Leybold

Vakuum-Sicherheitshandbuch

Sicherheitshandbuch

Gebrauchsanleitung 300314311_001_C1

Übersetzung der ursprünglichen Anleitung

Hinweis zum Urheberrecht

©Copyright 2026. Alle Rechte vorbehalten.

Veröffentlicht: 9/9/2026

Inhalt

1 Einführung. 6

1.1 Umfang dieser Publikation 6

1.2 Gefahrenanalyse 7

1.3 Das Auftreten von Gefahren. 7

1.3.1 Aufbau 8

1.3.2 Bauweise. 8

1.3.3 Betrieb/Inbetriebnahme. 8

1.3.4 Wartung/Außerbetriebnahme. 9

2 Chemische Gefahrenquellen. 10

2.1 Gefährliche Prozessgase 10

2.2 Chemische Reaktionen. 10

2.2.1 Homogene Reaktionen. 10

2.2.2 Heterogene Reaktionen. 10

2.2.3 Überkreuz-Verunreinigung. 11

2.3 Zündfähige/explosionsgefährdete Materialien. 12

2.3.1 Explosionsgefahren. 13

2.3.2 Quellen potenziell gefährlicher Gas- oder Dampfgemische. 15

2.3.3 Vermeidung der zündfähigen Zone. 15

2.3.4 Leckdichtheit (Eindringen von Umgebungsluft). 20

2.4 Oxidantien. 20

2.5 Pyrophore Materialien. 21

2.6 Giftiges Material. 23

2.7 Korrosive Materialien. 24

2.8 Zusammenfassung - chemische Gefahrenquellen. 26

3 Physikalische Gefahrenquellen. 28

3.1 Überdruck im Pumpenauslass. 28

3.1.1 Schutz gegen Überdruck am Auslass. 29

3.1.2 Blockierung der Auslasses. 29

3.2 Überdruck im Einlass. 30

3.2.1 Versorgung verdichteter Gase und Gegendruck. 30

3.2.2 Überdruck durch Spülsysteme. 30

3.2.3 Inkorrekter Betrieb der Pumpe. 31

3.3 Temperatur. 31

Inhalt

3.4 Zusammenfassung - physikalische Gefahrenquellen. 32

4 Systemaufbau. 34

4.1 Nenndruckwerte in einem System. 34

4.2 Eliminierung statischer Volumina. 34

4.3 Abgasabsaugsystem. 35

4.4 Verwendung von Schutzsystemen mit Flammensperren (HazLoc-Systemen). 35

4.5 Eindringen von Wasser durch Lecks in das Vakuumsystem. 36

4.6 Zurücksaugen von Abgasen. 36

4.7 Zündquellen. 36

4.8 Zusammenfassung - Systemaufbau. 38

5 Allgemeine Praxis. 39

5.1 Bildung von Ablagerungen in Rohrleitungen. 39

5.2 Verwendung von Frequenzumrichtern – Verwendung von Passwörtern. 39

5.3 Einlassventil. 39

5.4 Beheizte Fallen. 40

5.5 Kühlfallen. 40

5.6 Kondensatoren. 40

5.7 Ebenen der Systemintegrität. 40

6 Die Wahl der richtigen Geräte. 42

6.1 Ölgedichtete Drehschieber- und Kolbenpumpen. 43

6.2 Trockenlaufende Pumpen. 43

6.3 Leitungsentwurf. 44

6.3.1 Faltenbälge. 44

6.3.2 Wellschläuche. 44

6.3.3 Ankerpunkte. 44

6.3.4 Dichtungen. 44

6.4 Physikalischer Überdruckschutz. 44

6.4.1 Druckentlastung. 45

6.4.2 Überdruckalarm/Auslösung. 45

6.4.3 Druckregler. 45

6.4.4 Flammensperren. 45

6.5 Spülsysteme. 46

Inhalt

6.6 Zusammenfassung - die Wahl der richtigen Geräte. 46

7 Betriebsverfahren und Schulungen. 47

8 Veränderungen von Vakuumsystemen. 49

9 Zusammenfassung. 50

1 Einführung

1.1 Umfang dieser Publikation



WARNUNG:

Die Nichtbeachtung der in diesem Handbuch und der relevanten Pumpenbetriebsanleitung gegebenen Sicherheitsanweisungen kann zu ernsthaften Verletzungen oder Todesfällen führen.

Dieses Dokument dokumentiert unsere Erfahrungen bei der Spezifikation, der Konstruktion, beim Betrieb und bei der Wartung von Vakuumpumpen und Vakuumsystemen zum Nutzen der Anwender von Pumpen und Pumpensystemen. Es identifiziert die potenziellen Gefahren, die auftreten können, und bietet Anleitungen, die dazu dienen sollen, Gefahren für die Sicherheit zu minimieren und in gefährlichen Situationen angemessen zu reagieren. Dies ist besonders relevant, da der zunehmende Einsatz gefährlicher Prozesschemikalien zu einem höheren Potenzial für das Auftreten gefährlicher Bedingungen führt.

Die in diesem Dokument enthaltenen Informationen sind keine vollständige Liste. Sie dienen der Information über vorhersehbare Gefahren.
Jeder Benutzer von Vakuumeinrichtungen muss seine eigene Gefahren-/Risikoanalyse durchführen, um die Einhaltung der entsprechenden Regelungen nachzuweisen.

Die Struktur dieses Dokuments berücksichtigt die Sicherheit in den folgenden Bereichen:

- Prozessmaterialien
- Druck
- Systemaufbau
- Wahl der Ausrüstung
- Systembetrieb und Schulung

Alle diese Bereiche müssen sorgfältig geprüft werden, um Risiken zu minimieren.

Dieses Dokument sollte von allen Personen gelesen werden, die mit der Spezifikation, Konstruktion, Installation, Bedienung oder Wartung von Vakuumpumpen oder Vakuumsystemen befasst sind. Wir empfehlen, dazu die folgenden Dokumente zu lesen:

- Die mit Ihren Geräten mitgelieferten Betriebsanleitungen
- Von den Lieferanten Ihrer Prozessgase und Chemikalien bereitgestellte Informationen
- Informationen Ihrer Sicherheitsabteilung.
- Pumpenhandbuch
- Systemhandbuch
- HAZOP-Analyse
- Materialsicherheitsdatenblätter
- Allgemeine Normen, Maschinenrichtlinie usw.

Wir lehnen jegliche Haftung und Garantie im Zusammenhang mit der Korrektheit, Praxistauglichkeit, Sicherheit und den Ergebnissen der in diesem Dokument beschriebenen Informationen, Vorgehensweisen bzw. ihrer Anwendung ab. Wir übernehmen keine Haftung für Verluste oder

Schäden, die durch die Nutzung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder durch möglicherweise falsche oder unvollständige Informationen entstehen könnten. Beachten Sie, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen lediglich allgemeiner Natur sind. Wir können zwar Hinweise zu den potenziellen Gefahren im Zusammenhang mit der Verwendung gefährlicher Materialien geben. Es liegt jedoch in der Verantwortung des Endbenutzers, eine Risikobewertung und Gefahrenanalyse speziell für seinen Betrieb und seine Umgebung durchzuführen, um die behördlichen Vorschriften einzuhalten.

Wenn Sie weitere Informationen hinsichtlich der Eignung Ihrer Produkte für Ihre Prozessanwendung oder zu Sicherheitsaspekten Ihrer Vakuumpumpen oder Vakuumsysteme benötigen, wenden Sie sich an Ihren Lieferanten oder an uns.

1.2 Gefahrenanalyse

Die Techniken der Gefahrenanalyse bieten ein strukturiertes Konzept für die Identifizierung und Analyse der Gefahren in einem System bei normaler Verwendung sowie der Gefahren, die unter Fehler- und Ausfallbedingungen auftreten können. Solche Techniken sind ein wichtiger Schritt zum Gefahrenmanagement; in vielen Fällen ist ihre Verwendung gesetzlich vorgeschrieben. Um wirklich effektiv zu sein, muss eine Gefahrenanalyse während der Entwurfsphase eines Systems beginnen und bis zu Betrieb, Installation, Wartung und Außerbetriebnahme fortgesetzt werden.

Eine detaillierte Untersuchung von Gefahrenanalyseverfahren kann in dieser Veröffentlichung nicht geleistet werden. Es gibt jedoch andernorts zahlreiche Beschreibungen von Gefahrenanalyseverfahren. Ein Beispiel für ein in der chemischen Industrie häufig angewendetes Verfahren ist HAZOP (Hazard and Operability Study). Dies ist ein Verfahren zur Gefahrenanalyse, bei dem es um die Identifizierung potenzieller Gefahrenquellen und Betriebsprobleme geht.

Typischerweise liefern Gefahrenanalysen Informationen zu den Arten der Gefahren, ihrem Schweregrad und der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens. Anhand dieser Informationen können Sie entscheiden, wie Sie die Auswirkungen solcher Gefahren am besten auf ein akzeptables Niveau senken. Je nach Quelle einer Gefahr kann es möglich sein, sie vollständig auszuschließen, ihren Schweregrad zu mildern oder die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zu senken. Es ist jedoch sehr schwer, eine Gefahr vollständig auszuschließen.

Bei Ihrer Entscheidung zum Umgang mit einer Gefahr müssen Sie alle möglichen Auswirkungen berücksichtigen. So kann zum Beispiel eine kleine heiße Oberfläche ein kleineres Risiko für einen Bediener darstellen, da sie eine Brandverletzung verursachen kann. Um die Gefahr solcher Brandverletzungen zu verringern, könnte der Systemkonstrukteur eine visuelle Warnung vor der heißen Oberfläche anbringen oder diese gegen Berührungen schützen. Die Gefahrenanalyse des Systems könnte aber auch ergeben, dass diese heiße Oberfläche eine Zündquelle für zündfähige Dämpfe ist; dies könnte zu einer Explosion oder zur Freisetzung einer Giftgaswolke führen. Zur Senkung der Zündgefahr muss der Konstrukteur dann die Temperatur der heißen Oberfläche senken oder dafür sorgen, dass keine zündfähigen Dämpfe damit in Berührung kommen.

1.3 Das Auftreten von Gefahren

Gefahren können in allen Phasen der Lebensdauer eines Systems auftreten. Diese Phasen sind:

- Aufbau
- Bauweise
- Betrieb/Inbetriebnahme
- Wartung/Außerbetriebnahme.

Die Arten von Problemen, die in den einzelnen Phasen auftreten können, werden nachfolgend erläutert. Sie müssen jedoch in allen Fällen daran denken, dass Sie die Gefahren im System nur dann minimieren können, wenn Sie die einzelnen Bestandteile des Systems und den Prozess gut kennen und verstehen. In Zweifelsfällen müssen Sie Ihre Lieferanten um weitere Informationen bitten.

1.3.1 Aufbau

Wenn Sie Ihr System entwerfen, müssen Sie die korrekten Geräte für Ihre Anwendung auswählen. Bedenken Sie dabei Folgendes:

- die technischen Spezifikationen der Geräte
- die für die Konstruktion der Geräte verwendeten Materialien
- die Betriebsverbrauchsmaterialien, die mit den Geräten verwendet werden (wie etwa Schmiermittel oder Betriebsflüssigkeiten)
- die Prozessbedingungen und -materialien.

Sie müssen auch die allgemeine Eignung der Geräte für Ihre Anwendung bedenken und sicherstellen, dass diese stets im Rahmen der angegebenen Betriebsbedingungen verwendet werden.

Sie müssen Entwurfsprozeduren einrichten, um sicherzustellen, dass Entwurfsfehler auf ein Minimum reduziert werden können. Solche Verfahren sollten eine unabhängige Prüfung der Entwurfsberechnungen und Konsultationen zu Entwurfsparametern enthalten.

Zur Prüfung Ihres Entwurfs muss stets eine Gefahrenanalyse gehören. Sie können viele potenzielle Gefahrenquellen ausschließen, wenn Sie die Verwendung der Geräte in Ihrem System sorgfältig prüfen.

1.3.2 Bauweise

Reduzieren Sie die Möglichkeit des Auftretens von Gefahren in der Konstruktionsphase durch den Einsatz erfahrenen und qualifizierten Personals und geeigneter Verfahren zur Qualitätssicherung. Fachpersonal kann die korrekten Komponenten für die Montage identifizieren und fehlerhafte oder schlecht gefertigte Komponenten und Geräte erkennen. Qualitätssicherungsverfahren helfen dabei, fehlerhafte Arbeiten zu erkennen und zu korrigieren, und stellen sicher, dass die Entwurfsspezifikationen strikt eingehalten werden.

Das Personal muss sehr sorgfältig vorgehen und alle Sicherheitsmaßnahmen bei der Installation neuer Geräte in einem System beachten, in dem giftige, korrosive, zündfähige, erstickende, pyrophore oder andere gefährliche Substanzen verpumpt oder produziert wurden oder noch vorhanden sein können.

Elektrische Geräte müssen von qualifiziertem Fachpersonal im Einklang mit allen einschlägigen landesweit und lokal gültigen Elektrovorschriften installiert werden.

1.3.3 Betrieb/Inbetriebnahme

Während des Betriebs können Gefahren durch Ausfälle von Geräten oder Komponenten durch Verschleiß, unsachgemäße Verwendung oder

mangelhafte Wartung auftreten. Reduzieren Sie solche Gefahren durch gründliche Schulungen zur Verwendung (und Wartung) der Geräte. Wenn notwendig, konsultieren Sie die von uns und Ihren anderen Lieferanten in Form von Betriebsanleitungen, Schulungen und After-Sales-Service bereitgestellten Informationen.

1.3.4 Wartung/Außerbetriebnahme



WARNUNG:

Es sollte eine umfassende Gefahrenanalyse durchgeführt werden, die alle Wartungsmaßnahmen umfasst. Führen Sie keine Wartung durch, ohne die möglichen Risiken und die erforderliche Schutzausrüstung zu berücksichtigen.

Um zu verhindern, dass Personal mit gefährlichen Stoffen in Berührung kommt, ist äußerste Sorgfalt erforderlich. Bei der Wartung eines Systems, in dem giftige, korrosive, zündfähige, pyrophore, erstickende oder andere gefährliche Substanzen verpumpt oder produziert wurden, müssen alle Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden.

Alle Vakuumsysteme müssen zu einem bestimmten Zeitpunkt gewartet werden. Die Qualität dieser Wartung kann erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit des Systems haben. Die Gefahrenanalyse sollte die Einzelheiten des Wartungsverfahrens berücksichtigen, um sicherzustellen, dass diese nicht zu einer gefährlichen Bedingung führen. Einige Punkte, die beachtet werden sollten:

- Das Innere des Vakuumsystems könnte mit Prozessmaterialien verunreinigt sein, die gesundheitsschädlich sein können.
- Für den Einsatz mit den Prozessgasen wurden möglicherweise bestimmte Materialien wie PFPE-Öle ausgewählt. Wenn diese Materialien während einer Wartung ausgetauscht werden, kann eine neue Gefahrensituation entstehen.
- Pumpen, die unerwartet stoppen, können gefährliche Prozessgase enthalten. Falls es nicht möglich ist das verbliebene Prozessgas vor dem Ausbau der Pumpe abzupumpen, kann die Durchführung von besonderen Verfahren erforderlich sein, um die Mitarbeiter beim Entfernen der Pumpe zu schützen.
- Ein Überdruck im Inneren eines Vakuumsystems wird möglicherweise erst bemerkt, wenn ein Bauteil entfernt und unter Druck herausgedrückt wird.
- Elektrische Geräte müssen vor Beginn einer Wartung am Vakuumsystem isoliert werden.
- Die Auswirkung von Reinigungslösemitteln auf das Vakuumsystem berücksichtigen, insbesondere wenn diese korrosiv oder zündfähig sind.

Möglicherweise sollte auch ein genauer Wartungsplan eingerichtet werden; denken Sie auch an die sichere Entsorgung von Komponenten, die mit gefährlichen Substanzen verunreinigt sein könnten. Sie müssen für alle Geräte die in den Betriebsanleitungen gegebenen Wartungshinweise befolgen, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. In der Regel gelten für HazLoc-Systeme zusätzliche Anforderungen.

2 Chemische Gefahrenquellen

2.1 Gefährliche Prozessgase

Gefährliche Gase und Dämpfe können als Stoffe definiert werden, die mindestens einer der folgenden Kategorien angehören:

- Zündfähig
- Korrosiv
- Selbst-entzündlich
- Radioaktiv
- Giftig
- Explosiv
- Oxidantien

Aufgrund ihrer Gefahrennatur ist es wichtig, die Eigenschaften und die Art und Weise, wie diese Gase die Sicherheit des Vakuumsystems beeinflussen, zu betrachten: Normalerweise wird diese Art von Prozessgasen mit Ihrem Vakuumlieferanten im Rahmen der Spezifizierung eines Vakuumsystems besprochen; jedoch wird nachstehend ein Überblick über einige der Gefahren gegeben.

Hinweis:
Die Reaktion von ungefährlichen Prozessgasen innerhalb eines Vakuumsystems kann manchmal zur Erzeugung von Reaktionsprodukten führen, die dann als gefährlich betrachtet werden müssen.

2.2 Chemische Reaktionen

Sie müssen sorgfältig alle potenziellen chemischen Reaktionen bedenken, die bei normaler Verwendung, bei unsachgemäßer Verwendung und in Fehlersituationen an allen Punkten Ihres Vakuumsystems auftreten können. Insbesondere müssen Sie dabei an Reaktionen denken, an denen Gase und Dämpfe beteiligt sind und die zu Explosionen führen können. Die Erfahrung zeigt, dass Explosionen auftreten können, wenn der Systemkonstrukteur die beteiligten Materialien nicht berücksichtigt hat und die Möglichkeit eines Ausfalls der beteiligten Geräte nicht berücksichtigt wurde.

2.2.1 Homogene Reaktionen

Homogene Reaktionen treten in der Gasphase zwischen zwei oder mehreren Arten von Gasmolekülen auf. Gasverbrennungsreaktionen sind normalerweise Reaktionen dieser Art. Beispielsweise ist unserer Kenntnis nach die Reaktion zwischen Silan (SiH_4) und Sauerstoff (O_2) immer homogen. Wenn solche Reaktionen in einem Fertigungsprozess auftreten, müssen Sie daher sehr sorgfältig den Prozessdruck und die Konzentrationen der Reagenzien prüfen, um exzessive Reaktionsraten zu vermeiden.

2.2.2 Heterogene Reaktionen

Heterogene Reaktionen erfordern eine feste Oberfläche. Manche Gasmoleküle reagieren nur, wenn sie von einer Oberfläche aufgenommen werden, nicht jedoch in der Gasphase bei niedrigem Druck. Diese Art von Reaktion ist ideal für bestimmte Prozesse geeignet, da sie die Auswirkungen von Reaktionen minimiert, die in der Prozesskammer auftreten, die

Partikelbildung verringert und die Wahrscheinlichkeit von Kontaminationen reduziert.

Die meisten heterogenen Reaktionen werden bei höherem Druck homogen, normalerweise deutlich unterhalb des Atmosphärendrucks. Dies bedeutet, dass die Reaktionsweise der Gase in Prozesskammern nicht notwendigerweise mit der Reaktionsweise bei der Komprimierung durch eine Vakuumpumpe korreliert.

2.2.3 Überkreuz-Verunreinigung

Ein installiertes Vakuumsystem wird häufiger für unterschiedliche Anwendungen verwendet, in denen unterschiedliche Prozessgase eingesetzt werden. Der Grund kann darin liegen, dass auf der Anlage unterschiedliche Produkte hergestellt werden oder der Fertigungsprozess erfolgt in mehreren Schritten.

In diesen Fällen besteht die Möglichkeit einer Überkreuz-Verunreinigung zwischen Prozessgasen/Dämpfen/Materialien des einen Prozesses mit denen des anderen Prozesses. In manchen Fällen besteht die Gefahr gefährlicher Reaktionen zwischen zwei Materialien, die normalerweise, wenn sie einzeln abgepumpt werden, keinerlei Gefahr darstellen.

Wenn gefährliche Reaktionen auftreten können, ist es üblich, zwischen den Prozessschritten etwa 15 Minuten lang mit Inertgas zu spülen. Hierdurch wird häufig das erste Material entfernt, bevor das zweite Material gepumpt wird; es sollte jedoch beachtet werden, dass in einigen Vakuumsystemen die Möglichkeit besteht, dass eingeschlossene Taschen von Prozessgas vorhanden sind, die durch den Spülschritt nicht effektiv entfernt werden. Wenn eine gefährliche Reaktion auftreten könnte, sollte dem Entwurf des Vakuumsystems und der Identifizierung von Gaseinschlüssen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Vor- / Nachprozess-Spülungen

Um unerwünschte chemische Reaktionen zu vermeiden, ist es üblich, Vakuumpumpen vor und nach der Einleitung von Prozessgasen jeweils 15 Minuten lang mit einem inerten Spülgas zu spülen. Eine Vorprozess-Spülung entfernt alle Spuren von atmosphärischem Sauerstoff und Wasser, während eine Nachprozess-Spülung verbleibende Prozessgase entfernt.

Probleme bei nicht normalen Reaktionen

Anormale Reaktionen können auftreten, wenn Chemikalien in Kontakt mit Gasen oder Materialien kommen, deren Auftreten der Systemkonstrukteur nicht erwartet hat. Hierzu kann es beispielsweise kommen, wenn ein Leck vorhanden ist, das den Eintritt atmosphärischer Gase in das System oder den Austritt giftiger, zündfähiger, explosiver oder anderer gefährlicher Gase aus dem System in die Atmosphäre erlaubt.

Um das Auftreten dieser Reaktionen zu verhindern, sollten Sie eine Leckdichtheit von 1×10^{-3} mbar l/s (1×10^{-1} Pa l/s) oder weniger in Ihrem System aufrechterhalten. Hochvakuum-Anwendungen halten in der Regel eine Leckdichtheit von 1×10^{-5} mbar l/s (1×10^{-3} Pa l/s) oder niedriger aufrecht. Darüber hinaus müssen Sie dafür sorgen, dass alle Ventile in Ihrem System leckdicht sind.

Gase, die normalerweise während des Prozesszyklus nicht miteinander in Kontakt geraten, können sich im Pumpsystem und in Abgasleitungen mischen.

Wenn eine Vakuumpumpe bei bestehendem Unterdruck am Einlass abgeschaltet wird, kommt es zu einem Rücksaugen von Abgasen aus den Rohrleitungen für die Abgase oder dem Abgassystem. Wenn dieses Gas Luft/Sauerstoff enthält, können unerwünschte chemische Reaktionen mit Prozessgasen oder internen Ablagerungen auftreten. Es wird empfohlen, den Auslass der Vakuumpumpe mit einem Rückschlagventil auszustatten, wenn möglich, um den Rückfluss von Abgasen zu verlangsamen. Darüber hinaus stellt die Verwendung einer Stickstoffspülung in der Vakuumpumpe sicher, dass Luft aus dem Vakuumsystem ausgeschlossen wird.

Es ist möglich, dass Wasserdampf oder Reinigungslösungen nach Routinewartungsarbeiten in der Prozesskammer vorhanden sind. Dies kann der Fall sein, nachdem die Prozesskammer gewaschen und gereinigt wurde. Wasserdampf kann auch aus Abgasleitungen und Abgasabscheidern in das System gelangen.

Wenn für die Spülung von Prozessablagerungen aus dem Vakuumsystem Lösungsmittel verwendet werden, muss darauf geachtet werden, dass das verwendete Lösungsmittel mit allen Prozessmaterialien in dem Vakuumsystem kompatibel ist.

Phasenwechsel

Ein Vakuumsystem ist so ausgelegt, dass es den Druck der verpumpten Gase und Dämpfe vom Vakuum auf den Atmosphärendruck erhöht. Dabei ist es möglich, dass die Materialien ihre Phase in eine flüssige oder sogar feste Form ändern. Materialien, die einen Phasenübergang durchlaufen haben, können Gefahren wie verstopfte Rohrleitungen, Korrosion oder sogar zündfähige Materialien verursachen. Normalerweise tritt die Phasenänderung auf, wenn sich der Druck in der trockenlaufenden Pumpe dem Atmosphärendruck nähert; Unter sehr kalten Umgebungsbedingungen kann es jedoch vorkommen, dass Materialien in der Vorvakuumleitung zur Vakuumpumpe einen Phasenübergang durchlaufen.

Wenn dies eine gefährliche Bedingung verursachen könnte, sollte entweder eine Begleitheizung oder ein trockenes, inertes Spülgas verwendet werden.

Wenn sich in der Vorvakuumleitung feste Partikel bilden, können sich Schichten an den Wänden ablagern, die nach einiger Zeit abfallen und in die Pumpe gelangen können – siehe Abschnitt *Bildung von Ablagerungen in Rohrleitungen* auf Seite 39.

Wenn es wünschenswert ist, die kondensierten Materialien zurückzugewinnen, wird empfohlen, einen Kondensator und einen Auffangbehälter in das Vakuumsystem einzubauen, in dem diese Materialien sicher gesammelt werden können.

2.3 Zündfähige/explosionsgefährdete Materialien

Viele Gase und Staubmaterialien, wie Wasserstoff (H_2), Azetylen (C_2H_2), Propan (C_3H_8) und fein verdünnter Siliziumdioxidstaub, sind in bestimmten Konzentrationen in einem Oxidanten zündfähig und/oder explosiv, wenn eine Zündquelle vorhanden ist. Eine Zündquelle kann etwa durch einen örtlich begrenzten Aufbau von Wärme entstehen. Dies wird im Abschnitt *Zündquellen* auf Seite 36 besprochen.

Zündfähige Gase/Dämpfe sind Gase/Dämpfe die, wenn diese mit einer bestimmten Luftmenge oder einem Oxidationsmittel vermischt werden, eine explosive Mischung erzeugen, wobei jedoch nicht alle Konzentrationen eine Gefahr darstellen.

Sie können die Explosionsgefahr vermeiden, indem Sie sicherstellen, dass die Konzentration des potenziell zündfähigen Gemischs außerhalb der zündfähigen Zone gehalten wird. Weitere Einzelheiten dazu finden Sie im Abschnitt *Vermeidung der zündfähigen Zone* auf Seite 15.

Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Explosionsgefahr ist das Ausschalten potenzieller Zündquellen. Weitere Einzelheiten dazu finden Sie im Abschnitt *Zündquellen* auf Seite 36.

Die gefährlichen Konzentrationen fallen innerhalb des zündfähigen Bereichs und werden allgemein als „potenziell zündfähige Atmosphären“ bezeichnet. Dies ist durch die Tatsache begründet, dass sie gezündet werden können und so eine Explosion herbeigeführt wird. Der zündfähige Bereich ist der Bereich der Brennstoff/Luft-Konzentration zwischen der Ober- und der Untergrenze der Zündfähigkeit. Mischungen innerhalb dieses Bereiches brennen oder explodieren bei Kontakt mit einer Zündquelle.

Wo es nicht möglich ist, die zündfähige Zone zu vermeiden, müssen Sie sicherstellen, dass die Geräte so konstruiert sind, dass alle Explosionen verhindert werden oder so begrenzt bleiben, dass die Geräte nicht zerbrechen und keine Flammen in die externe Atmosphäre gelangen können. Die Verwendung von Flammensperren wird im Abschnitt *Verwendung von Schutzsystemen mit Flammensperren (HazLoc-Systemen)* auf Seite 35 erläutert. Wenn die externe Atmosphäre Ihres Vakuumsystems gefährlich ist, müssen Sie sicherstellen, dass alle Geräte dafür geeignet sind.

HazLoc regelt das Design von Geräten, die in potenziell zündfähigen Atmosphären verwendet werden, auf eindeutige Weise.

Wenn es möglich ist, das Pumpen potenziell zündfähiger Atmosphären bei allen Bedingungen zu vermeiden, können alle Typen unserer Vakuumpumpen zum Pumpen zündfähiger Dämpfe oder Gase verwendet werden.

Die Quellen von Explosionsgefahren können allgemein in die folgenden Kategorien unterteilt werden:

- Oxidantien
- Zündfähige/explosive Materialien
- Pyrophore Materialien
- Natriumazid.

Hinweis:

Lieferanten von Prozessmaterialien in der Europäischen Union (und einigen anderen Ländern) sind gesetzlich verpflichtet, die physikalischen und chemischen Daten der von ihnen verkauften Materialien zu veröffentlichen (normalerweise in Form von Materialsicherheitsdatenblättern). Zu den Daten für ein Material müssen, falls anwendbar, Informationen über die obere und untere Explosivitätsgrenze, die physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften des Materials sowie alle mit seiner Verwendung verbundenen Gesundheitsrisiken gehören. Lesen Sie sich diese Informationen gut durch.

2.3.1 Explosionsgefahren

Hinweis:

Es sind Pumpen erhältlich, die der ATEX-Richtlinie der EU für Geräte in potenziell zündfähigen Atmosphären entsprechen.

Chemische Gefahrenquellen

Unerwartete Explosionen werden in jedem Fall durch Abweichungen von den Sicherheitsrichtlinien verursacht. Dennoch waren einige Explosion äußerst heftig und hätten zu ernsthaften Verletzungen oder Todesfällen führen können.

Typische Ursachen für plötzlich auftretende Brüche und Risse in Komponenten von Vakuumsystemen sind die Entzündung zündfähiger Materialien und die Blockierung des Pumpenauslasses. Zur Vermeidung von Gefahren sollten Sie auf die folgenden Punkte achten, um den sicheren Betrieb Ihrer Vakuumpumpen und -systeme zu gewährleisten.

- Sofern Ihr System nicht für die Verpumpung von Materialien in Konzentrationen gedacht ist, die zu Zündungen in der Vakuumpumpe führen können, müssen Sie sicherstellen, dass Gemische aus entzündlichen Stoffen und Oxidantien außerhalb des zündfähigen Bereichs bleiben. Eine Möglichkeit dazu ist die Verwendung eines inerten Spülgases. Siehe *Vermeidung der zündfähigen Zone* auf Seite 15.
- Achten Sie darauf, dass es während des Betriebs zu keinen Blockierungen des Auslasses kommt, entweder durch mechanische Komponenten (etwa Ventile oder Blindstopfen) oder durch Ablagerungen von Prozessmaterialien oder Nebenprodukten in Leitungen, Filtern oder anderen Bestandteilen des Auslasses (es sei denn, Ihr System ist für den Umgang damit ausgelegt).
- Verwenden Sie ausschließlich PFPE(Perfluorpolyether)-Öle an den Stellen der Pumpenmechanismen, die hohen Konzentrationen von Sauerstoff oder anderen Oxidantien ausgesetzt sind. Andere als „nicht zündfähig“ verkaufte Öle sind möglicherweise nur bei Konzentrationen von Oxidantien von weniger als 30 % (Vol.) verwendbar.
- Achten Sie darauf, dass in einem absichtlich geschlossenen und isolierten Vakuumsystem kein Überdruck auftreten kann, etwa durch einen Fehler im Druckregler oder im Spülungssteuersystem.
- Wenn das verpumpte Produkt heftig mit Wasser reagieren kann, wird empfohlen, ein anderes Kühlungsmittel als Wasser (beispielsweise Wärmetransportmedium) im Kühlkreislauf zu verwenden. Wenden Sie sich an uns, um sich beraten zu lassen.

Explosionsfähige Gase können ohne Kontakt mit Luft oder einem Oxidationsmittel reagieren. Sie sind daher besonders gefährlich zu pumpen.

Explosive Polysilizium-Feststoffe können in Vakuumsystemen erzeugt werden und sammeln sich auf horizontal angeordneten Oberflächen an. Normalerweise wird die Menge an gebildetem Material regelmäßig durch einen Ätzschritt mit einem starken Oxidationsmittel wie NF_3 oder SF_6 minimiert. Dies stellt sicher, dass die Menge dieser Materialien in der Vakuumkammer reduziert wird, um die Möglichkeit eines gefährlichen Ereignisses zu reduzieren. Hier ist besonders die Konstruktion des Vakuumsystems zu beachten, um Volumen zu vermeiden, in denen sich Polysiliziumablagerungen bilden können, die nicht durch das Ätzgas effektiv ausgespült werden können. Ein typisches Beispiel einer solchen Konstruktion sind horizontal angeordnete Bälge, wo sich in den Wellen die Ablagerungen bilden können und wo das Ätzgas nur die kleinen exponierten Oberflächen abätzen kann.

Die Lösung hier besteht darin, entweder den Einsatz von Bälgen zu vermeiden oder diese vertikal einzubauen.

2.3.2 Quellen potenziell gefährlicher Gas- oder Dampfgemische

Wenn ein zündfähiges Gas oder ein zündfähiger Dampf mit der geeigneten Konzentration von Sauerstoff oder anderen Oxidantien vermischt wird, bildet sich ein potenziell explosives Gemisch, das bei Vorhandensein einer Zündquelle entzündet wird.

Zwar ist es normalerweise bekannt, ob ein verpumptes Material potenziell explosiv ist. Es gibt jedoch nach unserer Erfahrung Fälle, in denen Bedingungen, die bei der Konstruktion des Prozesses nicht berücksichtigt wurden, zu einer potenziell explosionsgefährdeten Mischung führen. Sie müssen alle möglichen Prozessbedingungen und Quellen für potenziell explosive Mischungen identifizieren, die durch Ihre Anlagen produziert werden könnten. Im Folgenden finden Sie einige Beispiele aus unserer Praxis. Die Liste ist jedoch keinesfalls vollständig:

- **Gegenseitige Kontamination** – Wenn eine Vakuumpumpe für verschiedene Zwecke eingesetzt wird, kann es sein, dass ihre Verwendung für ein einzelnes Material sicher ist. Wenn sie vor der Verwendung jedoch nicht mit einem anderen Material gespült wird, kann eine gegenseitige Kontamination der Materialien mit unerwarteten Reaktionen die Folge sein.
- **Reinigungsflüssigkeiten** – Eine Anwendung mag als ungefährlich gelten. Die Verwendung zündfähiger Reinigungsflüssigkeiten und die anschließende Trocknung durch Evakuierung über die Vakuumpumpe kann jedoch zu potenziell explosiven Mischungen führen.
- **Unerwartete Materialien** - Bei „Hausvakuum“-Anwendungen, bei denen die Vakuumpumpe verwendet wird, um ein verteiltes Vakuumsystem bereitzustellen, kann es vorkommen, dass zündfähige Materialien gepumpt werden, die bei der Konstruktion des Systems nicht berücksichtigt wurden. Diese Materialien können Selbstentzündungstemperaturen haben, die unter den internen Temperaturen oder der Temperaturauslegung der Vakuumpumpe liegen.
- **Gelöste Dämpfe** – Diese können während des Prozessbetriebs entstehen. Achten Sie darauf, die korrekte interne Temperaturauslegung für Ihren Prozess zu wählen. In der Regel wird dies auf dem Markt für chemische Prozesse von den HazLoc-Anforderungen abgedeckt.
- **Eindringen von Luft** – Das unbeabsichtigte Eindringen von Luft oder Oxidantien in ein System kann die Konzentration zündfähiger Gase oder Dämpfe ändern und zu einer potenziell explosiven Mischung führen.
- **Zündfähige Sperrflüssigkeiten** – Wenn eine zündfähige Flüssigkeit als Sperrflüssigkeit in einer Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe verwendet wird, führt das Eindringen von Luft zu einer potenziell explosiven Mischung.
- **Kondensierte Prozessmaterialien** – Wenn die Möglichkeit besteht, dass zündfähiges Material in Ihrem System kondensiert, müssen Sie berücksichtigen, dass dieses mit Oxidantien aus anderen Prozessschritten oder mit der Luft (beipielsweise in der Abgasleitung) reagiert. Dies kann durch eine geeignete Temperatur oder eine Teildrucksteuerung verhindert werden.

2.3.3 Vermeidung der zündfähigen Zone

Ein zündfähiges Material führt nur dann zu einer potenziell zündfähigen Atmosphäre, wenn es mit Luft oder Sauerstoff oder einem anderen Oxidanten kombiniert ist und seine Konzentration zwischen dem unteren Flammpunkt LFL (Lower Flammability Limit, auch LEL Lower Explosion Limit) und dem oberen Flammpunkt UFL (Upper Flammability Limit, auch UEL Upper Explosion Limit) liegt. Beachten Sie, dass sich die meisten Daten

in der Literatur auf Entzündbarkeitsgrenzen in der Luft beziehen, d. h. wenn Sauerstoff das Oxidationsmittel ist. Alle weiteren Informationen unten basieren auf dieser Annahme.

Für eine potenziell explosive Mischung muss dazu die Sauerstoffkonzentration oberhalb der minimalen Sauerstoffkonzentration MOC (Minimum Oxygen Concentration, auch LOC Limiting Oxygen Concentration) liegen. Der MOC(LOC)-Wert liegt für die meisten zündfähigen Gase bei 5 % (Vol.) oder darüber.

Hinweis:

Dies gilt nicht für pyrophore Materialien, die besondere Vorsichtsmaßnahmen erfordern.

Es gibt verschiedene Vorgehensweisen zur Vermeidung des Betriebs mit Gasgemischen in der zündfähigen Zone. Die Auswahl hängt vom Ergebnis der Sicherheitsprüfung (Gefahrenanalyse) für den Prozess und das Pumpsystem ab:

Gemäß der Richtlinie der Europäischen Union über zündfähige Atmosphären („ATEX 114“ bzw. 2014/34/EG) besteht die bevorzugte Methode zum Erreichen der Sicherheit zündfähiger Gase darin, ihre Konzentration in der Luft nicht in den zündfähigen Bereich geraten zu lassen. Dies stellt sicher, dass sie für den Fall, dass eine Zündquelle auftritt, nicht brennen können. Daher sind eine oder mehrere der nachstehend beschriebenen Maßnahmen erforderlich:

- **Halten der Konzentration des zündfähigen Gases unter dem LFL(LEL)-Wert**

  Um das Risiko des versehentlichen Eindringens des zündfähigen Gases in die zündfähige Zone zu minimieren, sollte ein Sicherheitsgrenzwert für den Betrieb unterhalb des LFL(LEL)-Werts verwendet werden.

  Der Benutzer sollte auf der Grundlage einer Risikobewertung einen Sicherheitsgrenzwert festlegen. Einige Autoritäten schlagen vor, die Konzentration stets unter 25 % LFL (LEL) zu halten.

  Die am häufigsten verwendete Methode, um die Konzentration unterhalb des LFL(LEL)-Werts zu halten, besteht in der Verdünnung durch ein inertes Spülgas (etwa Stickstoff), das in die Pumpeneinlass- und/oder Spülanschlüsse eingeleitet wird. Die erforderliche Integrität des Verdünnungssystems und die eventuell erforderlichen Alarme oder Interlocks hängen von der Gefahrenzone ab, die bei Ausfall des Verdünnungssystems entsteht.

  Die Untergrenze für die Zündfähigkeit lässt sich normalerweise dem MSDS (Materialsicherheitsdatenblatt) entnehmen, welches von den Lieferanten des Gases oder Dampfs veröffentlicht wird; dies ist die minimale Luft- /Oxidationsmittel-Konzentration, bei der eine zündfähige Gasmischung gezündet werden könnte und so zu einer Flamme oder Explosion führt.

  Um eine potenziell zündfähige Atmosphäre zu vermeiden, und für die Einrichtung eines Sicherheitsspielraums ist es erforderlich, eine Verdünnung mit einem Inertgas zu erzeugen, bis die Brennstoff/Luft- (oder Oxidationsmittel-) Konzentration 25 % der Konzentration bei der unteren Zündfähigkeitsgrenze beträgt.

  Dies ist eine bevorzugte Betriebsweise, da die Wirkung eines Luftlecks in einem Vakuumsystem nur die zündfähigen Gase/Dämpfe weiter verdünnt; jedoch ist es erforderlich, das Inertgassystem als sicherheitskritisch zu betrachten.

Hinweis:

Sorgen Sie für geeignete Sicherheitsmaßmaßnahmen, um Erstickungsgefahr zu vermeiden.

- **Halten der Konzentration der zündfähigen Gase oberhalb des UFL(UEL)-Werts**

  Die obere Grenze für die Zündfähigkeit wird in der Regel in dem MSDS angegeben, das von den Lieferanten des Gases oder Dampfs bereitgestellt wird; dies ist die maximale Luft-/Oxidationsmittel-Konzentration, bei der eine zündfähige Gasmischung gezündet werden könnte und so zu einer Flamme oder Explosion führt.

  Um eine potenziell zündfähige Atmosphäre zu vermeiden und einen Sicherheitsspielraum einzurichten, muss die Luft/Oxidationsmittel-Konzentration auf 60 % der Luft/Oxidationsmittel-Konzentration der oberen Zündfähigkeitsgrenze für Luft/Brennstoff begrenzt werden.

  Dieser Betriebsmodus erfordert eine sorgfältige Kontrolle über Luftlecks in Prozessbehälter, Rohrleitungen und Vakuumsystem. Zusätzlich ist es erforderlich, das zufällige Einströmen von Luft aufgrund von Betriebs- oder Wartungsaktivitäten, wie dem Öffnen von Ventilen oder dem Austauschen von Inertgas-Flaschen, zu berücksichtigen.

  Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass der Einsatz einer Inertgasspülung nicht erforderlich ist, wodurch sich die Abgasbehandlung des Prozessgases vereinfacht, beziehungsweise diese erst ermöglicht wird und sich dadurch Kosten sparen lassen.

- **Halten der Sauerstoffkonzentration unterhalb des MOC- (LOC) Werts**

  Diese Vorgehensweise erfordert die Überwachung der Sauerstoffkonzentration der verpumpten Gase, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten. Zur Minimierung des Risikos eines versehentlichen Eindringens des zündfähigen Gases in die zündfähige Zone sollte ein Sicherheitsgrenzwert für den Betrieb unterhalb des MOC(LOC)-Werts verwendet werden. Verfügbare Branchenstandards geben an, dass eine kontinuierlich überwachte Sauerstoffkonzentration mehr als 2 Volumenprozentpunkte unterhalb dies niedrigsten veröffentlichten MOC(LOC)-Werts für das Gasgemisch gehalten werden soll. Sofern der MOC(LOC)-Wert unter 5 % liegt, muss die Sauerstoffkonzentration unterhalb von 60 % des MOC(LOC)-Werts gehalten werden. Wenn die Überwachung lediglich in Form routinemäßiger Prüfungen des Sauerstoffgehalts erfolgt, sollte der Sauerstoffgehalt niemals mehr als 60 % des niedrigsten bekannten MOC (LOC)-Werts betragen, es sei denn, der MOC (LOC)-Wert liegt unter 5 %; in diesem Fall muss die Sauerstoffkonzentration unter 40 % des MOC (LOC)-Werts gehalten werden.

  Die bevorzugte Methode für die Wahrung des Sauerstoffgehalts unterhalb des niedrigsten bekannten MOC(LOC)-Werts besteht im rigorosen Ausschluss von Luft und Sauerstoff aus dem Prozess und dem Pumpensystem, zusammen mit der Spülung des verpumpten Gases mit einem inerten Spülgas (z. B. Stickstoff), das bei Bedarf über den Pumpeneinlass und/oder die Spülanschlüsse eingeleitet wird. Die erforderliche Integrität der Maßnahmen zum Ausschluss von Luft/Sauerstoff und die eventuell erforderlichen Alarme oder Interlocks hängen von der Gefahrenzone ab, die bei Ausfall der Ausschluss- und Verdünnungssysteme entsteht.

Maßnahmen, die normalerweise getroffen werden, um Luft rigoros aus dem Prozess und dem Pumpensystem auszuschließen, werden am Ende dieses Abschnitts erläutert.

Die minimale Sauerstoffkonzentration ist die Sauerstoffkonzentration, bei der eine potentiell explosive Atmosphäre noch existieren kann. Bei Sauerstoffkonzentrationen unterhalb dieses Wertes sind zündfähige Mischungen nicht in der Lage, einen Brand oder eine Explosion aufrechtzuerhalten.

Um eine potenziell zündfähige Atmosphäre zu vermeiden und einen Sicherheitsspielraum einzurichten, muss die Sauerstoffkonzentration auf 60 % der minimalen Sauerstoffkonzentration begrenzt werden.

Auch dieser Betriebsmodus erfordert eine sorgfältige Kontrolle über Luftlecks in Prozessbehälter, Rohrleitungen und Vakuumsystem. Zusätzlich ist es erforderlich, das zufällige Einströmen von Luft aufgrund von Betriebs- oder Wartungsaktivitäten, wie dem Öffnen von Ventilen oder dem Austauschen von Inertgas-Flaschen, zu berücksichtigen.

- **Halten der Konzentration der zündfähigen Gase oberhalb des UFL(UEL)-Werts**

  Wenn die Konzentrationen der zündfähigen Gase sehr hoch sind, kann es sinnvoller sein, den Betrieb über dem UFL(UEL)-Wert zu halten. Um das Risiko eines versehentlichen Gelangens in die zündfähige Zone zu vermeiden, sollte ein Sicherheitsgrenzwert für den Betrieb oberhalb des UFL(UEL)-Werts verwendet werden. Es wird empfohlen, den restlichen Sauerstoffgehalt im Gas bei unter 60 % des absoluten Sauerstoffgehalts zu halten, der normalerweise bei der UFL(UEL)-Konzentration des zündfähigen Gases vorhanden ist.

  Die bevorzugte Methode zum Halten des Sauerstoffgehalts unterhalb dieser Sicherheitsgrenze besteht im rigorosen Ausschluss von Luft und Sauerstoff aus dem Prozess und dem Pumpensystem. Die Verdünnung des verpumpten Gases mit einem inerten Spülgas (wie etwa Stickstoff) oder mit einem weiteren zündfähigen Gas („Padding-Gas“), eingeleitet in den Pumpeneinlass und/oder die Spülanschlüsse, kann ebenfalls erforderlich sein. Die erforderliche Integrität der Maßnahmen zum Ausschluss von Luft, der Spülgaseinleitungssysteme und die eventuell erforderlichen Alarme oder Interlocks hängen von der Gefahrenzone ab, die bei Ausfall der Ausschluss- und Verdünnungssysteme entsteht.

- **Halten der Konzentration des zündfähigen Gases unterhalb des minimalen Explosionsdrucks**

  Jedes zündfähige Material hat einen Mindestdruck, unterhalb dessen eine Explosion nicht möglich ist. Wenn der Druck am Einlass der Vakuumpumpe sicher unterhalb dieses Werts gehalten werden kann, können sich Zündungen, die in der Vakuumpumpe beginnen, nicht zum Einlass hin ausbreiten. Es müssen jedoch Vorsichtsmaßnahmen für den Abgasauslass der Vakuumpumpe getroffen werden.

  Typische Maßnahmen zum rigorosen Ausschluss von Luft aus dem Prozess und dem Pumpsystem sind etwa:

- **Behebung des Eindringens von Luft**

  Verwenden Sie einen Lecksucher oder führen Sie einen Druckanstiegstest durch. Bevor zündfähige Materialien in die Prozesskammer gelangen, kann ein Test durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass sich die Luft(Sauerstoff)-Leckage in das Vakuumsystem innerhalb akzeptabler Grenzwerte befindet.

  Zur Durchführung eines Druckanstiegstests wird die leere Prozesskammer auf einen Druck knapp unter dem normalen

Betriebsdruck gebracht und dann von der Vakuumpumpe isoliert. Der Druck in der Prozesskammer wird dann über einen festen Zeitraum hinweg aufgezeichnet. Wenn das Volumen der Prozesskammer und das maximal zulässige Eindringen von Luft bekannt sind, ist es möglich, den maximal zulässigen Druckanstieg über einen festen Zeitraum hinweg zu berechnen. Wenn dieser Grenzwert überschritten wird, muss die Quelle der Luft-(Sauerstoff-)Leckage in die Prozesskammer verschlossen werden; der Test muss dann erfolgreich wiederholt werden, bevor zündfähige Materialien in die Prozesskammer eingelassen werden.

In manchen Fällen kann die Fähigkeit des Vakuumsystems zum Erreichen eines guten Basisdrucks als Hinweis auf die Leckdichtheit verwendet werden.

- **Entfernen Sie vor dem Start des Prozesses alle Luft aus dem System**

  Bevor zündfähiges Gas in den Prozess eindringen kann, muss das System vollständig entleert und/oder mit Inertgas (wie etwa Stickstoff) gespült werden, um die Luft vollständig aus dem System zu beseitigen. Wiederholen Sie diese Prozedur zur Beseitigung aller zündfähigen Gase am Ende des Prozesses, bevor das System endgültig zur Luft ventiliert wird.

- **Für trockenlaufende Vakuumpumpen**

  Stellen Sie sicher, dass unter keinen Umständen Wellendichtungsgas mit Luft vermischt werden kann und dass alle Gasballastanschlüsse versiegelt sind oder nur zum Einleiten von Inertgas verwendet werden.

- **Für Nassvakuumpumpen (d. h. ölgedichtete Drehkolben- oder Drehschieberpumpen)**

  Halten Sie die Wellendichtungen stets im Einklang mit den Anweisungen des Herstellers und verwenden Sie ein gepumptes, unter Druck stehendes Ölschmiersystem mit einem Alarm beim Verlust von Öldruck. Dieses System kann externes Zubehör für die Bereitstellung von gefiltertem und unter Druck stehendem Schmieröl enthalten, das über einen Druckschalter verfügt. Achten Sie darauf, dass alle Gasballastanschlüsse versiegelt sind oder nur zur Einleitung von Inertgas verwendet werden. Sorgen Sie für die angemessene Inertgasspülung für die Schmierbüchse, um vor dem Start des Prozesses alle Luft zu entfernen.

- **Für Vakuum-Rootspumpen**

  Halten Sie die Haupt-Antriebswellendichtung stets im Einklang mit den Anweisungen des Herstellers und sorgen Sie dafür, dass alle Spül- oder „Lüftungs“-Anschlüsse nur zum Einleiten von Inertgas verwendet werden können.

- **Rückstrom**

  Stellen Sie sicher, dass die Prozeduren und Vorrichtungen das System gegen jeglichen umgekehrten Luftstrom schützen, der durch einen Pumpenfehler ausgelöst werden könnte. Stellen Sie sicher, dass alle verpumpten zündfähigen Gase an der abschließenden Entlüftung des Pumpenauslasses sicher entsorgt werden. Achten Sie darauf, dass in der Abgasleitung keine zündfähigen Gasgemische entstehen; sorgen Sie dazu für eine geeignete Inertgasspülung der Leitung zu Beginn und Ende des Prozesses, der das zündfähige Gas verwendet, und verwenden Sie eine ausreichende Inertgasspülung während des Betriebs, um turbulente Rückmischungen mit Luft im Auslass zu verhindern.

2.3.4 Leckdichtheit (Eindringen von Umgebungsluft)

Vakuumsysteme, die gefährliche Prozessgase pumpen, sind sorgfältig hinsichtlich der Folgen über Lecks eindringende Luft zu bewerten. Es wird empfohlen, eine Risikoanalyse durchzuführen, um die Höhe des Risikos zu bestimmen; dabei Normalbetrieb, Fehlerzustände und Wartungsverfahren berücksichtigen. Typische Probleme sind:

- Reaktionen mit selbst-entzündlichen Gasen
- Verlagerung von zündfähigen Gasen und Dämpfen in den Zündfähigkeitsbereich
- Korrosion aufgrund des Eindringens von Luftfeuchtigkeit
- Unerwünschte Reaktionen mit Prozessgasen.

Kein Vakuumsystem ist zu 100 % leckdicht. Es gibt stets einen gewissen Grad an Eindringen von Luft, selbst bei Hochvakuumsystemen. Wenn das zu Sicherheitsproblemen führen kann, muss das erforderliche Dichtheitsniveau berechnet

Vakuumsysteme sind im Allgemeinen so ausgelegt, dass sie leckdicht sind. Die Leckdichtheit des angrenzenden Systems kann jedoch nicht garantiert werden. Sie müssen ein geeignetes Verfahren zur Lecksuche verwenden (etwa Heliummassenspektrometrie), um die Integrität des Vakuum- und des Abgassystems zu sichern. Der Einsatz standardmäßiger Vakuumrohrleitungen, zum Beispiel ISO-KF oder ISO-K, wird aufgrund der Tatsache empfohlen, dass diese entsprechend den Vakuumstandards leckdicht konstruiert werden können. Berücksichtigen Sie die Leckdichtheit Ihrer gesamten Installation, wenn Sie oberhalb der Obergrenze für die Zündfähigkeit pumpen. Überprüfen Sie die Leckrate regelmäßig.

Wenn die Bereitstellung eines leckdichten Systems sicherheitskritisch ist, sollte das Leistungsniveau des Vakuumsystems berechnet werden, um das Risikoniveau zu ermitteln.

Wenn die Leckdichtheit entscheidend ist, um gefährliche Bedingungen zu vermeiden, sind regelmäßige Kontrollen notwendig, um sicherzustellen, dass das System leckdicht bleibt. Hier insbesondere Wartungsaktivitäten berücksichtigen, wo versehentliche Luftlecks und mögliche Gefahrensituationen auftreten können.

Hinweis:

In den Fällen, wo die Dichtigkeit eines Systems sicherheitskritisch ist, es jedoch nicht möglich ist, das erforderliche Sicherheitsniveau durch konstruktive Maßnahmen zu erreichen, empfehlen wir die Verdünnung der Prozessgase durch ein Inertgas, um die Prozessgase unterhalb der Sicherheitsgrenze zu bringen.

2.4 Oxidantien

Oxidantien wie Sauerstoff (O_2), Ozon (O_3), Fluor (F_2), Stickstofftrifluorid (NF_3) oder Wolframhexafluorid (WF_6) werden oft in Vakuumsystemen verpumpt. Oxidantien reagieren leicht mit einer Vielzahl von Stoffen in einem Vakuumsystem, einschließlich Elastomeren wie O-Ringen, Polymeren und Ölen. Die Reaktion erzeugt häufig Wärme und einen erhöhten Gasdruck. Die daraus potenziell resultierenden Gefahren sind Feuer und Überdruck in der Pumpe und/oder im Abgassystem.

Zum sicheren Verpumpen dieser Gase müssen Sie die Sicherheitshinweise des Gaslieferanten sowie die folgenden Empfehlungen beachten:

- Bei Sauerstoffkonzentrationen über 25 Volumenprozent müssen PFPE-Schmiermittel und chemisch widerstandsfähige Polymere für Komponenten wie O-Ringe, Pumpenschieber usw. verwendet werden. Für das Pumpen von reinem Sauerstoff ist der Einsatz einer Pumpe, die speziell für Sauerstoff qualifiziert ist, erforderlich.
- Verwenden Sie PFPE-Schmiermittel in Pumpen, die zum Pumpen von Gasen verwendet werden, in denen der Prozentsatz des Sauerstoffs normalerweise unter 25 % des Volumens liegt, aber bei Störfällen über 25 % ansteigen kann. Wenn andere Oxidantien außer Sauerstoff gepumpt werden, konsultieren Sie den Lieferanten des Schmiermittels hinsichtlich der empfohlenen Konzentration.
- PFPE-Schmiermittel sind die bevorzugten Schmiermittel, Kohlenwasserstoff-Schmiermittel können jedoch verwendet werden, wenn eine geeignete Inertgas-Spülung verwendet wird, um sicherzustellen, dass das Gas keinen gefährlichen Konzentrationen des Oxidanten ausgesetzt ist.

Die tatsächliche Auswirkung dieser Oxidantien hängt vom Druck und der Temperatur des Gases ab; beides beeinflusst die Reaktionsrate. Im gleichen Maß, wie sich die Reaktionsrate erhöht, erhöht sich auch das Potenzial für einen möglichen Überdruck oder einen Brand. Unter normalen Bedingungen kommt es nicht vor, dass PFPE-Schmiermittel in einer ölgedichteten Drehschieber- oder einer Kolbenpumpenschmierbüchse bzw. einem Getriebekasten oxidiert oder zusammenbricht, dies reduziert daher die Explosionsgefahr.

Beachten Sie, dass die thermische Zersetzung von PFPE-Schmiermitteln bei oder oberhalb einer Temperatur von 290° C bei Vorhandensein von Luft oder Ferrometallen auftreten kann. Die thermische Zersetzungstemperatur sinkt jedoch auf 260° C, wenn Titan, Magnesium, Aluminium oder ihre Legierungen vorhanden sind.

Wenn Sie in ölgedichteten Drehschieber- oder Kolbenvakuumpumpen keine PFPE-Schmiermittel verwenden möchten, können Sie die Oxidantien mithilfe eines Inertgases (etwa Trockenstickstoff) auf eine sichere Konzentration verdünnen.

Diese Vorgehensweise ist allerdings nur bei niedrigen Durchsätzen der gasförmigen Oxidantien möglich. Sie müssen in Ihrem System Sicherheitsvorkehrungen installieren, um sicherzustellen, dass der minimale Durchsatz des inerten Verdünnungsgases für die Reduzierung der Konzentration der Oxidantien auf einen sicheren Wert immer verfügbar ist und dass der Oxidantiendurchsatz den maximal zulässigen Durchsatzwert niemals überschreitet. Sie müssen Ihr System so gestalten, dass der Fluss der Oxidantien sofort angehalten wird, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind.

Wir empfehlen Ihnen, für das Pumpen von Oxidantien unsere trockenlaufenden Pumpen zu verwenden (siehe *Trockenlaufende Pumpen* auf Seite 43). Trockenlaufende Pumpen haben keine Dichtungsflüssigkeiten im Schöpfraum; dies reduziert die Explosionsgefahr deutlich, wenn Sie mit einer trockenlaufenden Pumpe Oxidantien verpumpen. Wir empfehlen eine Spülung mit Inertgas für Lager und Getriebekasten, wenn ein Schmierstoff auf Kohlenwasserstoffbasis verwendet wird.

2.5 Pyrophore Materialien

Unter den meisten Bedingungen reagieren pyrophore Gase wie Silan (SiH_4) und Phosphin (PH_3) oder pyrophore Stäube unter Atmosphärendruck spontan mit der Luft; es kann daher zu Entzündungen kommen, wenn diese

Chemische Gefahrenquellen

Gase mit der Luft oder anderen Oxidantien in Berührung kommen und der Druck hoch genug ist, um die Entzündung zu unterstützen. Ein pyrophores Gas zündet spontan bei Kontakt mit Luft. Es ist daher grundsätzlich ein zündfähiges Gas mit einer oberen Zündfähigkeitsgrenze von 100 %. Dies kann geschehen, wenn Luft in das System gelangt oder wenn die Abgase des Systems mit der Atmosphäre in Berührung kommen. Die Wärme der Reaktion zwischen einem Oxidanten und einem pyrophoren Gas kann eine Zündquelle für explosive Materialien darstellen.

Jedoch sind nicht nur Gase selbstentzündlich. Auch Stäube und Pulver können selbstentzündlich sein, insbesondere Metallstäube und Pulver, die sich durch Sublimation in der Vakuumkammer gebildet haben. Diese Stäube haben keine schützende Oxidschicht gebildet und neigen daher zur Selbstentzündung, sobald sie in Kontakt mit Luft geraten.

Staub kann auch als Absorber für zündfähige und selbstentzündende Prozessgase dienen. Die Staub-Adsorptionsrate wird durch hohe Drücke, niedrige Temperaturen und große Oberflächen erhöht.

Wenn Abgase aus verschiedenen Prozessen durch ein gemeinsames Absaugsystem entlüftet werden, kann dies zu Entzündungen oder Explosionen führen. Es ist daher wichtig, dass Sie unabhängige Absaugsysteme verwenden, wenn Sie pyrophore Materialien verpumpen. Prozesse, die Phosphor verwenden, können zur Kondensation von festem Phosphor im Vakuumsystem oder im Auslass führen. In Anwesenheit von Luft und selbst bei geringer mechanischer Agitation (etwa durch die Aktivierung eines Ventils oder die durch eine Druckdifferenz ausgelöste Drehung der Pumpe) kann sich Phosphor spontan entzünden und toxische Gase freisetzen. Es wird empfohlen, die Pumpen mit einer Inertgasspülung und einer Mindesttemperatur zu betreiben, um die Kondensation von Phosphor auf ein Minimum zu begrenzen.

PFPE-Schmiermittel können Prozessgase absorbieren, die, im Falle pyrophorer Materialien, zu einer lokalen Zündung führen können, wenn das Schmiermittel der Luft ausgesetzt ist. Diese Gefahr kann besonders bei Wartungsarbeiten präsent sein, oder wenn Oxidantien nach einem pyrophoren Gas oder Staub durch das System gepumpt werden. Sie können die Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses reduzieren, wenn Sie trockenlaufende Pumpen verwenden, die keine Schmiermittel im Schöpfraum enthalten. Sie müssen sicherstellen, dass alle pyrophoren Stoffe vor der Belüftung oder der Handhabung passiviert wurden.

Bei der Handhabung von selbstentzündlichen Gasen, Stäuben oder Ablagerungen ist es wichtig, die Möglichkeit von Luftlecks auszuschließen, welche eine gefährliche Reaktion auslösen könnten. Kleine Luftlecks reagieren mit dem selbstentzündlichen Gas, führen jedoch möglicherweise nicht zu einer gefährlichen Situation; die zulässige Leckgröße ist abhängig von der jeweiligen Anwendung zu berechnen, und ein geeigneter Sicherheitsspielraum ist zu bestimmen.

In Filtern oder in den Rohrleitungen können sich zündfähige Stäube und Pulver ansammeln oder bilden. Wenn diese in Kontakt mit der Atmosphäre treten, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine heftige exotherme Reaktion. Während des Normalbetriebs, während Wartungsarbeiten und im Fehlerfall muss der Zufluss von Luft ausgeschlossen sein. Wenn die Systeme auf Atmosphärendruck belüftet werden müssen, wird empfohlen, Stickstoff zum Belüften einzusetzen und wenn das Vakuumsystem zerlegt werden soll, ist der Einsatz von Schutzkleidung für den Fall einer ungeplanten Reaktion vorzusehen.

Hinweis:

Alle gefährlichen Materialien sollten sorgfältig identifiziert werden, um eine geeignete Handhabungsstrategie festzulegen.

Vor dem Öffnen des Pumpsystems und bevor Luft eingelassen wird, ist es empfehlenswert, das Pumpsystem mit einem Spülgas zu betreiben, um adsorbierte Gase von möglicherweise vorhandenen Staubschichten zu trennen. Zum Entfernen der pyrophoren Gase im Staub sowie zur Oxidation des Staubs kann eine kontrollierte Oxidation durch das Pumpen von Sauerstoff in niedriger Konzentration verwendet werden. Hier mit äußerster Vorsicht vorgehen, da die Gefahr besteht, dass nur das Material an der Oberfläche reagiert, wogegen der größere Teil der Staubschicht das absorbierte Gas zurückhält.

Der Einsatz von Wasser- oder Ölbädern in die die Vakuumsystemkomponenten nach deren Ausbau eingetaucht werden, kann höchst effektiv sein; jedoch ist der Sicherheitsaspekt einer solchen Vorgehensweise in Abhängigkeit von der spezifischen Anwendung zu berücksichtigen.

Andere Materialien, wie Silizium und Polysilizium, können instabile Ablagerungen innerhalb von Vakuumsystemen bilden, wobei diese Materialien auf der Grenze zwischen selbstentzündlich und explosiv sind. Siehe Abschnitt „Explosivstoffe“.

2.6 Giftiges Material

In zahlreichen Vakuumanwendungen werden giftige Materialien verarbeitet und behandelt. Hierfür sind besondere Verfahren erforderlich.

Giftige Materialien sind naturgemäß gesundheitsgefährdend. Die Natur der jeweiligen Gefahr ist jedoch spezifisch für das Material und seine relative Konzentration. Sie müssen die Richtlinien für den korrekten Umgang, die der Lieferant des Materials zur Verfügung stellt, sowie alle geltenden gesetzlichen Bestimmungen beachten.

Vakuumsysteme sind ein ausgezeichnetes Mittel zur Handhabung giftiger Materialien, da ein Leck auf der Vakuumseite nur Luft von der Atmosphäre ziehen wird und giftige Prozessgase nicht entweichen können. Die Situation stellt sich etwas anders dar, sobald man die Auspuffleitung des Vakuumsystems betrachtet. Hier ist der Druck in der Nähe des Atmosphärendrucks oder gerade darüber, und ein Leck führt zum Entweichen gepumpter giftiger Gase.

Darüber hinaus sollten Sie die folgenden Punkte beachten:

- **Gasverdünnung** - Es gibt Einrichtungen, die die Verdünnung giftiger Prozessgase beim Durchgang durch die Vakuumpumpe und in den Auslass ermöglichen. Damit können Sie die Konzentration unter dem toxischen Grenzwert halten. Wir empfehlen, die Verdünnungsgasversorgung zu überwachen, damit ein Alarm ausgelöst wird, wenn die Versorgung ausfällt. Konsultieren Sie besonders bei ölgedichteten Pumpen die Betriebsanleitung der Pumpe für eventuell benötigte Ölrückführungs-Kits.
- **Wellendichtung (trockenlaufende Pumpen)** - Zahlreiche trockenlaufende Vakuumpumpen verwenden ein System für die Gasspülung, um sicherzustellen, dass Prozessgase nicht in Getriebe und Lager und damit möglicherweise in die das Vakuumsystem umgebende Atmosphäre eindringen. Beim Umgang mit giftigen Materialien müssen Sie die Integrität dieser Gasversorgung sicherstellen. Es müssen nicht entlüftende Regler in Kombination mit einem

Rückschlagventil verwendet werden, wie unter *Druckregler* auf Seite 45 erläutert.

- **Wellendichtung (andere Pumpen)** - Ölgeflutete Wellendichtungskonstruktionen (z. B. mechanische EH Roots-Vakuumpumpen und EM Drehschieberpumpen) minimieren das Risiko von Prozessgaslecks (oder des Eindringens von Luft) und können eine visuelle Warnung (bei Öllecks oder sinkendem Ölstand) ausgeben, bevor eine Gefahrensituation entsteht. Andere Dichtungskonstruktionen bieten möglicherweise keine ausreichende Warnung vor einem Ausfall.
- **Magnetantriebe** - Wenn eine vollständige, hermetische Abdichtung erforderlich ist, wenden Sie sich für eine weitere Beratung an Ihr Kundendienstteam. Berücksichtigen Sie alle möglichen Quellen für Lecks. Abhängig von der Pumpe können bestimmte Dichtungen angeboten werden, zum Beispiel Magnetantriebe und doppelte mechanische Dichtungen.

Wenn Druckentlastungsventile oder Bruchscheiben für die Entlastung von Überdruck verwendet werden, achten Sie darauf, dass diese sicher in ein geeignetes Abgassystem entlüftet werden, um Vergiftungsgefahren zu vermeiden.

Der Auspuff des Vakuumsystems ist sorgfältig zu betrachten, da es möglicherweise nicht möglich ist, giftige Materialien direkt in die Atmosphäre zu entlassen. In diesem Fall wird empfohlen, sich von einer Firma, die sich mit der Abgasnachbehandlung befasst, beraten zu lassen, um einen sicheren Weg zu finden, wie der Abgasstrom entsorgt werden kann.

Wenn giftige Gase gepumpt wurden, besteht die hohe Wahrscheinlichkeit, dass die internen Oberflächen oder eingeschlossene interne Volumen giftiges Material enthalten. Bevor Pumpen oder Bauteile, die in Kontakt mit giftigen Gasen gekommen sind, entfernt werden, empfehlen wir, diese Bauteile zu spülen, um alle gefährlichen Gase zu entfernen.

Hinweis:

Alle gefährlichen Materialien sollten sorgfältig identifiziert werden, um eine geeignete Handhabungsstrategie festzulegen.

Beim Entfernen der Pumpe alle Vakuumflansche abdichten; Teile, die nicht abgedichtet werden können, in luftdichten Behältern lagern. Wenn eine Pumpe zu Wartungszwecken auseinandergenommen wird, ist es wichtig, diese an eine Serviceeinrichtung zu schicken, wo spezielle Dekontaminationseinrichtungen verfügbar sind.

Wenn Sie eine verunreinigte Vakuumausrüstung zum Kundendienst oder zur Wartung an uns zurückgeben, müssen Sie die jeweilige Vorgehensweise (Formular HS1) befolgen und die in der mit den Geräten mitgelieferten Betriebsanleitung bereitgestellte Erklärung (Formular HS2) ausfüllen.

2.7 Korrosive Materialien

In zahlreichen Vakuumanwendungen werden korrosive Materialien verarbeitet und behandelt. Hierfür sind besondere Verfahren erforderlich. Korrosive Gase sind in der Lage, das Vakuumsystem zu beschädigen und Gefahrensituationen herbeizuführen.

Einige korrosive Materialien, wie etwa Fluor, Chlor, andere Halogene oder Halide sowie oxidierende Stoffe wie Ozon oder reduzierende Stoffe wie Wasserstoffsulfid können ebenfalls die Materialien angreifen, mit denen sie in Kontakt kommen, ohne dass dazu eine Flüssigkeit vorhanden sein muss. In diesen Fällen sollte der Teildruck des korrosiven Materials durch

Verwendung eines geeigneten Verdünnungsgases minimiert werden. Die Konstruktionsmaterialien des Vakuumsystems und des Pumpenmodells sollten so ausgewählt werden, dass sie mit dem jeweiligen Gas in den erwarteten Konzentrationen kompatibel sind. Hohe Temperaturen können die Korrosion beschleunigen und sollten daher minimiert werden, sofern dies der jeweilige Prozess zulässt. Überprüfen Sie die Wartungsintervalle, um die Auswirkungen korrosiver Materialien auf das System zu berücksichtigen.

Alle korrosiven Materialien sollten identifiziert werden, und deren Kompatibilität mit den Materialien in einem Vakuumsystem ist zu bestätigen; jedoch ist es wichtig, folgendes zu beachten:

- Korrosion entsteht durch physikalische, chemische oder elektrochemische Reaktionen.
- Die am häufigsten vorkommende Korrosion ist die der metallischen Korrosion, die auf einer elektrochemischen Reaktion beruht und einen Elektrolyten voraussetzt; dies bedeutet normalerweise das Vorhandensein von Wasser. Wenn das korrosive Material anhydrid [wasserfrei] ist, kann eine Reaktion nicht stattfinden.
- Bestimmte Chemikalien, zum Beispiel Halogene oder organische Säuren, können mit dem Material der Pumpe auch ohne Vorhandensein von Wasser reagieren und Reaktionsprodukte erzeugen, die aus den Ionen des gepumpten Materials und dem korrosiven Gas bestehen. Abhängig von der Art des Materials sind die Reaktionsprodukte in der Lage, sich in Schichten abzulagern, welche dann eine weitere Reaktion verhindern/minimieren können. Einige Reaktionsprodukte, z. B. $AlCl_3$; SiF_4 haben einen relativ hohen Dampfdruck und werden mit dem Gasstrom entfernt. Unter solchen Bedingungen wird das Material der Pumpe mit der Zeit abgetragen und somit die Pumpe zerstört.
- Stark oxidierend wirkende Materialien wie NF_3 oder Fluor können mit organischem Material reagieren, das in der Pumpe verwendet wird, und diese Bauteile zerstören. Solche Materialien sind Dichtungen, Schmieröl etc.
- Solange korrosive Materialien in der Dampfphase verbleiben, kann normalerweise keine Korrosion stattfinden.
- Chemische oder physikalische Reaktionen können auf Polymer- und Keramik-Materialien stattfinden.

Beachten Sie beim Pumpen korrosiver Materialien mit Vakuumpumpen die folgenden Punkte:

- **Eindringen von Feuchtigkeit** - Achten Sie besonders darauf, das Eindringen feuchter Luft zu verhindern; dies kann korrosive Effekte verstärken. Zum Ausschaltvorgang sollte eine Inertspülung gehören, um korrosive Stoffe vor dem Ausschalten aus dem System zu spülen.
- **Verdünnung** – Verwenden Sie ein geeignetes Verdünnungsgas, um die Kondensation korrosiver Dämpfe und die dadurch verursachte Korrosion zu verhindern.
- **Temperatur** – Erhöhen Sie die Temperatur der Pumpe und der Abgasleitung, um die Kondensation von Wasserdampf zu verhindern; dies hilft, die Korrosion zu begrenzen. In manchen Fällen können höhere Temperaturen die Korrosion auch verstärken, siehe folgender Abschnitt.
- **Korrosion von Sicherheitseinrichtungen** – Wenn sicherheitskritische Einrichtungen (wie Flammensperrenelemente, Temperatursensoren usw.) durch korrosive Produkte im Prozessgasdurchfluss beschädigt werden könnten, müssen ihre Produktionsmaterialien so ausgewählt werden, dass diese Gefahr beseitigt wird.

- **Phasenänderungen** - Ungeplante Phasenänderungen können Kondensation verursachen. Zur Vermeidung dieser Gefahr ist es erforderlich, alle Änderungen von Temperatur und Druck zu berücksichtigen.
- **Ungeplante Reaktionen** - Ungeplante chemische Reaktionen können zur Bildung korrosiver Produkte führen. Achten Sie sorgfältig auf das Risiko übergreifender Kontaminierungen, wenn Geräte für verschiedene Zwecke eingesetzt werden.

Um Korrosion zu vermeiden, können folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

Die Zugabe eines Spülgases durch den Gasballasteinlass oder am Auspuff der Pumpe kann sicherstellen, dass korrosive Gase in der Dampfphase verbleiben.

Wenn Pumpen abgeschaltet werden, ist die Beibehaltung eines kleinen Spülgasdurchflusses (zum Beispiel zum Spülen der Wellendichtung) empfehlenswert, um korrosive Materialien aus der Pumpe auszutragen und das Einströmen feuchter Luft aus der Auspuffleitung zu verhindern. Zusätzlich verhindert die Installation eines Rückschlagventils in der Abgasleitung bei der Pumpe eine Rückströmung von Feuchtigkeit beim Abschalten der Pumpe. Dies ist beim Einsatz von Nasswäschern im Rahmen der weiteren Abgasreinigung sehr empfehlenswert.

Kalte Oberflächen und Oberflächen, die hohen Drücken ausgesetzt sind, bei denen die Wahrscheinlichkeit einer Kondensation sehr hoch ist, können einer Korrosion ausgesetzt sein. Das höchste Risiko besteht daher in der Auspuffleitung, insbesondere wenn diese Leitung durch einen kalten Ort (z.B. im Freien) geführt wird. Daher ist bei der Spezifizierung der Abgasleitung diese so auszulegen, dass eine gefährliche Korrosion vermieden wird. Dichtungsmaterialien sollten sorgfältig ausgewählt werden, um deren Kompatibilität mit den korrosiven Materialien sicherzustellen.

Die Verwendung von Aluminium oder Aluminiumlegierungen wird für Pumpen, die Halogene verarbeiten, nicht empfohlen; Um eine Reaktion zwischen dem Pumpenmaterial und Halogenen oder Säuren zu vermeiden, ist die Beschichtung der Pumpkammer eine gängige Praxis. Die Verwendung von Kupfer oder Messing in Kontakt mit den Prozessgasen wird nicht empfohlen.

Zum Pumpen von korrosiven Gasen oder starken Oxidantien durch ölgedichtete Pumpen oder durch Pumpen mit fettgeschmierten Lagern im Vakuum wird PFPE empfohlen, um eine Zersetzung des Öls zu verhindern.

2.8 Zusammenfassung - chemische Gefahrenquellen

- Bedenken Sie alle möglichen chemischen Reaktionen in Ihrem System.
- Kalkulieren Sie anomale chemische Reaktionen ein, einschließlich solcher, die bei Störfällen auftreten.
- Verwenden Sie die Materialsicherheitsdatenblätter, wenn Sie die potenziellen Gefahrenquellen im Zusammenhang mit Ihren Prozessmaterialien bestimmen.
- Wenden Sie Verdünnungstechniken an, um Reaktionen mit Oxidantien und zündfähigen Materialien zu minimieren.
- In der EU müssen Sie eine HazLoc-Vakuumpumpe mit den jeweiligen Zertifizierungen verwenden, wenn eine zündfähige Zone angegeben ist. Für alle anderen Regionen empfehlen wir die Verwendung von Pumpen, die nach HazLoc zertifiziert wurden, wenn möglich.

Chemische Gefahrenquellen

- Verwenden Sie die richtigen Schmiermittel in Ihrer Pumpe, wenn Sie Oxidantien verpumpen, und erwägen Sie die Verwendung einer trockenlaufenden Pumpe.
- Verwenden Sie keine Schwermetalle im Gaspfad Ihres Prozesssystems, wenn Ihr Prozess Natriumazid verwendet oder produziert.
- Gehen Sie beim Umgang mit giftigen, korrosiven oder instabilen Materialien besonders sorgfältig vor.

3 Physikalische Gefahrenquellen

Arten von Überdruckgefahren

Ein Überdruck bei Komponenten des Vakuumsystems kann aus folgenden Ursachen resultieren:

- Einleitung von unter Hochdruck stehendem Gas in das System
- Kompression von Gas durch das System
- Plötzlicher Anstieg der Temperatur flüchtiger Gase im System
- Eine Phasenänderung, die zur Zersetzung eines Feststoffes führt
- Eine Reaktion im Vakuumsystem hat den Auslass blockiert. Weitere Ursachen sind möglich.

3.1 Überdruck im Pumpenauslass

Eine typische Ursache für Überdruck in der Abgasleitung ist eine Blockierung oder Verstopfung des Abgassystems. Dies kann zum Ausfall der Pumpe oder anderer Komponenten des Systems führen.

Vakuumpumpen sind Kompressoren, die speziell dafür ausgelegt sind, mit hohen Auslass-zu-Einlass-Druckverhältnissen zu arbeiten. Zusätzlich zum durch den Betrieb der Pumpe verursachten potenziellen Überdruck kann auch die Einleitung eines verdichteten Gases (wie etwa eines Spül- oder Verdünnungsgases) zum Überdruck im System führen, wenn das Abgassystem blockiert ist.

Vakuumsysteme werden normalerweise für Drücke ausgelegt und betrieben, die von knapp über Atmosphärendruck bis Vollvakuum reichen. Sie sind nicht für hohen Druck ausgelegt. Daher ist Vorsicht geboten, um Bedingungen zu vermeiden, die zu gefährlichen Überdrucksituationen führen könnten. Die Bereiche, die berücksichtigt werden müssen, sind folgende („Auslassblockierung“, „Überdruck durch Spülsysteme“, „Nenndruck“).

Wenn eine Pumpe mit auslassseitigen Flammensperren oder anderen Vorrichtungen wie Filtern oder Kondensatoren ausgestattet ist, ist es sehr wichtig, dass der Abgasgegendruck nicht den Höchstwert überschreitet, der in der Betriebsanleitung des Vakuumsystems angegeben ist. Verwenden Sie ein geeignetes Wartungsprogramm, um sicherzustellen, dass keine Prozessablagerungen das Abgassystem und die Flammensperre blockieren.

Wenn dies nicht praktikabel ist, kann ein Drucksensor zwischen Pumpe und Flammensperre dazu dienen, Blockierungen zu erkennen. Ähnliche Überlegungen gelten für andere Abgasvorrichtungen, wie etwa Filter oder Kondensatoren.

Sublimierungen oder Phasenänderungen können zu Blockierungen der Prozessrohrleitungen durch Feststoffablagerungen und damit zu Überdruckgefahren führen. Die Bildung von Prozessablagerungen in der Abgasleitung kann zu einem Überdruck führen, wenn die Pumpe mit einem hohen Gasdurchsatz betrieben wird. Dies führt normalerweise dazu, dass die Vakuumpumpe aufgrund eines zu hohen Motorstroms stoppt. Unter bestimmten Bedingungen kann die Vakuumpumpe jedoch trotzdem einen erheblichen, gefährlichen Überdruck erzeugen. Das Potenzial für Prozessablagerungen, die sich in der Abgasleitung des Vakuumsystems ansammeln können, sollte bewertet werden. Wenn dies nicht vermieden werden kann, sollte eine Form der Druckmessung verwendet werden, um Überdruckbedingungen zu erkennen. Es sollte darauf geachtet werden,

dass der Drucksensor nicht selbst durch Prozessablagerungen verunreinigt wird.

Konsultieren Sie die mit Ihrem Vakuumpumpsystem mitgelieferte Betriebsanleitung für die maximalen und empfohlenen kontinuierlichen Gegendruckwerte aller Ihrer Abgaskomponenten, einschließlich der Vakuumpumpe. Konstruieren Sie das Abgassystem so, dass diese Einschränkungen eingehalten werden können.

Die Grenzwerte für den Dauerbetrieb finden Sie in der Betriebsanleitung der Pumpe.

3.1.1 Schutz gegen Überdruck am Auslass

Allgemein wird empfohlen, die Pumpen so zu betreiben, dass die Abgase in ein frei entlüftetes Abgassystem geleitet werden. Ihr Abgassystem kann jedoch Komponenten enthalten, die eine Blockierung des Systems verursachen können. Wenn dies der Fall ist, müssen Sie auch geeignete Maßnahmen zum Schutz gegen Überdruck treffen. Solche Methoden sind u. a.:

Komponente	Schutzmethode
Ventil in der Abgasleitung	Konstruieren Sie das Ventil so, dass es beim Betrieb der Pumpe immer offen ist.
	Verwendung einer Druckentlastungsbypass.
Abgasabscheider	Verwendung einer Druckentlastungsbypass.
	Verwenden Sie einen Drucküberwacher, und verbinden Sie diesen so mit der Pumpe, dass diese ausgeschaltet wird, wenn der Abgasdruck zu hoch ist.
Flammensperre	Messung des Abgasdrucks.
	Differenzdruckmessung

Zusammenfassung: Wenn sich der Druck im Abgassystem dem maximal zulässigen Druck nähert:

- Reduzieren Sie den Druck durch ein Gerät im Gaspfad parallel zur Blockierung.
- Reduzieren Sie den Druck an der Quelle. Halten Sie die Pumpe an, oder stoppen Sie jegliche Versorgung verdichteter Gase.

3.1.2 Blockierung der Auslasses

Der Auslass eines Vakuumsystems kann aucn verschiedene Weisen blockiert werden, was zu einem Überdruck führt. Die offensichtlichste Ursache ist die Anbringung eines Ventils in der Abgasleitung. Wenn sich das Ventil nicht öffnet, erzeugt die Vakuumpumpe einen Druck, der zu einem gefährlichen Überdruck führen kann. Wenn ein Ventil angebracht werden muss, sollte dessen Betrieb sorgfältig mit dem Betrieb der Vakuumpumpe verknüpft werden.

Bei einigen Anwendungen ist es möglich, ein Temperaturmanagement an der Pumpe und/oder am Abgasrohr zu verwenden, um ein Blockieren zu vermeiden. Eine solche Technik würde bei Prozessnebenprodukten mit hohem Dampfdruck verwendet werden.

3.2 Überdruck im Einlass

3.2.1 Versorgung verdichteter Gase und Gegendruck

Es geschieht häufig, dass der erforderliche Nenndruck der Leitung zwischen Pumpe und Vakuumsystem unterschätzt wird, da angenommen wird, dass diese Leitung keinem Druck über Atmosphärendruck ausgesetzt ist. In Wirklichkeit gilt dies nur unter normalen Betriebsbedingungen. Sie sollten den erforderlichen Nenndruck schätzen, um durch anomale Bedingungen oder Störfälle entstehende höhere Druckwerte einzukalkulieren.

Eine häufige Ursache für Überdruck in Pumpeneinlassleitungen ist das Einleiten verdichteter Gase (etwa von Spülgasen), wenn die Pumpe nicht in Betrieb ist. Wenn die Komponenten in der Einlassleitung nicht für die daraus resultierenden Druckwerte geeignet sind, bricht die Leitung, und Prozessgase treten aus dem System aus. Ein Rückstrom von Gasen aus dem System in eine Prozesskammer, die dem resultierenden Druck selbst nicht standhalten kann, führt ebenfalls zu Brüchen und Lecks.

Wenn Sie eine Versorgung verdichteter Gase an Ihr System über Druckregler anschließen, die so ausgelegt sind, dass sie einen Fluss mit niedrigem Druck gewährleisten, achten Sie darauf, dass der Druck den Nennwerten des Systems entspricht.

Die häufig verwendeten nicht entlüftenden Druckregler führen dazu, dass der Druck im System bis zum Druck der Gasversorgung zum Regler steigt, wenn kein Prozessgas durch das System strömt. Sie müssen daher eines der folgenden zwei Verfahren verwenden, um Überdruck zu vermeiden:

- Reduzieren des Drucks, Ermöglichung der Umgehung der Pumpe durch die Gase und des Abströmens in einen frei entlüfteten Auslass
- Überwachung des Systemdrucks und Verwendung eines positiven Verschlussventils zur Absperrung der Versorgung verdichteten Gases bei voreingestelltem Druck.

3.2.2 Überdruck durch Spülsysteme

Vakuumsysteme sind in der Regel mit Spülsystemen ausgestattet, um das zuverlässige Pumpen von Prozessgasen zu unterstützen und gefährliche chemische Reaktionen zu verhindern. Auch wenn diese Spülungen eine sehr nützliche Funktion erfüllen, können sie ein eigenes Risiko für Überdruck darstellen, wenn die Art ihrer Implementierung nicht sorgfältig bedacht wird.

Das Spülgas wird aus einem Spülgastank oder einer Flasche zugeführt und erreicht das Vakuumsystem mit einem Versorgungsdruck zwischen 2 bar(g) und 10 bar(g). In den meisten Fällen ist es notwendig, diesen Druck durch den Einsatz eines Druckreglers zu reduzieren. Ein Druckregler reduziert den Gasdruck vom eingehenden Versorgungsdruck auf den gewünschten Betriebsdruck. Betriebsdrücke im Bereich von 0,1 bar(g) bis 1 bar(g) sind normal.

Wenn das Spülgas in einem offenen System verwendet wird, funktionieren diese geregelten Spülsysteme gut. Bei geschlossenen Systemen oder bei Schaffung eines geschlossenen Systems, beispielswiese durch das Schließen eines Ventils, besteht jedoch die Gefahr, dass ein Überdruck erzeugt wird.

Es gibt zwei Arten von Druckreglern: Die erste Art wird als „entlastender“ Regler bezeichnet, während die andere Art als „nicht entlastender“ Regler bezeichnet wird; die beiden Arten funktionieren auf unterschiedliche Weise und können eigene Gefahren verursachen.

Entlastende Regler steuern den Druck in einem geschlossenen System, indem sie überschüssigen Druck durch Belüftung an die Atmosphäre abgeben. Obwohl dies eine gute Funktion zu sein scheint, muss bedacht werden, dass dieser überschüssige Druck in Form eines gefährlichen Prozessgases vorliegen kann.

Nicht entlastende Regler sind für den Einsatz in offenen Systemen vorgesehen und reduzieren den Druck bei entstandenem Überdruck nicht. Wenn ein nicht entlastender Regler in Verbindung mit einem geschlossenen System verwendet wird, kommt es im Laufe der Zeit zu einem kleinen Gasleck am Versorgungsanschluss des Reglers in das System; dies führt letzten Endes dazu, dass der Druck im System dem Versorgungsdruck entspricht. Da die meisten offenen Vakuumsysteme bei einem Ausfallzustand zu einem geschlossenen System werden können, besteht bei der Verwendung dieses Gerätetyps ein Risiko, das berücksichtigt werden muss.

Eine Lösung besteht darin, einen entlastenden Regler mit einem Rückschlagventil zwischen Regler und Vakuumsystem zu verwenden. Der Regler stellt sicher, dass der Druck auf der Systemseite auf dem gewünschten Druck gehalten wird, während das Rückschlagventil einen Rückstrom von Gas aus dem System zum Regler verhindert. Rückschlagventile sind mit einer Druckdifferenz bis hinunter zu 25 mbar erhältlich, wodurch der Druckabfall minimiert wird. Wenn es andere Quellen für Druck im Vakuumsystem gibt, müssen diese unabhängig betrachtet werden, da der entlastende Regler diesen Überdruck nicht durch Belüftung senken wird.

Wenn Belüftungsventile zur Regelung von Überdruck verwendet werden, müssen der Typ des belüfteten Gases sowie der Ort, an den das Gas entweicht, berücksichtigt werden. Es ist möglich, dass gefährliche Prozessgase in die lokale Atmosphäre entweichen, wenn dies nicht berücksichtigt wird.

3.2.3 Inkorrekter Betrieb der Pumpe

Besondere Vorsicht ist angebracht, bis sichergestellt ist, dass die Pumpe korrekt funktioniert.

Wenn die Rotationsrichtung der Pumpe falsch ist und die Pumpe mit blockiertem Einlass betrieben wird, entsteht hoher Druck in der Einlassleitung. Dies kann zu Brüchen und Rissen in der Pumpe, der Leitung und/oder von Komponenten der Leitung führen.

Verwenden Sie immer eine lose durch Schrauben am Pumpeneinlass gesicherte Blindplatte, bis Sie sicher sind, dass die Drehrichtung der Pumpe korrekt ist.

Der Betrieb bei höheren Drehzahlen kann zum Bruch der Pumpe führen. Betreiben Sie die Pumpe nicht mit Drehzahlen oberhalb der maximalen Nenndrehzahl; dies ist besonders wichtig, wenn Frequenzumrichter für die Geschwindigkeitskontrolle verwendet werden.

3.3 Temperatur

Temperaturwechselbeanspruchung

Wenn Anlagen Temperaturwechseln ausgesetzt sind (z. B. aufgrund des normalen Vakuumpumpen-Abpumpzyklus), muss beachtet werden, dass diese Temperaturwechsel im Laufe der Zeit zum Lösen von Befestigungselementen und Armaturen führen können, wenn diese

nicht ordnungsgemäß mit Dichtmitteln oder mechanischen Vorrichtungen gesichert sind. Wenn die Gefahr von Temperaturwechseln besteht und sich durch das Lösen von Befestigungselementen eine gefährliche Situation ergeben könnte, muss der feste Sitz dieser Befestigungselemente regelmäßig überprüft werden.

heisse Oberflächenn

Vakuumsysteme und Vakuumpumpen weisen aufgrund der Art des Prozesses häufig heiße Oberflächen auf. Bei einigen Prozessen ist es beispielsweise notwendig, die Abgasleitungen zu beheizen, um die Kondensation gefährlicher Gase zu verhindern. An Stellen, an denen heiße Oberflächen mit Temperaturen über 70 °C auftreten, sollte ein Warnschild an der heißen Oberfläche angebracht werden. Wenn die Temperatur über 100 °C beträgt, muss die Oberfläche durch eine Schutzvorrichtung abgesichert werden, um einen Kontakt zu verhindern.

Umgebungstemperatur (Betrieb)

Vakuumsysteme sind normalerweise für den Betrieb bei einer maximalen Betriebstemperatur in der Umgebung von 40 °C ausgelegt. Bei Temperaturen oberhalb dieses Bereichs können Elastomerdichtungen überhitzt werden, was Lecks und gefährliche Zersetzungsprodukte zur Folge haben könnte. Die mit hohen Betriebstemperaturen in der Umgebung verbundenen Gefahren müssen verstanden werden.

Außerdem können sie auch aufgrund der Versprödung von Elastomermaterialien wie O-Ringen und der Kondensation von Prozessnebenprodukten Gefahren herbeiführen, die zur Bildung gefährlicher Flüssigkeiten führen können. Eine Gefahrenanalyse sollte die mindestens erforderliche Temperatur der Vakuumausrüstung sowie die Möglichkeit der Kondensation von Prozessnebenprodukten berücksichtigen.

Beheizte Auspuffleitungen

Abgasleitungen sollten beheizt werden, wenn Prozessgase kondensieren oder sich in den Abgasleitungen verfestigen könnten. Dies kann zu Blockierungen, Korrosion oder Explosionen führen. Wenn eine Beheizung der Abgasleitung eingesetzt wird, ist es unerlässlich, die Sicherheit eines solchen Systems zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere bei Ausfallbedingungen, bei denen die Temperatur unkontrolliert ansteigen und elastomere Dichtungen innerhalb der Rohrleitungen überhitzen könnte.

Auslegungstemperatur

Wenn ein Behälter oder eine Rohrleitung für den Druckbetrieb ausgelegt ist, muss die maximale Auslegungstemperatur festgelegt werden, bis zu der der Behälter oder die Rohrleitung druckfest ist. Betreiben Sie ein System nicht oberhalb der maximalen Temperatur, für das es ausgelegt wurde.

3.4 Zusammenfassung - physikalische Gefahrenquellen

- Achten Sie bei Sicherheitsberechnungen darauf, die sicheren Arbeitsdruckwerte für alle Komponenten des Systems zu berücksichtigen.
- Stellen Sie sicher, dass der Pumpenauslass nicht blockiert oder verstopft werden kann.
- Wenn ein hohes Risiko für Druckwerte oberhalb der Nenndruckwerte in irgendeinem Teil Ihres Vakuumsystems besteht, sollte Ihr System korrekt positionierte Druckmessvorrichtungen enthalten. Diese müssen

mit Ihrem Steuersystem verbunden sein, damit das System in einen sicheren Zustand versetzt wird, wenn ein Überdruck festgestellt wird.

- Berücksichtigen Sie anormale Bedingungen und Störfälle bei der Bestimmung des erforderlichen Nenndrucks für die Komponenten des Vakuumsystems und der Pumpe.
- Achten Sie darauf, die korrekte Art von Druckentlastungsvorrichtung zu verwenden, die für Ihre Anwendung geeignet ist.
- Stellen Sie sicher, dass die Versorgung mit verdichteten Gasen angemessen reguliert und überwacht wird. Schalten Sie diese Versorgungen aus, wenn die Pumpe ausgeschaltet wird.
- Achten Sie nach Möglichkeit darauf, dass der Versorgungsdruck zu allen regulierten Spülungen geringer ist als der maximale statische Druck des Systems. Achten Sie andernfalls darauf, dass beim Ausfall einer Komponente eine Druckentlastung möglich ist.

4 Systemaufbau

4.1 Nenndruckwerte in einem System

Wie im Abschnitt *Physikalische Gefahrenquellen* auf Seite 28 erläutert, sind Leitungen und Komponenten von Vakuumsystemen für Innendruckwerte unterhalb des Atmosphärendrucks ausgelegt. In der Praxis ist es jedoch zumeist erforderlich, das System auch für Innendruckwerte oberhalb des Atmosphärendrucks zu konstruieren. Wenn notwendig, müssen Sie Vorrichtungen zur Druckentlastung verwenden, um einen Überdruck im Störfall zu vermeiden.

Es ist wichtig, die Einlassleitungen und andere Einlasskomponenten nicht als die schwächsten Bestandteile des Systems zu konstruieren, weil etwa angenommen wird, dass sie immer, auch bei Störfällen, unter Vakuum stehen.

Abgassysteme müssen stets so ausgelegt sein, dass während des Betriebs ein möglichst geringer Gegendruck auf die Pumpe sichergestellt wird. Es ist jedoch wichtig, dass Sie das Abgassystem mit einem angemessenen Nenndruck konstruieren. Es muss für den Druck, der von der Pumpe und beispielsweise durch die Einleitung verdichteter Gase in das System verursacht werden kann, sowie für die Verwendung mit den verwendeten Vorrichtungen zum Schutz vor Überdruck geeignet sein.

Denken Sie bei Ihrer Gefahrenanalyse stets an die folgenden Punkte:

- Externe Einlässe, wie etwa Inertgasanschlüsse
- Isolierung und Beengung von allen möglichen Quellen, besonders in Abgasleitungen
- Reaktionen zwischen Prozessgasen.

Beachten Sie: Wenn ein Behälter eine flüchtige Flüssigkeit enthält und vom Rest des Systems isoliert werden kann, kann externe Hitze (etwa durch ein Feuer) zu einem internen Druck führen, der den Nenndruck des Behälters übersteigt. In diesem Fall sollten Sie überlegen, ob eine geeignete Druckentlastung erforderlich ist.

4.2 Eliminierung statischer Volumina

Ein stagnierendes Volumen ist ein Volumen in einer Vakuumleitung oder einer Komponente, das nicht dem Strom von Gas ausgesetzt ist. Beispiele dafür sind der Getriebekasten einer mechanischen Rootspumpe oder die Messröhre eines Instruments. Mit Ventilen versehene Leitungen oder Stickstoffgaseinlassleitungen können ebenfalls zu statischen Volumina werden, wenn sie isoliert sind.

Sie müssen statische Volumina berücksichtigen, wenn Sie die Mischung und Reaktion von Prozessgasen bedenken, die normalerweise nicht in der Prozesskammer anwesend sind. Leitungen, Pumpen und Prozesskammern transportieren Gase normalerweise linear, wobei ein Gas oder Gasgemisch auf das andere folgt. Gase mit linearem Durchfluss vermischen sich normalerweise nicht, solange die Geschwindigkeit des Abgases nicht durch eine Blockierung/Verengung reduziert wird. Ein statisches Volumen wird nicht gespült und kann durch Prozessgase aufgefüllt werden, wenn der Druck im System steigt oder fällt. Auf diese Weise können Gase, die in einer Phase des Prozesses das System durchströmen, aufgehalten werden. Diese können dann mit Gasen aus einer nachfolgenden Phase des Prozesses

reagieren. Spülungen und eine gründliche Entleerung der Kammer zwischen Einleitungen inkompatibler Gase hilft, Explosionen zu vermeiden.

Gehen Sie besonders sorgfältig vor, wenn Sie die gegenseitige Kontamination in statischen Volumina berücksichtigen, insbesondere wenn die Gase potenziell explosiv sind. Insbesondere müssen Sie an die Gefahr der Anreicherung in Filtern, Abscheidern und anderen Komponenten denken. Verwenden Sie nach Möglichkeit äußerst integre, kontinuierliche Ströme inerter Spülgase, um die Gefahr der gegenseitigen Kontaminierung der Gase auf ein Minimum zu reduzieren. Dies kann sicherstellen, dass Sie keine Konzentrationen von Gemischen erreichen, die problematisch werden könnten.

Beim Verpumpen zündfähiger Gase können sich statische Volumina mit potenziell explosiven Gasen oder Dämpfen füllen, die durch normales Spülen nicht entfernt werden können. Wenn dazu noch eine Zündquelle vorhanden sein könnte, sollten Sie eine gesonderte Spülung der statischen Volumina in Erwägung ziehen.

4.3 Abgasabsaugsystem

Es ist wichtig, stets die korrekten Abgasabsaugsystem für Ihren Prozess zu verwenden. Wie bereits erwähnt, muss das Absaugsystem so konstruiert sein, dass es den Betriebsdruckwerten standhalten kann und, wenn gefährliche Materialien produziert oder verarbeitet werden, ausreichend leckdicht sein, um die Prozessmaterialien und ihre Nebenprodukte sicher einzuschließen und gefährliche Emissionen in die Atmosphäre zu verhindern.

4.4 Verwendung von Schutzsystemen mit Flammensperren (HazLoc-Systemen)

Wenn das Gemisch aus verpumpten Gasen und Dämpfen dauerhaft oder für längere Zeit zündfähig ist (d. h. Zone-0-Bedingung) (siehe *Vermeidung der zündfähigen Zone* auf Seite 15) und die Gefahr besteht, dass eine Zündquelle (siehe *Zündquellen* auf Seite 36) im Normalbetrieb oder bei einer vorhersehbaren Fehlfunktion aktiv wird, müssen Sie Ihrer Primärpumpe Flammensperren hinzufügen (siehe auch *Flammensperren* auf Seite 45). Um die Flammenübertragung entlang Rohrleitungen oder in die umgebende Atmosphäre zu verhindern, sollte die Verwendung von Flammensperren für Vakuumpumpen geprüft werden.

Wenn ein zündfähiges Gemisch für einen längeren Zeitraum vorhanden ist, muss ein genehmigter und getesteter Temperaturgeber an der Einlass-Flammensperre installiert werden, um einen kontinuierlichen Brand erkennen zu können. Wenn ein kontinuierlicher Brand erkannt wird, muss die Pumpe ausgeschaltet und von der Brennstoffquelle isoliert werden. Bitte wenden Sie sich an Ihr lokales Kundendienstzentrum, um sich zu genehmigten Flammensperren und Temperaturgebern beraten zu lassen. Zum thermischen Schutz der Flammensperre und der Pumpe bei seltenen Fehlfunktionen (Zone 0) der Pumpe muss ein Abgastemperaturgeber im Abgasauslass der Pumpe installiert werden. Die Ausschaltpunkte sind vom jeweiligen Pumpensystem abhängig. Lesen Sie das relevante HazLoc-Handbuch für die Pumpe.

Wenn der Temperaturgeber am Einlass oder Auslass seinen maximalen Grenzwert erreicht, was einen Störfall darstellt, müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden. Diese sind von der jeweiligen Anwendung abhängig, können jedoch Folgendes umfassen:

- **Anhalten der Brennstoffzufuhr** - Durch Schließen eines Ventils am Einlass der Vakuumpumpe wird die Zufuhr von Brennstoff in die Vakuumpumpe angehalten
- **Anhalten der Zündquelle** - Anhalten der Vakuumpumpe durch Abschalten der Stromversorgung des Motors
- **Neutralisierung des Brandbereichs** - Durch die schnelle Einleitung von Inertgas in den Brandbereich (in der Regel, jedoch nicht immer, im Abgassammelrohr der Pumpe) werden Flammen gelöscht. Beachten Sie, dass sich eine Flamme erneut entzünden kann, wenn die Zündquelle nicht entfernt wird.

4.5 Eindringen von Wasser durch Lecks in das Vakuumsystem

Wenn Prozessgase und Dämpfe gepumpt werden, die bei Kontakt mit Wasser Gefahren verursachen können, muss die Leckdichtheit des Kühlwassersystems berücksichtigt werden. Alternative Kühlflüssigkeiten können in Betracht gezogen werden. Bitte wenden Sie sich jedoch zuvor an das örtliche Kundendienstzentrum.

4.6 Zurücksaugen von Abgasen

Wenn eine Vakuumpumpe bei bestehendem Unterdruck am Einlass abgeschaltet wird, kommt es zu einem Rücksaugen von Abgasen aus den Rohrleitungen für die Abgase oder dem Abgassystem. Wenn dieses Gas Luft/Sauerstoff enthält, können unerwünschte Reaktionen mit Prozessgasen oder internen Ablagerungen auftreten. Es wird empfohlen, den Auslass der Vakuumpumpe mit einem Rückschlagventil auszustatten, wenn möglich, um den Rückfluss von Abgasen zu verlangsamen. Darüber hinaus stellt die Verwendung einer Stickstoffspülung beim Stopp der Vakuumpumpe sicher, dass Luft aus dem Vakuumsystem ausgeschlossen wird.

4.7 Zündquellen

Wenn Vakuumpumpen zum Verpumpen zündfähiger Gemische verwendet werden, müssen Sie alle möglichen Zündquellen berücksichtigen. Nachfolgend finden Sie einige Bereiche, die Sie im Rahmen allgemeiner Prüfungen berücksichtigen sollten. Je nach Ihrem Prozess können Sie dabei einige oder alle Zündquellen vermeiden. Wenn Sie aufgrund Ihrer Prozessbedingungen oder der Systemanforderungen eine Zündquelle nicht vermeiden können, müssen Sie Ihr System entsprechend einrichten.

Hinweis:

Einige Pumpen wurden von einem Drittanbieter dahingehend zertifiziert, dass (bei korrekter Anwendung) eine interne Explosion eingedämmt wird.

- **Mechanischer Kontakt** - Der mechanische Kontakt zwischen rotierenden und stationären Teilen in der Vakuumpumpe und im Vakuumsystem kann eine Zündquelle darstellen. Alle Vakuumpumpen werden so konstruiert und gebaut, dass die korrekten Laufzwischenräume innerhalb der Pumpe unter allen Betriebsbedingungen erhalten bleiben. Um diese Zündquelle zu vermeiden, ist es wichtig, Ablagerungen von Material auf den Innenflächen des Geräts zu vermeiden bzw. die Pumpe zu reinigen. Die Lager müssen in gutem Zustand gehalten werden, ausreichend geschmiert sein und mit einem geeigneten Spülgas gespült werden, um den Kontakt mit Prozessgasen zu verhindern. Der empfohlene Wartungsplan für die Lager muss eingehalten werden, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

- **Eindringen von Partikeln** - In alle Pumpenmechanismen können potenziell Partikel eindringen, die durch den Prozess entstehen oder ein Ergebnis des Systemfertigungsprozesses sind. Wenn diese zwischen eine sich bewegende und eine statische Oberfläche geraten, kann dadurch Reibungswärme entstehen. Ein geeignetes Ansaugsieb oder ein Filter verhindert das Eindringen von Partikeln in die Vakuumpumpe bzw. reduziert deren Größe und Volumen auf sichere Werte. Achten Sie auf eine geeignete Wartung von Ansaugsieb oder Filter.
- **Staubaufbau** - Der Aufbau zusammengedrückten feinen Staubs in internen Zwischenräumen ist möglich, wenn ein Pumpenmechanismus mit einem staubgenerierenden Prozess verbunden ist. Selbst bei Verwendung von Ansaug-Staubfiltern können immer noch kleine Staubpartikel in die Pumpe eindringen. Bei kleinen Abmessungsveränderungen aufgrund thermischer Prozesse kann zusammengepresster Staub mit sich bewegenden Oberflächen in Berührung kommen und dort Reibungswärme verursachen. Zusätzlich kann diese Wärme den Staub entzünden. Weitere Einzelheiten finden Sie im Abschnitt *Pyrophore Materialien* auf Seite 21.
- **Kompressionswärme (Selbstentzündung)** - Die interne Verdichtungswärme in einem Kompressor muss im Zusammenhang mit der Selbstentzündungstemperatur aller gepumpten Gase und Dämpfe berücksichtigt werden. Sie müssen sicherstellen, dass die Temperaturklassifikation der der verpumpten Gase zumindest entspricht.
- **Heiße Oberflächen** - Wenn zündfähige Gase oder Dämpfe mit heißen Oberflächen in Berührung kommen können, kann es zu einer Zündung kommen, wenn die Selbstentzündungstemperatur überschritten wird. Hinweis: Pumpen und Flammensperren sollten nicht thermisch isoliert werden, wenn dies zu internen (und externen) erhöhten Oberflächentemperaturen und dadurch zu einer Selbstentzündung führen könnte.
- **Externe Wärme** - Externe Wärme kann beispielweise bei einem Brand in der unmittelbaren Umgebung der Vakuumausrüstung auftreten. In solchen Fällen kann es zu einem internen Druck, der den maximalen statischen Druck des Systems überschreitet, sowie zu Temperaturen über der Selbstentzündungstemperatur kommen. Dies sollte im Rahmen der Systemgefahrenanalyse berücksichtigt werden.
- **Heißer Prozessgasdurchfluss** - Hohe Einlassgastemperaturen können dazu führen, dass die Temperatur interner (oder externer) Oberflächen die Selbstentzündungstemperatur der gepumpten Materialien überschreitet. Hohe Temperaturen des Einlassgases können auch zum Festlaufen von Rotor oder Stator führen. Konsultieren Sie die Betriebsanleitung Ihrer Vakuumpumpe für die maximal zulässigen internen Gastemperaturen. Wenden Sie sich für eine weitere Beratung an Ihr örtliches Kundendienstzentrum.
- **Katalytische Reaktion** - Das Vorhandensein bestimmter Metalle kann zu katalytischen Zündungen führen. Alle Konstruktionsmaterialien in dem Vakuumsystem müssen hinsichtlich ihrer potenziellen katalytischen Interaktionen mit den verpumpten Gasen oder Dämpfen untersucht werden.
- **Pyrophore Reaktion** - Die Wärme einer aufgrund des Eindringens von Luft oder Oxidantien verursachten Zündung pyrophorer Materialien kann eine Zündquelle für möglicherweise vorhandene zündfähige Materialien darstellen. Siehe *Pyrophore Materialien* auf Seite 21.
- **Statische Elektrizität** - Unter bestimmten Bedingungen kann sich in isolierten Komponenten eine statische Elektrizität aufbauen, die dann in Form eines Funkens zur Erde entladen wird. Die Möglichkeit

des Aufbaus statischer Elektrizität muss beim Entwurf des Systems berücksichtigt werden.

- **Blitz** - Unter freiem Himmel kann ein Blitzeinschlag die für eine Zündung erforderliche Energie liefern. Diese Gefahr muss beim Entwurf des Systems berücksichtigt werden.

4.8 Zusammenfassung - Systemaufbau

Für den Entwurf sicherer Vakuumpumpsysteme müssen die folgenden Punkte berücksichtigt werden. Je nach Ihrer Anwendungen kommen noch weitere Aspekte in Betracht.

- Wenn gefährliche Materialien verpumpt werden, muss das System so konstruiert sein, dass es beim Ausfall in einen sicheren Zustand übergeht.
- Verwenden Sie PFPE- (Perfluorpolyether) Schmiermittel in Pumpen, die Oxidantien verpumpen.
- Wenn Sie die Konzentration des zündfähigen Gases mit Inertgasen auf einen Wert unterhalb des unteren Grenzwerts für eine Explosion oder die Zündfähigkeit oder unterhalb des unteren Grenzwerts für Oxidantien senken, müssen Sie die Integrität der Versorgung mit dem Inertgas sicherstellen.
- Die Konzentration kann auch oberhalb des oberen Grenzwerts für eine Explosion oder die Zündfähigkeit gehalten werden. In diesem Fall müssen jedoch geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um sicherzustellen, dass die Konzentration nicht den zündfähigen Bereich erreichen kann.
- Prüfen Sie die Systeme und Geräte vor Verwendung auf Leckdichtheit.
- Verdünnen Sie pyrophore Gase mit Inertgasen auf sichere Konzentrationen, bevor sie in die Atmosphäre gelangen oder mit sich mit oxidierenden Gasen mischen.
- Natriumazid und Schwermetalle dürfen an keinem Punkt des Gaspfades in Ihrem System miteinander in Berührung kommen.
- Der maximale Druck des Systems darf niemals die Sicherheitsgrenzwerte der einzelnen Teile des Systems überschreiten.
- Berücksichtigen Sie immer die Sicherheitsinformationen zu den Substanzen, die Sie verpumpen wollen.
- Ziehen Sie die Verwendung trockenlaufender Pumpen anstelle ölgedichteter Drehschieber- oder Kolbenpumpen in Betracht, wenn im Zusammenhang mit dem Öl im Schöpfraum Gefahren bestehen.
- Wenn Vakuumpumpen zum Pumpen potenziell zündfähiger Gemische verwendet werden, müssen Sie alle möglichen Zündquellen sowie die potenziellen Folgen möglicher Explosionen berücksichtigen.

5 Allgemeine Praxis

5.1 Bildung von Ablagerungen in Rohrleitungen

Bei einigen Anwendungen bilden sich möglicherweise Ablagerungen in der Vorvakuumleitung des Vakuumsystems. Eine solche Anwendung wäre zum Beispiel die Bildung von Siliziumschichten nach einem Abscheidungsschritt bei der Herstellung von Halbleitern. Diese festen Ablagerungen bilden sich in der Dampfphase und bilden Schichten, von denen mehrere Gefahren ausgehen.

- Bei dicker werdenden Schichten besteht die Möglichkeit, dass Teile davon abplatzen und in Richtung der Vakuumpumpe transportiert werden. In manchen Fällen kann die Vakuumpumpe durch solche Schichten beschädigt werden und in seltenen Fällen ist es möglich, dass die Schichten zu erheblichen mechanischen Schäden bis hin zu Rissen im Pumpengehäuse führen.
- Die Schichten lagern sich unter Vakuumbedingungen ab und weisen häufig daher keinerlei schützende Oxidschichten auf, die einen Abbrand bei Kontakt mit Sauerstoff verhindern könnten. Es ist Vorsicht geboten, wenn diese Materialien schließlich der Atmosphäre ausgesetzt werden.
- Der Aufbau erheblicher Schichten kann zu Blockaden in den Vorvakuumpumpenleitungen führen, mit einhergehendem Vakuumleistungsverlust. Wenn Prozessablagerungen von den Wänden der Vorvakuumleitung abplatzen könnten, sollte eine Rohrabzweigung in der Vorvakuumleitung installiert werden, um die größten Partikel abzufangen. Zusätzlich sollte ein Filter, bestehend aus einem Metallsieb, senkrecht neben der Rohrabzweigung oder ein Zyklonseparator installiert werden.

Wenn die Prozessablagerungen gefährlicher Natur sein könnten, muss der Anwender des Vakuumsystems eine Risikoanalyse durchführen, um die sichere Handhabung dieser Materialien zu ermitteln.

5.2 Verwendung von Frequenzumrichtern – Verwendung von Passwörtern

Frequenzumrichter werden häufig verwendet, um die Leistung eines Vakuumsystems zu verbessern. Jedoch muss in diesem Fall darauf geachtet werden, die maximale Drehzahl korrekt einzustellen.

Viele Frequenzumrichter können eine maximale Ausgangsdrehzahl von bis zu 200 Hz erzeugen, was in Verbindung mit dem richtigen Motortyp zu einer Drehzahl von 12.000 U/min führen kann. Da die meisten Vakuumpumpen mit Drehzahlen zwischen 3000 U/min und 6000 U/min betrieben werden, besteht ein erhebliches Risiko, wenn der Frequenzumrichter versehentlich mit einer höheren Drehzahl programmiert wird.

Bei Verwendung von Frequenzumrichtern wird empfohlen, die maximale Drehzahl in der Parameterliste durch ein Passwort zu schützen. Dies trägt dazu bei, sicherzustellen, dass eine versehentliche Verstellung des Parameters für die maximale Drehzahl vermieden wird.

5.3 Einlassventil

Das Trennventil, welches zwischen dem Vakuumsystem und der Prozesskammer angeordnet ist, wird häufig dazu verwendet, das Vakuumsystem während Wartungsarbeiten abzutrennen. Dieses Ventil muss während der Wartungsarbeiten in der richtigen Position sein.

Wenn die Position dieses Ventils sicherheitskritisch ist, wird empfohlen, sie im Rahmen der Gefahrenanalyse zu überprüfen, um sichere Betriebsverfahren zu ermitteln.

5.4 Beheizte Fallen

Die Verwendung von Heißfallen zum Abfangen von Prozessgasen bzw. zur Reaktion mit Prozessgasen, bevor diese die Vakuumpumpe erreichen, birgt eigene Gefahren. Die Hauptgefahr ist thermisch. Diese Fallen werden in der Regel mit Innentemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius betrieben. Diese Temperatur wird normalerweise nicht vollständig auf die äußeren Oberflächen übertragen. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass angrenzende Bauteile wie elastomere O-Ringe usw. thermisch beschädigt werden. Bei der Spezifizierung einer beheizten Falle ist besondere Vorsicht geboten.

5.5 Kühlfallen

Beim Einsatz einer Stickstoffkühlfalle zur Kondensation von Materialien, die bei Atmosphärendruck normalerweise gas- oder dampfförmig vorliegen, müssen unbedingt die Folgen einer unbeabsichtigten Erwärmung berücksichtigt werden. Wenn flüssige Gase und Dämpfe erwärmt werden, erzeugen diese große Gas/ Dampf-Volumina, die, sofern sie in ein geschlossenes System abgelassen werden, zu einem gefährlichen Überdruck führen können. Der Belüftung des Systems sollte sorgfältige Beachtung geschenkt werden, um die Möglichkeit eines gefährlichen Überdrucks zu vermeiden.

5.6 Kondensatoren

Kondensatoren sind eine sehr effektive Methode, um Dampf aus einem Prozessstrom zu entfernen. Es ist jedoch unbedingt erforderlich, die Möglichkeit einer Blockierung des Kondensators zu berücksichtigen. Normalerweise wird ein Kondensator zusammen mit einem darunter befindlichen Auffangbehälter verwendet, in dem sich Flüssigkeiten sammeln können; dieser Auffangbehälter ist dann mit einem Füllstandsanzeiger ausgestattet, um ermitteln zu können, wann der Auffangbehälter entleert werden muss. Wenn der Auffangbehälter nicht geleert wird, besteht die Gefahr, dass Flüssigkeit in die Vakuumpumpe fließt und beginnt, die Abgasleitung zu blockieren.

5.7 Ebenen der Systemintegrität

Schutzverfahren durch Verdünnung mit Inertgas wurden bereits in vorherigen Abschnitten besprochen. Das Prinzip dabei besteht darin, dass Sie ein Inertgas (normalerweise Stickstoff) mit Ihren Prozessgasen mischen, um diese auf eine Konzentration zu verdünnen, bei der keine Explosionen oder Reaktionen auftreten können. Wenn Sie die Gasverdünnung als primäres Sicherheitssystem zum Schutz gegen Explosionen verwenden, benötigen Sie möglicherweise ein hoch integres Alarm- und Verriegelungssystem, um den Betrieb des Systems zu verhindern, wenn das Gasverdünnungssystem nicht funktioniert. Berücksichtigen Sie die Integrität des Gasverdünnungssystems während der Risikoprüfung (Gefahrenanalyse); diese hängt von den internen Zonen (d. h. der Risikoebene) ab, die entstehen, wenn das Verdünnungssystem ausfällt. Gehen Sie bei dieser Risikoprüfung immer nach den aktuellsten empfohlenen Verfahrensweisen vor, um die erforderliche Systemintegrität festzustellen.

Wenn zum Beispiel ein Verdünnungssystem verwendet wird, um die Konzentration eines zündfähigen Gases außerhalb des zündfähigen Bereichs

zu halten und ein Ausfall der Verdünnung dazu führen würde, dass sich das gepumpte Gas dauerhaft oder für längere Zeit (zum Beispiel in ATEX-Zone 0 für mehr als 50 % der Zeit) in der zündfähigen Zone befinden würde, muss das Verdünnungssystem eine der folgenden Bedingungen erfüllen:

- Es muss auch bei selten vorkommenden Fehlfunktionen ausfallsicher sein.
- Es muss bei zwei gleichzeitig auftretenden Fehlern sicher sein.
- Es muss aus zwei unabhängigen Verdünnungszufuhrsystemen bestehen.
- Alternativ gilt: Wenn das Ergebnis des Ausfalls des Verdünnungssystems darin bestehen würde, dass sich das gepumpte Gas gelegentlich (zum Beispiel gemäß ATEX Zone 1) in der zündfähigen Zone befinden würde, muss das Verdünnungssystem eine der folgenden Bedingungen erfüllen:
    - Es muss auch bei einer erwarteten Fehlfunktion ausfallsicher sein.
    - Es muss bei Vorliegen eines Fehlers sicher sein.

Wenn es unwahrscheinlich ist, dass das gepumpte Gas als Ergebnis des Ausfalls des Verdünnungssystems die zündfähige Zone erreicht, oder wenn dies nur für kurze Zeit geschehen würde (zum Beispiel gemäß ATEX Zone 2), muss das Verdünnungssystem bei Normalbetrieb sicher sein.

6 Die Wahl der richtigen Geräte

Um sicherzugehen, dass Sie für Ihre Anwendung die richtigen Geräte auswählen, müssen Sie die Grenzwerte berücksichtigen, innerhalb derer das System betrieben werden soll. Die technischen Daten unserer Geräte finden Sie in unserem Produktkatalog, in den Marketingveröffentlichungen sowie in den Betriebsanleitungen der Geräte. In den meisten Fällen können Sie auf Anfrage weitere Informationen erhalten. Bei Fragen und weiterem Beratungsbedarf wenden Sie sich bitte an uns.

Beachten Sie beim Entwurf Ihres Vakuumsystems die relevanten mechanischen Pumpenparameter, zum Beispiel:

- Maximaler statischer Druck (Einlass und Auslass)
- Maximaler Betriebseinlassdruck
- Maximaler Betriebsabgasdruck
- Leitwert der Einlass- und Auslasskomponenten
- Druckspezifikation der anderen an der Pumpe angebrachten Komponenten
- Drucküberwachung im Falle einer Blockierung der Abgasleitung
- Bei ölgedichteten Drehschieber- und Kolbenpumpen müssen Sie auch Folgendes berücksichtigen:
    - Gasballastdurchfluss
    - Schmierbüchsenspülfluss
    - Gase und Dämpfe, die sich in der Schmierbüchse verfangen
    - Gase und Dämpfe, die von dem Öl in der Schmierbüchse absorbiert werden.

Der maximale statische Druck ist der maximale Druck, dem ein Einlass- oder Auslassanschluss einer Pumpe ausgesetzt werden kann, wenn die Pumpe nicht in Betrieb ist. Der Druck hängt von der mechanischen Konstruktion der Pumpe ab.

Ölgedichtete Drehschieber- und Kolbenpumpen sind für den Betrieb mit Einlassdruckwerten bei oder unterhalb des Atmosphärendrucks ausgelegt; obwohl der maximale statische Nenndruck über dem Atmosphärendruck liegen kann, darf der maximale Einlassdruck der Pumpe im Betrieb den Atmosphärendruck nicht übersteigen. Einige Hersteller begrenzen den kontinuierlichen Einlassdruck ihrer Pumpen auf Werte unterhalb des Atmosphärendrucks. Der maximale Einlassdruck einer Pumpe im Betrieb wird als maximaler Betriebsdruck bezeichnet.

Der Grund dafür, dass der maximale Betriebsdruck begrenzt ist, steht nicht notwendigerweise im Zusammenhang mit der mechanischen Integrität der Pumpe. Der maximale Druck ist normalerweise proportional zur Nennleistung der Pumpe bei hohem Einlassdruckwerten und steht in Verbindung mit der potenziellen Gefahr einer Überhitzung der mechanischen Komponenten der Pumpe oder des Elektromotors.

Aus ähnlichen Gründen empfehlen wir, den Auslassdruck Ihrer Vakuumpumpe so niedrig wie möglich zu halten (typischerweise bei oder unter 0,15 bar gemessen, $1{,}15 \times 10^5$ Pa, für den Dauerbetrieb). Pumpen sind für den Betrieb mit unbehinderten Auslässen ausgelegt, und ein Auslassdruck von 0,15 bar gemessen ($1{,}15 \times 10^5$ Pa) ist normalerweise ausreichend, um Abgase durch das Abgasabsaugsystem und die Behandlungsgeräte zu leiten.

6.1 Ölgedichtete Drehschieber- und Kolbenpumpen

Unsere ölgedichteten Drehschieberpumpen umfassen die Drehschieberpumpen der Serien E1M, E2M, ES und RV sowie die Stokes Microvac-Serie ölgedichteter Kolbenpumpen. Allgemein sind alle Vakuumpumpen für den Betrieb mit Einlassdruckwerten unterhalb des Atmosphärendrucks und bei freier Entlüftung des Pumpenauslasses in die Atmosphäre ausgelegt.

Ölgedichtete Drehschieber- und Kolbenpumpen sind positive Verdrängungskompressoren, die sehr hohe Abgasdruckwerte generieren können, wenn der Auslass blockiert oder nicht frei ist. In diesen Fällen kann der Druck den sicheren statischen Druck der Schmierbüchse der Pumpe und in vielen Fällen auch den sicheren statischen Druck stromabwärts gelegener Teile des Systems (wie etwa von Polypropylenabscheidern oder Vakuum-O-Ring-Verbindungen) übersteigen. Daher empfehlen wir nachdrücklich, einen Abgasdrucksensor hoher Integrität in der Leitung des Pumpenauslasses anzubringen.

Um ein sicheres Verdünnungsniveau zu erreichen, kann der Gasballast durch eine Schmierbüchsenspülung (wo dies möglich ist) erweitert werden, die mit der Schmierbüchse an der Pumpe verbunden ist. Eine Erhöhung des Gasballast- und des Schmierbüchsenspülflusses erhöht die Ölmenge, die zum Abgassystem transportiert wird.

Alle unsere ölgedichteten Pumpen verfügen über Schmierbüchsen mit erheblichem Volumen, in denen zündfähige oder explosive Gasgemische zurückbleiben können. Das Öl in der Schmierbüchse kann Dämpfe oder gasförmige Nebenprodukte effektiv absorbieren oder kondensieren. Die im Öl enthaltenen Dämpfe und Gase können pyrophor oder giftig sein. Sie müssen daher spezielle Prozeduren einrichten, um die Sicherheit bei allen Wartungsarbeiten zu gewährleisten.

6.2 Trockenlaufende Pumpen

Der maximale Betriebsdruck wird durch die gleichen Faktoren begrenzt, die auch für ölgedichtete Pumpen relevant sind (d. h. von der potenziellen Gefahr einer Überhitzung der mechanischen Komponenten der Pumpe oder des Elektromotors).

Unsere trockenlaufenden Pumpen sind Kompressoren mit positiver Verdrängung, die einen hohen Abgasdruck erzeugen können. Wenn die Pumpen in ein System integriert werden, in dem der Prozess feste Nebenprodukte generieren kann (was zu einer Blockierung der Abgasleitung führen könnte), empfehlen wir nachdrücklich die Anbringung eines Abgasdruckmessgeräts mit hoher Integrität. Konsultieren Sie die Betriebsanleitung der Pumpe für die Betriebsdruckwerte, auf die die Schalter eingestellt werden sollten.

Unsere trockenlaufenden Pumpen verfügen über eine hohe Durchsatzkapazität für den Gasballast. In den Pumpenmechanismus kann ein Verdünnungsgas wie Stickstoff eingeleitet werden, um die Reaktionsunterdrückung zu optimieren. Die Gasspülflusswerte finden Sie in der Betriebsanleitung der Pumpe.

6.3 Leitungsentwurf

6.3.1 Faltenbälge

Faltenbälge sind kurze, dünnwandige Komponenten mit tiefen Falten. Sie werden verwendet, um die Übertragung von Vibrationen von einer Pumpe auf Ihr Vakuumsystem zu reduzieren.

Installieren Sie Faltenbälge immer in gerader Linie, wobei beide Enden fest versiegelt sind. Bei korrekter Installation halten die Faltenbälge einem kleinen positiven internen Druck stand (weitere Einzelheiten finden Sie in der Betriebsanleitung zu Ihren Faltenbälgen). Verwenden Sie keine Faltenbälge an Auslässen trockenlaufender Pumpen; verwenden Sie stattdessen umflochtene flexible Elemente (vgl. *Wellschläuche* auf Seite 44).

Berücksichtigen Sie bei Anwendungen mit intensiver Beanspruchung die Möglichkeit der Materialermüdung der Faltenbälge.

6.3.2 Wellschläuche

Wellschläuche verfügen über einen dickeren Wandabschnitt und flachere Falten als Faltenbälge. Wellschläuche sind gut für die Verbindung von Vakuumsystemkomponenten geeignet und helfen dabei, kleinere Bewegungen oder mangelnde Ausrichtungen in starren Vakuumleitungen auszugleichen. Wellschläuche können daher auch relativ scharf gebogen werden, ohne ihre Position zu verlieren.

Wellschläuche sind für die Installation in statischen Systemen gedacht. Sie sind nicht für wiederholtes Biegen geeignet, was schnell zu Materialermüdungen führen kann.

Wenn Sie Wellschläuche verwenden, verwenden Sie die geringstmögliche Länge und vermeiden Sie unnötige Biegungen. Bei Anwendungen, bei denen hohe Abgasdruckwerte auftreten können, sollten flexible Elemente mit Metallgeflecht eingesetzt werden.

Flexible Elemente mit Metallgeflecht sind Faltenbälge mit einer äußeren Schutzschicht aus verwobenem Edelstahlgeflecht. Wenn Sie ein flexibles Element mit Metallgeflecht installieren, müssen Sie dabei den minimalen Biegeradius berücksichtigen, der in der Betriebsanleitung zu den flexiblen Elementen mit Metallgeflecht angegeben ist.

6.3.3 Ankerpunkte

Leitungen und Leitungskomponenten müssen korrekt verankert werden. Wenn Sie etwa Faltenbälge nicht korrekt verankern, reduzieren diese nicht die Vibrationen von der Pumpe, was zu Materialermüdung in den Leitungen führen kann.

6.3.4 Dichtungen

Wo die Möglichkeit besteht, dass positive Druckwerte in Teilen des Vakuumsystems (auch unter Fehlerbedingungen) auftreten, müssen Sie geeignete Versiegelungen und Materialien verwenden, die dem erwarteten Vakuum und den positiven Druckwerten standhalten können.

6.4 Physikalischer Überdruckschutz

Wie bereits erwähnt, kann Überdruck durch Einengungen oder Blockierungen im System oder in einer seiner Komponenten verursacht werden. Der Grund für den Überdruck kann der Strom verdichteten

Gases von der Pumpe oder von externen Quellen (wie etwa für ein Verdünnungssystem) sein. Es gibt zwei Hauptverfahren zum Schutz des Systems gegen Überdruck: Druckentlastung und Überdruckalarm/-auslösung, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

6.4.1 Druckentlastung

Sie können Berstscheiben oder Druckentlastungsventile verwenden, um Überdruck zu beseitigen. Der Betriebsdruck des Geräts muss unterhalb des Nenndrucks des Systems liegen. Sie müssen diese Geräte über geeignete Leitungen mit einem Bereich verbinden, in dem Ihre Prozessgase sicher freigesetzt werden können und in dem keine Entlüftungseinschränkungen bestehen. Wenn Ihr Prozess zu festen Nebenprodukten führt, müssen die Druckentlastungsvorrichtungen regelmäßig geprüft werden, um sicherzustellen, dass sie nicht blockiert oder eingeengt sind. Bei der Konstruktion solcher Schutzvorrichtungen müssen die Auswirkungen von Druckpulsierungen auf die Lebensdauer der Berstscheibe bzw. des Ventils berücksichtigt werden.

6.4.2 Überdruckalarm/Auslösung

Dieses Schutzverfahren wird von uns häufig verwendet. Es wird für alle Systeme empfohlen, ist aber möglicherweise nicht für Systeme geeignet, die feste Nebenprodukte produzieren.

6.4.3 Druckregler

Es gibt zwei Hauptarten von Druckreglern: entlüftende und nicht entlüftende Regler. Entlüftende Regler entlüften Gas in die Atmosphäre oder zu einer separaten Entlüftungsleitung zur Wahrung eines konstanten Auslassdrucks unter Nicht-Fluss-Bedingungen. Entlüftende Regler werden vor allem dort eingesetzt, wo die Integrität der Leitungen von äußerster Wichtigkeit ist.

Nicht entlüftende Regler können nur einen konstanten Auslassdruck unter Fluss-Bedingungen wahren. Unter Nicht-Fluss-Bedingungen kann der Auslassdruck mancher Regler bis zum Niveau des Versorgungsdrucks steigen. Die Anstiegsrate hängt von den Eigenschaften des Reglers und dem Volumen, mit dem sein Auslass verbunden ist, ab. Der Anstieg kann innerhalb weniger Minuten oder über mehrere Monate hinweg erfolgen.

Druckregler sind nicht als Absperrventile konstruiert und müssen zusammen mit einem geeigneten Isolationsgerät (etwa einem Magnetventil) verwendet werden, wenn die Isolierung erforderlich ist.

Andernfalls müssen Sie Maßnahmen für die sichere Entlüftung von Überdrucken treffen.

6.4.4 Flammensperren

Flammensperren sind keine Hilfsmittel zur Vermeidung von Explosionen. Sie dienen dazu, die Ausbreitung von Flammen entlang einer Leitung oder Führung zu verhindern (siehe Abschnitt *Verwendung von Schutzsystemen mit Flammensperren (HazLoc-Systemen)* auf Seite 35). Flammensperren haben eine große Oberfläche und kleine Leitwertlücken zur Flammenfront und ersticken so die Flammen. Flammensperren sind normalerweise nur für Systeme geeignet, die für saubere Gase oder Dämpfe verwendet werden.

Die Explosionsenergie von Gasgemischen nimmt mit dem Druck zu. Die meisten Flammensperren sind zum Schutz von Bereichen konstruiert, in denen der interne Druck den Atmosphärendruck nicht übersteigt. Sie müssen sicherstellen, dass der Betriebsdruck im Abgasabsaugsystem, das

zur Flammensperre führt, den maximalen Betriebsdruck nicht überschreitet. Bei für die Verwendung mit trockenlaufenden Vakuumpumpen für die chemische Industrie zertifizierten Sperren konsultieren Sie bitte die Betriebsanleitung des Produkts für die maximal zulässigen Druckwerte. Hierbei müssen Sie auch den maximal zulässigen Gegendruck Ihrer Vakuumpumpe berücksichtigen.

Flammensperren entfernen die Verbrennungshitze von der Flammenfront, weshalb für sie eine maximale sichere Betriebstemperatur gilt. Diese Temperatur darf nicht durch eine Begleitheizung, Isolierung oder die Temperatur des Gasstroms überschritten werden.

Die Fähigkeit einer Flammensperre zum Sperren einer Flamme hängt von der Geschwindigkeit der Flammenfront ab, die wiederum von ihrem Abstand zur Zündquelle abhängt. Bei Verwendung mit unseren chemischen Vakuumpumpen sollte eine enge Verbindung mit Einlass und Auslass bestehen. Die Verwendung von Krümmer- und T-Stücken zwischen Pumpe und Flammensperre ist für manche Pumpen unter bestimmten Bedingungen zulässig. Wenden Sie sich an uns, um sich beraten zu lassen.

6.5 Spülsysteme

Die Geräte können mit Inertgasspülsystemen ausgestattet werden, um Prozessgase zu entfernen, die nach dem Ende eines Prozesszyklus eventuell im System verbleiben.

Die korrekte Anwendung einer Spülung kann sicherstellen, dass korrosive Produkte entfernt werden, so dass diese die Pumpe oder, wichtiger noch, Schutzsysteme wie Flammensperren nicht beschädigen können. Darüber hinaus stellt das Entfernen der Prozessgase sicher, dass keine unerwünschten und potenziell gefährlichen chemischen Reaktionen zwischen in verschiedenen Prozesszyklen verwendeten Materialien auftreten.

6.6 Zusammenfassung - die Wahl der richtigen Geräte

- Wählen Sie den korrekten Gerätetyp für Ihre Anwendung.
- Bringen Sie alle geeigneten Sicherheitsvorrichtungen an, um bei Fehlern die Sicherheit garantieren zu können.
- Eliminieren Sie statische Volumina.
- Achten Sie darauf, dass das System angemessen kontrolliert und geregelt wird.
- Verwenden Sie, wo sinnvoll, Druckentlastungsvorrichtungen.
- Verwenden Sie, wo sinnvoll, Flammensperren.
- Prüfen Sie Systeme und Geräte vor der Verwendung auf Lecks.

7 Betriebsverfahren und Schulungen

Die Betriebssicherheit der Geräte erfordert eine gute Schulung, klare und knappe Anweisungen und regelmäßige Wartung. Es ist sehr wichtig, dass alle Personen, die mit Vakuumausrüstung umgehen, angemessen geschult und qualifiziert sind und, wo nötig, bei der Arbeit überwacht werden.

Wenn Sie sich hinsichtlich des Betriebs oder der Sicherheit unserer Geräte nicht vollständig sicher sind, können Sie sich jederzeit an uns wenden.

Die Sicherheit eines Vakuumsystems wird maßgeblich durch die Konstruktion beeinflusst; die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass der korrekte Betrieb des Systems ebenso wichtig ist, insbesondere bei Berücksichtigung des Potenzials für eine falsche Verwendung oder für Ausfälle.

Es ist hier nicht möglich, eine vollständige Liste der Gefahren bereitzustellen, die mit dem Betrieb eines bestimmten Vakuumsystems verbunden sind; dies sollte vom Endbenutzer mithilfe einer geeigneten Risikoanalyse ermittelt werden.

Die Erstellung einer detaillierten Betriebsanweisung ist besonders wichtig. Sie sollte nicht nur den Normalbetrieb abdecken, sondern auch das Vorgehen bei Wartungen oder Ausfällen beschreiben. Gerade geplante Ereignisse führen häufig zu unerwarteten Gefahren und möglichen Beschädigungen oder Verletzungen.

Im Folgenden werden einige Beispiele aufgeführt, um eine Vorstellung von der Art unerwarteter Gefahren zu geben, die auftreten können:

- Ein Prozess zur Herstellung reiner Metallpulver innerhalb des Vakuumsystems wird mit Stickstoffspülungen betrieben, um sicherzustellen, dass die Atmosphäre im Vakuumsystem sauerstofffrei ist. Während einer Prozessstörung muss die Kammer geöffnet werden, um einige beschädigte Komponenten zu entfernen. Dieses Verfahren dauert nur wenige Minuten. Während dieser Zeit wird die Vakuumpumpe durch das Einlass-Absperrventil von der Kammer isoliert. Nach Abschluss der Wartung wird die Kammer verschlossen und anschließend über die Prozesspumpe evakuiert. Die Kammer enthält leider jedoch Umgebungsluft und der daraus resultierende Luftstoß in die Vakuumpumpe führt zu einer Entzündung der reaktiven Metallpulver.
- Bei einer Ofenanwendung werden die Prozessmaterialien über einen Filter in der Abgasleitung abgesaugt, der regelmäßig gereinigt werden muss. Aufgrund des Produktionsdrucks wurde der Reinigungsschritt ausgelassen. Im Laufe der Zeit wurde der Filter blockiert. Dies führte dazu, dass die Vakuumpumpe aufgrund von Überdruck im Abgas abgeschaltet wurde. Normalerweise wäre dies ein gefahrloser Zustand gewesen, hätte der Anlagenbediener nicht versucht, die Pumpe wieder in Betrieb zu nehmen, indem er den grünen Startknopf gedrückt hielt und damit den thermischen Schutz des Motors außer Kraft setzte. Die Folge war, dass die Vakuumpumpe einen übermäßigen Gegendruck erzeugte, der dazu führte, dass der Filter explodierte.
- In einer Chemieanlage wurde eine Vakuumpumpe mit einem Abgaskondensator ausgestattet, um ein korrosives Nebenprodukt aufzufangen, bevor es in die Abgasleitung gelangt. Ein Teil des Betriebsverfahrens bestand darin, den Behälter zu entleeren, wenn der Hochstandswächter anzeigte, dass er voll war. Der Abgasstrom wurde in eine gemeinsame Abgasleitung geleitet, die normalerweise ungefähr Atmosphärendruck aufwies. Aufgrund eines Ausfalls herrschte jedoch ein höherer Druck. Als der Bediener den Behälter öffnete, um ihn zu

entleeren, wurde die ätzende Flüssigkeit unter Druck herausgedrückt und spritzte den Bediener mit schwerwiegenden Folgen von Kopf bis Fuß voll.

8 Veränderungen von Vakuumsystemen

Vakuumsysteme werden normalerweise für einen bestimmten Zweck ausgelegt. In der Regel werden Gefahrenanalysen mit einer bestimmten Anwendung im Blick durchgeführt.

Wenn der Pumpstand für einen anderen Zweck verwendet wird oder wenn andere Prozessgase abgepumpt werden als ursprünglich vorgesehen, dann ist die ursprüngliche Risikobeurteilung nicht länger gültig, und unerwartete Gefahren können auftreten.

Wenn ein Vakuumsystem verändert wird oder die Prozessgase geändert werden, muss stets eine neue Gefahrenanalyse durchgeführt werden.

9 Zusammenfassung

- Führen Sie eine Gefahrenanalyse durch, um alle Gefahren zu identifizieren und nach Möglichkeit auszuschalten oder zumindest zu begrenzen. Dies muss für den Entwurf, die Konstruktion, die Inbetriebnahme, den Betrieb, die Wartung und die Außerbetriebnahme von Vakuumsystemen geschehen.
- Bedenken Sie alle möglichen chemischen Reaktionen in Ihrem System. Kalkulieren Sie anomale chemische Reaktionen ein, einschließlich solcher, die bei Störfällen auftreten.
- Verwenden Sie die Material-/Sicherheitsdatenblätter, wenn Sie die potenziellen Gefahren im Zusammenhang mit Ihren Prozessmaterialien bestimmen (beispielsweise Selbstentzündung).
- Wenden Sie Verdünnungstechniken an, um Reaktionen mit Oxidantien und zündfähigen Materialien zu minimieren.
- Verwenden Sie das richtige Schmiermittel in Ihrer Pumpe, wenn Sie oxidierende oder pyrophore Materialien verpumpen.
- Verwenden Sie keine Schwermetalle im Gaspfad Ihres Pumpensystems, wenn Ihr Prozess Natriumazid produziert oder verwendet.
- Achten Sie bei Sicherheitsberechnungen darauf, die sicheren Arbeitsdruckwerte für alle Komponenten des Systems zu berücksichtigen. Berücksichtigen Sie auch anomale Bedingungen und Störfälle.
- Stellen Sie sicher, dass Sie die richtige Art von Druckentlastungsvorrichtungen verwenden, und dass diese für Ihre Anwendung geeignet sind.
- Sorgen Sie dafür, dass Auslässe nicht blockiert werden können.
- Stellen Sie sicher, dass Verdünnungsgase korrekt reguliert und überwacht werden.
- Wenn gefährliche Materialien verpumpt werden, muss das System so konstruiert sein, dass es beim Ausfall in einen sicheren Zustand übergeht.
- Verwenden Sie PFPE(Perfluorpolyether)-Öle und -Schmiermittel, wenn Sie Oxidantien verpumpen.
- Verwenden Sie ein Inertgas zur Verdünnung zündfähiger und pyrophorer Gase auf sichere Konzentrationen oder stellen Sie sicher, dass das System oberhalb der Entzündungs-/Explosionsgrenzwerte bleibt; berücksichtigen Sie dabei alle einschlägigen Sicherheitsfaktoren unter allen Prozessbedingungen, einschließlich Fehlerbedingungen.
- Der Maximaldruck des Systems darf nicht den maximalen Nenndruck irgendeines einzelnen Teils des Systems überschreiten.
- Erwägen Sie die Verwendung trockenlaufender Pumpen anstatt ölgedichteter Pumpen, wenn im Zusammenhang mit dem Öl im Schöpfraum Gefahren bestehen.
- Eliminieren Sie statische Volumina.
- Achten Sie darauf, dass das System angemessen kontrolliert und geregelt wird.
- Verwenden Sie, wo sinnvoll, Flammensperren.
- Prüfen Sie Systeme und Geräte vor der Verwendung auf Lecks.

Normale Betriebsgrenzen – Überschreiten Sie nicht die normalen Betriebsgrenzen

Zusammenfassung

Ein Vakuumsystem kann aus zahlreichen Komponenten bestehen. In allen Fällen müssen diese Komponenten innerhalb ihrer vorgesehenen Betriebsgrenzen ausgewählt und betrieben werden. Wenn dies nicht erfolgt, kann dies einen unerwarteten Ausfall zur Folge haben.

Leybold

Pioneering products. Passionately applied.

Leybold GmbH
Bonner Straße 498
50968 Köln
DEUTSCHLAND
+49-(0)221-347-0
info@leybold.com
www.leybold.com