunfälle und arbeitsbedingte Erkrankungen. Höchste Priorität hat dabei die Vermeidung tödlicher und schwerer Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten. Eine umfassende Präventionskultur hat die VISION ZERO zum Ziel.

Weitere Informationen



Merkblatt R 002: Maßnahmen der Prozesssicherheit in verfahrenstechnischen Anlagen (DGUV Information 213-064)¹



Merkblatt R 003: Sicherheitstechnische Kenngrößen – Ermitteln und bewerten (DGUV Information 213-065)¹



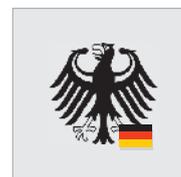
Merkblatt R 004: Thermische Sicherheit chemischer Prozesse (DGUV Information 213-067)¹



Merkblatt R 007: Lehren aus Ereignissen – Sicherheitstechnische Erkenntnisse für die Bewertung chemischer Reaktionen und thermisch sensibler Stoffe¹



Broschüre ISSA-04: Instandhaltung und Änderungen. Besondere Gefährdungen und Risiken bei Prozessanlagen – Hinweise für die Praxis²



Technische Regel für Betriebssicherheit TRBS 2141: Gefährdungen durch Dampf und Druck³



Technischen Anleitung TAA-GS-18: Anleitung zur strömungstechnischen Auslegung der Entlastungseinrichtungen für druckführende Anlagenteile⁴



Merkblatt KAS-14: Verstopfung von Rohrleitungen⁴



Ereignis-Datenbank von DEHEMA und ProcessNet⁵



Process Safety Beacons des Center for Chemical Process Safety⁶

Bezugsquellen:

- ¹ medienshop.bgrci.de
Mitgliedsbetriebe der BG RCI können alle Schriften der BG RCI in einer der Betriebsgröße angemessenen Anzahl kostenlos beziehen.
- ² Freier Download unter downloadcenter.bgrci.de und <https://safety-work.org>
- ³ Freier Download unter www.baua.de
- ⁴ Freier Download unter www.kas-bmu.de
- ⁵ Freier Zugriff (in Deutsch und Englisch) unter <https://processnet.org/ereignisdb.html>
- ⁶ Zugriff unter www.aiiche.org/ccps/resources/process-safety-beacon und <http://sache.org/>