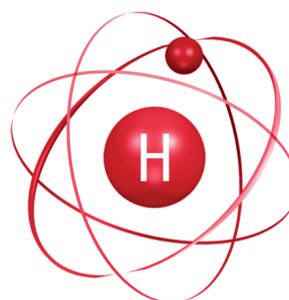




Best Practice Wasserstoffverdichtung



Sicherheit, Explosionsschutz, Anlagentechnik

Wissenswertes

Wasserstoff ist ein farbloses, geruch- und geschmackloses Gas und daher mit den menschlichen Sinnesorganen nicht wahrnehmbar. Wasserstoff verbrennt mit unsichtbarer Flamme und strahlt dabei wenig Wärme ab.

Beim Mischen mit Luft zu 4 bis 76 Volumenprozent (Vol.-%) Wasserstoff entsteht Knallgas, das bereits durch einen wenig energiereichen Funken zur Explosion gebracht werden kann.

Sauerstoff/Wasserstoffgemische mit einem Anteil von unter 10,5 Volumenprozent Wasserstoff sind schwerer als Luft und sinken zu Boden.

Physikalische und chemische Eigenschaften

Aussehen:	Farbloses Gas
Geruch:	Geruchlos
Molare Masse:	2 g/mol
Schmelzpunkt:	-259 °C
Siedepunkt:	-253 °C
Kritische Temperatur:	-240 °C
Zündtemperatur:	560 °C
Explosionsgrenzen (Vol.% in Luft):	4 %(V) - 75 %(V)
Relative Dichte, gasf. (Luft=1):	0,07
Löslichkeit in Wasser (mg/l):	1,6 mg/l

Sicherheit bei der Wasserstoff-Verdichtung

Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre in Räumen und im Freien



Die Entstehung explosionsfähiger Atmosphäre in Bereichen um Wasserstoffanlagen wird durch folgende Bedingungen verhindert:

- Wasserstoffanlagen sind an gut gelüfteten Stellen zu errichten (möglichst im Freien).
- Wasserstoffanlagen müssen dicht sein und bleiben.
- Ausblaseleitungen von Sicherheitsventilen, Leckageleitungen u.a. müssen ins Freie geführt sein.
- Ausblaseöffnungen dürfen nicht unter Dachvorsprüngen, unterhalb von Gebäudeöffnungen oder in der Nähe von Luftansaugöffnungen angeordnet werden.
- Bei Wasserstoffanlagen in Räumen muss die von außen kommende Gaszufuhr an ungefährdeter Stelle sicher ab gesperrt werden können.
- Rohrverbindungen an Wasserstoffanlagen sind so her zustellen, dass diese eine langandauernde Dichtheit der Verbindung sicherstellen.

Explosionsfähiges Gemisch

Vermeidung explosionsfähiger Gemische in Wasserstoffanlagen

Ein explosionsfähiges Gemisch in einer Wasserstoffanlage ist unter Sicherheitsaspekten nicht zu akzeptieren. Derartige Gemische können sehr leicht gezündet werden, z. B. durch Reibungswärme beim Betätigen eines Ventils oder durch mitgerissene Rostteilchen. Auch die Erwärmung des Gases durch einen Druckstoß beim schnellen Einströmen von Wasserstoff in ein luftgefülltes Anlagenteil kann eine Zündung auslösen.



Vor der Inbetriebnahme muss aus Wasserstoffanlagen die Luft entfernt werden, z. B. durch Evakuieren oder Spülen. Die sicherste Variante ist Spülen mit Stickstoff, wenn dabei ein Sauerstoffgehalt unter 1 Vol% in der Anlage erreicht wird. Auch bei der Außerbetriebnahme muss eine Wasserstoffanlage durch Evakuieren oder Spülen „gasfrei“ gemacht werden. Dabei ist der Wasserstoffgehalt ebenfalls unter 1 Vol.-% zu bringen, bevor die Anlage geöffnet wird.

Bei allen Spülvorgängen ist zu beachten, dass Spülgas den „Weg des geringsten Widerstandes“ geht. Deshalb muss der Spülgasstrom so geführt werden, dass „tote Ecken“ möglichst nicht entstehen.

Wasserstoffverdichtung mit MAXIMATOR Kompressoren

Aufbau der MAXIMATOR Wasserstoff Kompressoren

Speziell für die Verdichtung von Wasserstoff sind die MAXIMATOR Kompressoren in folgende Bereichen modifiziert:

- Werkstoffe für druckbeaufschlagte Bauteile
- Dichtungsgeometrie
- Spülanschlüsse
- Antriebsteil in EX-Ausführung

Diese Modifikationen sind für folgende Hochdruckteile verfügbar:

- DLE 2
- DLE 5
- DLE 15
- DLE 30
- DLE 75

MAXIMATOR Wasserstoffkompressoren werden mit dem Suffix -H2-ExIIc gekennzeichnet und sind generell für den Einsatz in Gruppe IIC geeignet.

Werkstoffe

Wasserstoff stellt besonders an die Auswahl der Werkstoffe hohe Anforderungen. In diesem Bereich ist speziell auf das Phänomen der Wasserstoffversprödung hinzuweisen. Die Wasserstoffversprödung bezeichnet die Änderung der Duktilität von Metallen. Hierbei dringt atomarer Wasserstoff in das Gefüge metallischer Werkstoffe ein. An Fehlstellen oder Korngrenzen rekombiniert der atomare Wasserstoff wieder zu molekularem Wasserstoff und erhöht dadurch den Druck im Gefüge.

Dadurch werden innere Spannungen aufgebaut und der Werkstoff versprödet. Das Versagen des Materials wird letztendlich durch Risse deutlich, die sich von innen nach außen ausbreiten (wasserstoffinduzierte Rissbildung).

In praktischen Versuchen haben sich besonders austenitische Stähle bewährt. Nach hoher Laufleistung der MAXIMATOR Wasserstoff Verdichter im Test, konnten keine Anzeichen von Wasserstoffversprödungen festgestellt werden.

Kolbenkompressoren mit dynamisch beanspruchten Dichtungen sind nicht absolut gasdicht. Um die Leistungsfähigkeit der Kolbendichtung für die Wasserstoffverdichtung zu erhöhen, wurden sowohl die Dichtungsgeometrien als auch die Dichtungswerkstoffe an die Anforderungen angepasst.

Spülanschlüsse

Aus technischer Sicht, ist es bei der Verdichtung von Wasserstoff am wichtigsten, die Entstehung von explosionsfähigen Atmosphären zu vermeiden. Da eine Gasleckage nicht auszuschließen ist, sind die MAXIMATOR Wasserstoff Verdichter mit einem inerten Gas (vorzugsweise Stickstoff) vor, während und nach dem Gebrauch zu spülen.

Neben dem Verdichtungsraum der Kompressoren kann auf Grund der geringen Leckage über die Hochdruck-Dichtung in den hinteren Kolbenraum, auch in diesen Bereichen ein explosionsfähiges Gemisch entstehen.

Damit auch diese Bereiche sicher gespült werden können, sind die MAXIMATOR Wasserstoff Verdichter mit einem zusätzlichen Spülanschluss ausgestattet. Entsprechend der Wirkungsweise der Verdichter, sind unterschiedliche Spülprozesse für einen sicheren Betrieb durchzuführen.

Wird die Spülung nicht durchgeführt, herrscht in diesen Bereichen die Zone 0. Die MAXIMATOR Kompressoren würden somit in die Kategorie 1 fallen (Baumusterprüfung notwendig). In der derzeitigen Ausführung, entsprechen die Kompressoren nicht den Anforderungen der Kategorie 1. Daher ist ein Betrieb ohne Spülung ausdrücklich untersagt.

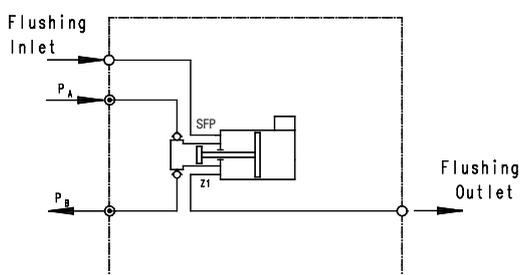
Spülpläne für MAXIMATOR Wasserstoffverdichter

Um den hinteren Kolbenraum des Kompressors effizient zu spülen, sind bei der Installation der Spüleleitung die folgenden Anschlussschemata zu berücksichtigen.

Es ist wichtig, dass die Spüleleitungen während der gesamten Einschaltdauer des Kompressors mit dem Spülgas durchströmt werden. Im Besonderen ist darauf zu achten, dass die Spüleleitungen nicht mit Druck beaufschlagt werden. Andernfalls kann dies zu Beschädigungen im Hochdruckteil führen.

Vor und nach dem Betrieb des Kompressors oder der Anlage sind der Verdichtungsraum und die dazugehörigen Leitungen ausreichend mit Stickstoff (oder einem anderen inerten Gas) zu spülen. Durch den Spülvorgang muss sichergestellt werden, dass der Sauerstoffgehalt des Verdichters bzw. der Anlage unter 1 Vol% sinkt.

Spülplan für einstufige, einfachwirkende Kompressoren:



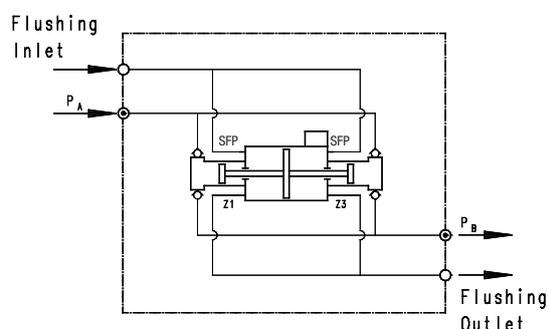
(Mit SFP Spülanschluss und Z1 Leckageanschluss Hochdruckseite)

Spülablauf:

1. Vor Inbetriebnahme des Kompressors ist Stickstoff an den Vordruckanschluss (P_A) sowie an den Spülanschluss (SFP) anzuschließen.

2. Der Kompressor ist für ca. 1 min. (abhängig von dem zu spülenden Volumen) einzuschalten.
3. Nach dem Spülvorgang ist der Kompressor auszuschalten.
4. Die Vordruckleitung (P_A) kann anschließend mit der Wasserstoffquelle verbunden werden. Während der Wasserstoffverdichtung ist der Spülanschluss kontinuierlich mit Stickstoff zu spülen.
5. Nach Abschluss der Wasserstoffverdichtung ist der Verdichtungsraum wie im Punkt 2 beschrieben erneut zu spülen.

Spülplan für einstufige, doppeltwirkende Kompressoren:

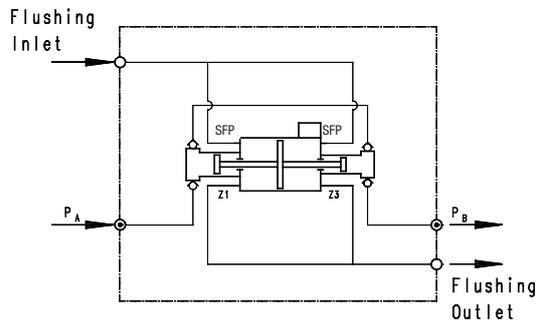


(Mit SFP Spülanschluss und Z1 und Z3 Leckageanschluss Hochdruckseite)

Spülablauf:

1. Vor Inbetriebnahme des Kompressors ist Stickstoff an den Vordruckanschluss (P_A) sowie an den Spülanschlüssen (SFP) anzuschließen.
2. Der Kompressor ist für ca. 1 min. (abhängig von dem zu spülenden Volumen) einzuschalten.
3. Nach dem Spülvorgang ist der Kompressor auszuschalten.
4. Die Vordruckleitung (P_A) kann anschließend mit der Wasserstoffquelle verbunden werden. Während der Wasserstoffverdichtung ist es nicht notwendig, den Spülanschluss kontinuierlich mit Stickstoff zu spülen, da bei einstufig, doppeltwirkenden Kompressoren keine Atemluft aus der Umgebung über die Leckageanschlüsse angesaugt wird.
5. Nach Abschluss der Wasserstoffverdichtung ist der Verdichtungsraum wie im Punkt 2 beschrieben erneut zu spülen.

Spülplan für zweistufige Kompressoren:



(Mit SFP Spülanschluss und Z1 und Z3 Leckageanschluss Hochdruckseite)

Spülablauf:

1. Vor Inbetriebnahme des Kompressors ist Stickstoff an den Vordruckanschluss (P_A) sowie an den Spülanschlüssen (SFP) anzuschließen.
2. Der Kompressor ist für ca. 1 min. (abhängig von dem zu spülenden Volumen) einzuschalten.
3. Nach dem Spülvorgang ist der Kompressor auszuschalten.
4. Die Vordruckleitung (P_A) kann anschließend mit der Wasserstoffquelle verbunden werden. Während der Wasserstoffverdichtung ist der Spülanschluss kontinuierlich mit Stickstoff zu spülen.
5. Nach Abschluss der Wasserstoffverdichtung ist der Verdichtungsraum wie im Punkt 2 beschrieben erneut zu spülen.

Volumenstrom für Gasspülung

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Spüleistung sind je nach Kompressor unterschiedliche Volumenströme zu gewährleisten. Die nachstehende Tabelle zeigt den mindestens benötigten Volumenstrom.

Bei den rot gekennzeichneten Kompressoren sind die Volumenströme nur während der Inbetrieb- und Außerbetriebnahme erforderlich. Während des Betriebes ist kein Volumenstrom erforderlich.

Neben dem Volumenstrom des Spülgases sind zudem auch die Querschnitte der Spüleleitung entscheidend. Es wird empfohlen, einen Innendurchmesser von 4 mm nicht zu unterschreiten. Sollte der Durchmesser unterschritten werden, besteht die Gefahr, dass in der Spüleleitung ein Gasdruck entsteht. Unter Umständen könnte dadurch der Hochdruckteil des Kompressors beschädigt werden.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Spüleleitung einen freien Auslass hat.

Type	Volumenstrom IN/min
DLE 2-1	190
DLE 5-1	90
DLE 15-1	40
DLE 30-1	20
DLE 75-1	10
DLE 2	170
DLE 5	90
DLE 15	30
DLE 30	20
DLE 75	10
DLE 2-5	110
DLE 5-15	60
DLE 5-30	70
DLE 15-30	20
DLE 15-75	30
DLE 30-75	10
DLE 2-1-2	190
DLE 5-1-2	90
DLE 15-1-2	30
DLE 30-1-2	20
DLE 75-1-2	10
DLE 2-2	170
DLE 5-2	80
DLE 15-2	30
DLE 30-2	20
DLE 75-2	10
DLE 2-5-2	100
DLE 5-15-2	60
DLE 5-30-2	70
DLE 15-30-2	20
DLE 15-75-2	20
DLE 30-75-2	10

Temperatur

Die Temperatur des Kompressors ist von der Temperatur des Mediums, der Verdichtung und anderen Betriebsbedingungen abhängig.

Für den sicheren Betrieb ist es erforderlich, dass der Kompressor fachgerecht mit dem Erdpotential verbunden ist.

Die zu erwartende Temperatur lässt sich für ideale Gase durch folgende Formel berechnen:

$$T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \cdot T_1$$

mit

T_2 = Temperatur nach dem Verdichten (in K)

T_1 = Temperatur vor dem Verdichten (in K)

P_2 = Druck nach dem Verdichten (in bar)

P_1 = Druck vor dem Verdichten (in bar)

χ = Isentropenexponent

Der Isentropenexponent für Wasserstoff beträgt 1,41.

Dadurch, dass die Verdichtung nicht ohne Wärmeaustausch mit der Umwelt stattfindet, wird die tatsächliche Temperatur immer unter der errechneten Temperatur bleiben. Übersteigt die Temperatur des verdichteten Gases die maximal zulässige Temperatur, so muss die Verdichtung durch mehrere Stufen laufen. Zusätzlich ist zwischen den einzelnen Kompressionsschritten zu kühlen. Wenn die Temperatur des verdichteten Gases unter der maximal zulässigen Temperatur liegt, muss je nach Explosionszone sichergestellt werden, dass diese Betriebsbedingungen sich nicht ändern. Ein geringerer Vordruck würde zu einer höheren Temperatur führen!

Hochdruckverschraubungen und Wasserstoff

Hochdruckverschraubungen (Konus und Gewinde) sind grundsätzlich für Wasserstoff geeignet.

Der Betreiber von Wasserstoffanlagen mit Hochdruckverschraubungen ist allerdings darauf hinzuweisen, dass eine mögliche Leckage aus den Leckagebohrungen der Fittings (T-Stücke, Winkelstücke, Kreuzstücke u.s.w.) austreten kann.



Leckagebohrung

Durch geeignete Überwachungsmaßnahmen ist gegebenenfalls sicherzustellen, dass Anlagen mit diesen Verschraubungen nur bei Dichtheit der Verbindungen zu betreiben sind. Die Anforderungen werden durch die Einstufung in die Explosionszonen festgelegt.

MAXIMATOR Wasserstoffstationen

Atex für Gehäuse und Schaltschränke

Die Eignung von Gehäusen oder Schaltschränken für Atex IIC muss für den jeweiligen Anwendungsfall gesondert überprüft werden.

Im Allgemeinen sollten die folgenden Kriterien erfüllt werden:

- Edelstahl
- keine potentielle Zündquelle
- Belüftungsöffnungen oben und unten

Sämtliche Anbauteile müssen elektrisch leitfähig sein. Lackierte Oberflächen oder Schaufenster erfüllen diese Anforderungen in der Regel nicht. Ist dies gefordert, so muss die Verfügbarkeit solcher Bauteile (mit entsprechender Bestätigung vom Hersteller) geprüft werden.

Auf Grund der fehlenden Leitfähigkeit ist auch eine Geräuschdämmung für die Gehäuse nicht zulässig.

Besonderheiten bei der Projektierung von Wasserstoffstationen

Die Verdichtung von Wasserstoff stellt keine besonderen Anforderungen an den Einsatz von Sicherheitsvorrichtungen. So ist es beispielsweise nicht notwendig generell eine zusätzliche Temperatur- oder Drucküberwachung vorzusehen.

Bei der Auswahl der verschiedenen Komponenten (Regler, Ventile, Filter usw.) ist besonders auf deren Eignung für Wasserstoff zu achten.

Im Allgemeinen muss sichergestellt werden, dass nur Komponenten eingesetzt werden, die keine potentielle Zündquelle besitzen. Auch die Werkstoffe müssen gegen Wasserstoffversprödung beständig sein. Die medienführenden Leitungen sollten daher aus 1.4404, 1.4571 oder vergleichbaren Edelstählen sein.

Schlauchleitungen sind für Wasserstoffstationen die nach Atex IIC auszulegen sind, auf Grund der fehlenden Leitfähigkeit ungeeignet.

Kontakt Maximator:

Maximator GmbH
Lange Str. 6
99734 Nordhausen

info@maximator.de
www.maximator.de