

Quelle: <https://www.arbeitssicherheit.de//document/f05e496a-dd4b-33e8-902a-dd45972ea988>

Bibliografie	
<b>Titel</b>	Technische Regeln für Gefahrstoffe - Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Gemische (TRGS 722)
<b>Amtliche Abkürzung</b>	TRGS 722
<b>Normtyp</b>	Technische Regel
<b>Normgeber</b>	Bund
<b>Gliederungs-Nr.</b>	Keine FN

## Anhang 2 TRGS 722 - Inertisierung

### 1 Sauerstoffgrenzkonzentrationen

#### 1.1 Gase und Dämpfe

(1) Bei Gasen und Dämpfen kann zwischen partieller und totaler Inertisierung unterschieden werden.

1. Bei der totalen Inertisierung ist das Verhältnis des Anteiles von Inertstoff zu dem des brennbaren Gefahrstoffes so hoch, dass das Gemisch auch nach Zumischung beliebig großer Luftmengen nicht explosionsfähig wird.
2. Bei der partiellen Inertisierung wird dem Gemisch so viel Inertstoff zugeführt, dass die Sauerstoffgrenzkonzentration (vgl. [Abschnitt 2.3 Absatz 4 der TRGS 720](#)) sicher unterschritten wird (höchstzulässige Sauerstoffkonzentration). Bei einer partiellen Inertisierung kann das Gasgemisch nach ausreichender Zugabe eines Oxidators, z. B. wie Luft bei einem Austreten in die Umgebung, wieder explosionsfähig werden.

(2) Bei der totalen Inertisierung werden explosionsfähige Gemische dadurch vermieden, dass das Verhältnis des Partialdruckes des Inertgases zu demjenigen des brennbaren Gases oder Dampfes einen bestimmten Grenzwert (s. Tabelle 1) überschreitet. In Abschnitt 1.3 ist ein Rechenbeispiel für eine totale Inertisierung aufgeführt. Der Partialdruck des brennbaren Gases ist oft verfahrenstechnisch oder bei Dampf physikalisch (entsprechend der Dampfdruckkurve der Flüssigkeit) vorgegeben. Dadurch kann eine totale Inertisierung einen erheblichen Überdruck in der Anlage erforderlich machen.

(3) Bei der partiellen Inertisierung muss die in Tabelle 1 angegebene Sauerstoffgrenzkonzentration unterschritten oder der Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas ( $N_2$  oder  $CO_2$ ) und Luft (L) (zur Inertisierung bei beliebiger Zugabe von brennbarem Gefahrstoff) überschritten werden. Einflüsse nicht atmosphärischer Bedingungen auf die Sauerstoffgrenzkonzentration sind zu berücksichtigen. Ein Rechenbeispiel für eine partielle Inertisierung ist in Abschnitt 1.4 aufgeführt.

(4) In Tabelle 1 sind Beispiele für experimentell ermittelte Sauerstoffgrenzkonzentrationen für Gase und Dämpfe aufgeführt.

#### **Tabelle 1:**

**Grenzwerte für die Inertisierung brennbarer Gase und Dämpfe bei 1 bar Gesamtdruck aus der Datenbank "Chemsafe" der DECHEMA**

Partielle Inertisierung						Totale Inertisierung	
Brennbarer Gefahrstoff	Temperatur in °C	Sauerstoffgrenzkonzentration im Gesamtgemisch brennbarer Gefahrstoff/ Inertgas/Luft bei der Inertisierung mit:		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N2 oder CO2) und Luft (L) notwendig zur Inertisierung bei beliebiger Zugabe von brennbarem Gefahrstoff		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N2 oder CO2) und brennbarem Gefahrstoff (B) notwendig zur Inertisierung bei beliebiger Zugabe von Luft	
		N2	CO2	N2/L	CO2 /L	N2/B	CO2 /B
		Cmax O2 in mol %	Cmax O2 in mol %				
Acetaldehyd	50	8,4	-	1,5	-	-	-
Acrylsäure	60	8,0	-	1,6	-	-	-
Benzol	100	8,5	11,8	1,4	0,7	42	22
i-Butan	20	10,3	13,1	1,0	0,5	28	13
n-Butan	20	9,6	13,2	1,1	-	27	-
n-Butanal	100	8,2	-	1,6	-	-	-
1-Butanol	130	8,2	-	1,6	-	-	-
t-Butanol	100	8,6	-	1,4	-	-	-
1-Butoxy-2-pro-panol	100	8,0	-	1,6	-	49	-
n-Butylacetat	100	9,5	-	1,2	-	-	-
Cyclohexan	100	8,5	11,3	1,3	0,8	54	27
Cyclohexanol	100	8,8	-	1,4	-	-	-
Cyclohexanon	100	8,0	-	1,6	-	-	-
Cyclopropan	20	11,7	13,9	-	-	-	-

Partielle Inertisierung						Totale Inertisierung	
Dimethylether	20	8,5	-	1,5	-	-	-
1,4-Dioxan	100	7,0	-	2,0	-	-	-
Dipropylenglykoldimethylether	150	7,4	-	1,9	-	-	-
Dipropylether	100	8,4	-	1,5	-	-	-
Ethan	20	8,7	11,8	1,3	0,7	21	11
Ethanol	20	8,5	-	1,4	-	17	-
Ethylacetat	20	9,8	-	1,1	-	23	-
Ethylen	20	7,6	10,5	1,7	0,9	24	13
Ethylenoxid	20	wegen Zerfallsfähigkeit von Ethylenoxid existieren diese Werte nicht				17	15
Heptan	100	-	10,9	-	0,9	-	35
Hexamethyldisiloxan	80	8,9	-	1,4	-	-	-
Hexan	20	9,1		1,3		42	
		8,3 (100 °C)	11,6 (100 °C)		0,8 (100 °C)		32 (100 °C)
1-Hexanol	100	8,5	-	1,5	-	-	-
Kohlenmonoxid	20	6,2	-	3,1	1,7	6	3
Methan	20	9,9	13,6	1,0	0,4	11	5
Methanol	20	8,1	-	1,4	-	7	-
Methylethylketon (2-Butanon)	20	9,5	-	1,2	-	26	-
n-Pentan		9,3	-	~1,3	-	~42	-
Pentylacetat	100	9,2	-	1,3	-	-	-
Propan	20	9,3	12,6	1,1	0,6	26	13
1-Propanol	20	9,3	-	1,3	-	19	-
2-Propanol	20	8,7	-	1,4	-	25	-
Propylen	20	9,4	12,5	1,2	0,6	23	12

Partielle Inertisierung						Totale Inertisierung	
Propylenoxid	25	7,7	10,3 (20 °C)	1,7	-	26	-
Propylformiat	20	9,8	-	1,1	-	21	-
Schwefelkohlenstoff	20	4,6	-	3,5	-	49	-
Tetrahydrofuran	100	8,3	-	1,5	-	-	-
Toluol	100	9,6	12,9	1,1	0,6	42	21
Wasserstoff	20	4,3	5,2	3,4	1,8	17	12
Xylol	100	9,7	13,1	1,1	0,6	42	21

"~" = Schätzwert

(5) Die Sauerstoffgrenzkonzentration hängt vom Inertgas ab. Sie sinkt für die meisten Stoffe mit steigender Temperatur. Die Temperaturabhängigkeit kann in guter Näherung für viele Gefahrstoffe als Gerade dargestellt werden:

$$SGK^I(T) = SGK^I(T_0) \cdot (1 + k_s [T - T_0])$$

Dabei ist SGK<sup>I</sup>(T) die Sauerstoffgrenzkonzentration für das Inertgas I (in Vol.-%) bei der Temperatur T (in °C), SGK<sup>I</sup>(T<sub>0</sub>) die entsprechende Sauerstoffgrenzkonzentration (in Vol.-%)

bei der Bezugstemperatur T<sub>0</sub> (in °C) und k<sub>s</sub> die Änderung der SGK pro K (Temperaturkoeffizient in K<sup>-1</sup>). Tabelle 2 fasst die bekannten Werte für k<sub>s</sub> für die gängigen Inertgase N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O-Dampf zusammen.

(6) Zur Druckabhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration liegen nur wenige Messungen vor, so dass an dieser Stelle keine allgemeingültige Abschätzformel gegeben werden kann.

**Tabelle 2:**  
**Temperaturkoeffizient zur Berechnung der Sauerstoffgrenzkonzentration (Auswertung der empfohlenen Datensätze aus CHEMSAFE)**

Substanz	K <sub>s</sub> (N <sub>2</sub> ) K <sup>-1</sup>	K <sub>s</sub> (CO <sub>2</sub> ) K <sup>-1</sup>	K <sub>s</sub> (H <sub>2</sub> O) K <sup>-1</sup>
Wasserstoff	-0,0018	-0,0013	-0,0013
Kohlenmonoxid	-0,0016	-0,0012	-0,0011
Methan	-0,0012	-0,0005	-0,0006
Ethan	-0,0012	-0,0008	-0,0006
Propan	-0,0012	-0,0007	-0,0008
i-Butan	-0,0012	-0,0007	-0,0003
n-Hexan	-0,0012	0	
Cyclohexan	-0,0004	-0,0010	
Ethen	-0,0009		-0,0006

Substanz	Ks (N2) K-1	Ks (CO2) K-1	Ks (H2O) K-1
Propen	-0,0005	-0,0006	
i-Buten	-0,0011	-0,0005	-0,0007
Benzol	-0,0011	-0,00065	
Toluol	-0,0010	-0,0005	
o-Xylol	-0,0008	-0,0006	
Methanol	-0,0013	-0,0007	
Ethanol	-0,0007	-0,0004	
Propanol	-0,0011		
i-Propanol	-0,0004	-0,0004	
Butanol	-0,0002		
tert.-Butanol	-0,0004		
Hexanol-1	-0,0013		
Propylformiat	-0,0009		
Ethylacetat	-0,0011		
Butylacetat	-0,0012		
Butanon-2	-0,0016		
Cyclohexanon	-0,0008		
Dimethylether	-0,0011		
Dipropylether	-0,0012		
Tetrahydrofuran	-0,0012		
Dioxan	-0,001		
Acetaldehyd	-0,001		
Acrylsäure	-0,0012		
Schwefelkohlenstoff	-0,0008		

**1.2 Stäube**

(1) In Tabelle 3 sind Beispiele für experimentell ermittelte Sauerstoffgrenzkonzentrationen für Stäube aufgeführt.

(2) Die Werte in Tabelle 3 dienen nur als Anhalt. Sicherheitstechnische Kenngrößen von Stäuben sind abhängig von der Beschaffenheit der Stäube wie z. B. Zusammensetzung, Korngröße, Wassergehalt und Oberflächenstruktur sowie ggf. vom gewählten Untersuchungsverfahren (s. a. GESTIS Staub Ex-Datenbank: <https://staubex.ifa.dguv.de/>).

(3) Zum Vermeiden von Glimm- oder Schwelbränden bei Ablagerungen brennbarer Stäube müssen zum Teil noch wesentlich niedrigere Sauerstoffkonzentrationen eingehalten werden, als es zum Vermeiden von Staubexplosionen notwendig ist. Die dafür maßgeblichen Sauerstoffkonzentrationen müssen gesondert ermittelt werden.

**Tabelle 3:**

**Sauerstoffgrenzkonzentration für verschiedene Stäube für das Inertisieren von Staub/Luft-Gemischen durch Stickstoff bei einer Gemischtemperatur von etwa 20 °C und einem Gesamtdruck von etwa 1 bar**

	Feinheit (Medianwert) [µm]	Sauerstoffgrenzkonzentration (Molgehalt in der Gasphase) [%]
ABS Mischgut	125	11
Aluminium	22	5
Bariumstearat	< 63	13
Braunkohle	63	12
Cadmiumlaurat	< 63	14
Cadmiumstearat	< 63	12
Calciumstearat	< 63	12
Cellulose	22	9
Erbсенmehl	25	15
Harnstoff	< 10	10
Harz	< 63	10
Herbizid	10	12
Holz	27	10
Hopfen	500	17
Kakao	< 63	9
Kautschuk	95	11
Kolophonium, Balsamharz	440	12
Lykopodium	30	7,5
Maisstärke	17	9
Malzschrot	25	11

	Feinheit (Medianwert) [µm]	Sauerstoffgrenzkonzentration (Molgehalt in der Gasphase) [%]
Methionin	< 10	12
Methylcellulose	70	10
Organisches Pigment	< 10	12
Paraformaldehyd	23	6
Polyacrylnitril	26	10
Polyethylen (HDPE)	26	10
Polymethacrylat	18	7
Roggenmehl Typ 1150	29	13
Ruß	13	12
Stärkederivat	24	14
Steinkohle (Fett-)	17	14
Wachs	< 10	11
Weizenmehl Typ 550	60	11
Zink	< 10	10

### 1.3 Totale Inertisierung

Nachfolgend ist ein Rechenbeispiel für die totale Inertisierung mit zwei unterschiedlichen Inertgasen aufgeführt:

1. In einem Behälter soll Hexan bei 20 °C mit Inertgas (ohne Luft) so unter Druck stehen, dass bei einer Undichtigkeit im Gasraum des Behälters explosionsfähige Atmosphäre im Freien nicht entstehen kann. Hexan hat bei 20 °C einen Sattdampfdruck von ca. 0,16 bar.
2. Stickstoff als Inertgas: Der Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass für die Inertisierung mit Stickstoff das Verhältnis der Molanteile und damit in guter Näherung der Partialdrücke von Stickstoff und Hexandampf mindestens 42 betragen muss, d. h. der Partialdruck des Stickstoffs muss mindestens bei  $(42 \times 0,16)$  bar = 6,7 bar liegen. Bei homogener Mischung des Stickstoffs mit dem Hexandampf im Behälter ist somit durch Aufdrücken von Stickstoff ein Gesamtdruck von  $(6,7 + 0,16)$  bar = 6,9 bar (entsprechend einem Überdruck gegen Atmosphäre von 5,9 bar) im Behälter erforderlich.
3. Kohlendioxid als Inertgas: Bei der Inertisierung mit Kohlendioxid beträgt das Verhältnis der Molanteile von Kohlendioxid zu Hexandampf nach Tabelle 1 mindestens 32. Der Partialdruck des Stickstoffs muss mindestens bei  $(32 \times 0,16)$  bar = 5,14 bar liegen. Die analoge Rechnung ergibt, dass zum Erreichen des Schutzzieles durch Zugabe von Kohlendioxid ein Gesamtdruck von  $(32 \times 0,16 + 0,16)$  bar = 5,3 bar (entsprechend einem Überdruck von 4,3 bar) einzustellen ist.

### 1.4 Partielle Inertisierung

Nachfolgend ist ein Rechenbeispiel für die partielle Inertisierung aufgeführt:

1. Ein bestimmter Prozess mit Propan (als einzigem brennbaren Gefahrstoff) ist bei ca. 20 °C und 1 bar so mit Stickstoff zu inertisieren, dass im Inneren der Anlagenteile und Rohrleitungen keine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre entsteht. Die Sauerstoffkonzentration der Gasphase kann überwacht werden.
2. Die Sauerstoffgrenzkonzentration wird Tabelle 1 entnommen (Molgehalt  $C_{\max O_2} = 9,3 \%$ , alte Bezeichnung  $C_{\max O_2} = 9,3 \text{ Vol.}\%$ ). Im vorliegenden Fall sei bekannt, dass verfahrensbedingt die Sauerstoffkonzentration örtlich und zeitlich um  $\pm 1 \%$  (Molgehalt) schwanken kann. Ferner sollen evtl. Schutzfunktionen so schnell wirksam werden, dass nach ihrer Auslösung die Sauerstoffkonzentration maximal noch um 1 % absolut ansteigen kann. Für die Schwankung werden hier 2 % absolut angesetzt, da bei einer möglichen Schwankung von  $\pm 1 \%$  um einen mittleren Wert der höchste Wert (der in diesem Beispiel nicht über 9,3 % - dem Wert der Sauerstoffgrenzkonzentration - liegen darf) und der niedrigste Wert, der z. B. am Ort der Sauerstoffkonzentrationsmessung vorliegen kann, um 2 % auseinander liegen können.
3. Damit wird die höchstzulässige Sauerstoffkonzentration auf  $(9,3 - 2 - 1) \% = 6,3 \%$  festgelegt. Zur Berücksichtigung der Eigenschaften der Sauerstoffüberwachungseinrichtung (u. a. Messabweichungen, Alarmverzögerungen) wird weiterhin eine Alarmschwelle unterhalb der höchstzulässigen Sauerstoffkonzentration bestimmt. Der hierfür nötige Sicherheitsabstand betrage im vorliegenden Fall 3 %, so dass die Alarmschwelle bei  $(6,3 - 3) \% = 3,3 \%$  liegt. Überschreitet die im Prozess gemessene Sauerstoffkonzentration die Alarmschwelle von 3,3 % (Molgehalt), so werden die Schutzfunktionen ausgelöst.

## 2 Beispiel einer Druckwechselinertisierung

Vorgehensweise:

Bei der Druckwechselinertisierung wird der Druck ausgehend vom Umgebungsdruck durch Zugabe von Inertgas erhöht. Nach diesem Schritt wird das Gas an die Atmosphäre abgegeben, bis der Umgebungsdruck wieder erreicht ist. Dieser Druckwechselzyklus wird wiederholt, bis die Sauerstoffkonzentration den Zielwert erreicht oder unterschreitet.

Verfahren geeignet für:

Dieses Verfahren ist nur geeignet, wenn die Anlage die erforderliche Druckfestigkeit aufweist.

Anwendung:

Die Anzahl der erforderlichen Druckwechselzyklen kann durch Berechnung nach der Formel

$$n = k \times \frac{\log \frac{c_n - c_i}{c_0 - c_i}}{\log \frac{p_1}{p_2}}$$

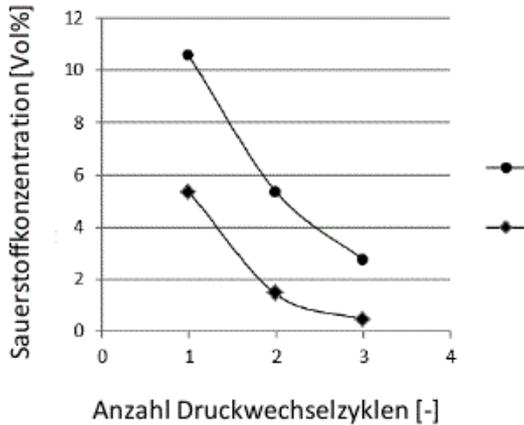
abgeschätzt werden.

cn	Sauerstoffkonzentration nach n Druckwechselzyklen
----	---

- c0 Ursprüngliche Sauerstoffkonzentration
- ci Sauerstoffkonzentration im Inertgas
- p1 niedrigerer Druck (absolut)
- p2 oberer Druck (absolut)
- k isentropischer Exponent (cp/cv); 1,4 für zweiatomige Gase wie Luft)
- n Anzahl der Druckwechselzyklen

Diese Gleichung basiert auf der konservativen Annahme, dass Kompression und Expansion adiabatisch sind. Wenn Komprimierung und Expansion ausreichend langsam sind, um als isotherm angenommen zu werden, kann  $k = 1$  verwendet werden.

Als Beispiel ist in dem folgenden Diagramm die Abnahme der Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit der Druckwechselzyklen dargestellt ( $c_i = 0,1 \text{ Vol}\%$ ).



Diese Methode setzt voraus, dass Gasaustausch in allen Anlagenteilen stattfindet und kann daher bei Vorliegen von nicht durchströmten Rohrleitungsstücken zu unzureichenden Ergebnissen führen. In diesen Fällen wird eine Druckwechselinertisierung durch Anlegen von Vakuum empfohlen.

#### Fußnoten

\* - Konzentration bei 20 °C nicht erreichbar