



EINFÜHRUNG IN DIE STATIONÄRE GASMESSTECHNIK



Gase – was ist gasförmige Materie?

STL-1097-2008

Materie mit einer Temperatur oberhalb ihres Siedepunktes bezeichnet man als Gas. Bezogen auf das Umfeld des Menschen (Normalbedingungen) sind all die Substanzen Gase, deren Siedepunkt bei Normaldruck unter 20 °C liegt. Das leichteste Gas ist der Wasserstoff (H_2 , vierzehn Mal leichter als Luft), das schwerste Gas (etwa zehn Mal schwerer als Luft) ist das Wolframhexafluorid (WF_6).

Unter normalen Bedingungen enthält ein cm^3 Gas etwa 30 Trillionen Moleküle, deren mittlerer Abstand nur etwa drei Nanometer beträgt. Sie fliegen mit einigen 100 bis 1000 m/s durch den Raum, stoßen dabei aber jede Sekunde viele Milliarden mal mit anderen Molekülen zusammen, so dass sie zwischen zwei Stößen nur etwa 50 bis 100 Nanometer zurücklegen und dabei ständig ihre Bewegungsrichtung ändern und Energie auf den Stoßpartner übertragen.

So entsteht eine völlig regellose Bewegung der Moleküle, die makroskopisch als Temperatur (mittlere Bewegungsenergie aller Moleküle) und Druck (mittlerer Impuls aller auf eine Fläche auftreffenden Moleküle) bzw. Ausdehnung (Volumen) messbar ist. Druck, Temperatur und Volumen stehen je nach äußeren Bedingungen in einer festen Beziehung, im Idealfall gehorchen sie der sog. idealen Gasgleichung, d.h.

- bei konstantem Druck verändern sie ihr Volumen proportional zur Temperatur – so z.B. dehnen sie sich bei Erwärmung aus
- bei konstantem Volumen (geschlossenes Behältnis) verändert sich ihr Druck proportional zur Temperatur – so steigt z.B. der Gefäß-Innendruck bei Erwärmung
- bei konstanter Temperatur ändert sich ihr Druck proportional zum Volumen – so erhöht sich z.B. beim Zusammenpressen der Innendruck

Die extrem schnelle regellose Bewegung der Gasmoleküle ist auch die Ursache dafür, dass sie sich mit anderen Gasen freiwillig vermischen und nie wieder entmischen. Auch die Fortbewegung der Moleküle in Richtung geringerer Konzentration (Diffusion), die in der Gasmesstechnik eine wichtige Rolle spielt, lässt sich auf solche Moleküleigenschaften zurückführen. Im Allgemeinen verlaufen solche Prozesse umso schneller, je schneller sich die Moleküle bewegen (je heißer das Gas ist) und je geringer deren Molgewicht ist (je leichter das Gas ist).

Dämpfe – sind das nicht auch Gase?

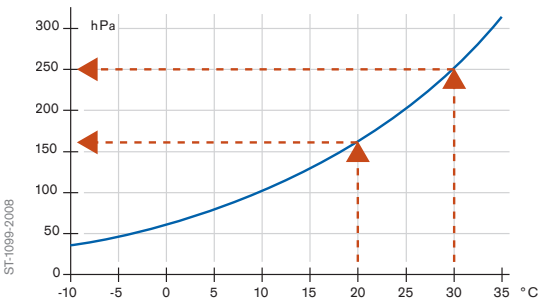
STL-1098-2008

Im Gegensatz zu Gasen – von ihnen mag es nur etwa 200 bis 300 geben – verwendet man für den gasförmigen Zustand von Materie unterhalb ihres Siedepunktes den Begriff Dampf. Dampf steht stets im Gleichgewicht mit seiner flüssigen (manchmal auch festen) Phase – er kondensiert und verdampft je nach Temperatur. Das ist uns vom Wasser bestens bekannt: Nächtliche Auskühlung von bodennaher feuchter Luft erzeugt Bodennebel (Kondensation) – doch die morgendliche Sonnenwärme löst den Nebel wieder auf (Verdampfung).

In einem geschlossenen Gefäß entsteht über der Flüssigkeitsoberfläche stets eine maximale Dampfkonzentration, die von der Flüssigkeitstemperatur abhängig ist. Mikroskopisch betrachtet ergibt sich der Dampf aus der regellosen Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle und ihrer Fähigkeit, die Oberflächenspannung zu überwinden und sich mit den darüber befindlichen Luftmolekülen zu vermischen.

Jede Flüssigkeit hat einen gewissen charakteristischen Dampfdruck, der nur von ihrer Temperatur abhängt und Atmosphärendruck annimmt, wenn sie den Siedepunkt erreicht. Die grafische Darstellung dieses Zusammenhangs wird als Dampfdruckkurve bezeichnet, aus der sich die bei vorgegebener Temperatur maximal mögliche Dampfkonzentration ermitteln lässt.

Dampfdruckkurve von flüssigem n-Hexan



STL-1099-2008

Wenn man den maximal möglichen Dampfdruck durch den Umgebungsdruck dividiert, erhält man die Sättigungskonzentration in Vol-%. Für Hexan erhält man bei 20 °C (Dampfdruck 162 hPa) und einem Umgebungsdruck von 1000 hPa eine maximal mögliche Konzentration von 16.2 Vol-%.

Dämpfe – sind das nicht auch Gase?

Unsere Atmosphäre

Unsere Atmosphäre reicht – bei sich kontinuierlich verringern-der Dichte – bis weit in den Weltraum. Die blaue Farbe des Himmels entsteht in der Atmosphäre durch Streuung des Sonnenlichtes an den Luftmolekülen, doch ab etwa 21 km Höhe ist der Himmel bereits schwarz. Würde man die Atmosphäre auf einen konstanten Druck von 1013 hPa bringen, so wäre sie 8 km und die UV-absorbierende stratosphärische Ozonschicht nur 3 mm hoch.

Typische Zusammensetzung der Erdatmosphäre in ppm:

Gas	Zusammensetzung	
	trocken	feucht
Hauptgase		
N ₂ – Stickstoff	780 840	768 543
O ₂ – Sauerstoff	209 450	206 152
H ₂ O – Wasserdampf	0	15 748
Ar – Argon	9 340	9 193
CO ₂ – Kohlenstoffdioxid	340	335
Spurengase		
Ne – Neon	18	18
He – Helium	5	5
CH ₄ – Methan	1.8	1.8
Kr – Krypton	1.1	1.1
H ₂ – Wasserstoff	0.5	0.5
N ₂ O – Lachgas	0.3	0.3
CO – Kohlenstoffmonoxid	0.09	0.09
Xe – Xenon	0.09	0.09
O ₃ – Ozon	0.07	0.07
weitere Spurengase	3.05	3.0
Gesamt	1000 000	1000 000

1 Vol.-% = 10 000 ppm; Annahme für feuchte Luft: 68 % r.F. bei 20 °C

Die Erdatmosphäre hat eine Masse von gut fünf Billionen Tonnen ($5,235 \cdot 10^{18}$ kg), die auf der Erdoberfläche von $0,507 \cdot 10^{15}$ m² lastet. Dadurch entsteht an der Erdoberfläche ein Luftdruck von 10325 kg/m², was unserem Normaldruck von 1013 hPa entspricht. Der Luftdruck verringert sich mit zunehmender Höhe:

Höhe	Luftdruck	Höhe	Luftdruck
-1000 m	1148 hPa	2000 m	795 hPa
- 500 m	1078 hPa	3000 m	701 hPa
0 m	1013 hPa	4000 m	616 hPa
500 m	952 hPa	5000 m	540 hPa
1000 m	900 hPa	6000 m	472 hPa
1500 m	840 hPa	8000 m	356 hPa

Da bei geringerem Luftdruck weniger Moleküle im Volumen vorhanden sind, ist das Messergebnis partialdruckmessender Sensoren stets vom Luftdruck abhängig.

Während der zu mehr als 78 Vol-% in der Atmosphäre vorhandene Stickstoff völlig inert ist und trotz des Überschusses in dieser Form nicht einmal den Pflanzen als dringend benötigter Dünger zur Verfügung steht, ist der sehr reaktive Sauerstoff die Grundlage unserer Atmung, mehr noch: die Grundlage fast allen Lebens.

In der Atmosphäre sind knapp 21 Vol-% Sauerstoff vorhanden. Sauerstoffmangel ist lebensbedrohlich – und durch die Nase nicht wahrnehmbar.

Im Allgemeinen entsteht **Sauerstoffmangel** durch Freisetzung eines inerten Gases und der dadurch entstehenden Sauerstoffverdrängung. Da die Atmosphäre zu rund einem Fünftel aus Sauerstoff besteht, verringert sich die Sauerstoffkonzentration auch nur um ein Fünftel der Konzentration des inerten Gases. Werden z.B. 10 Vol-% Helium in die Umgebungsluft freigesetzt, so geht die Sauerstoffkonzentration um 2 Vol-%, die Stickstoffkonzentration um 8 Vol-% zurück. Da im Industriebereich häufig verflüssigter Stickstoff (-196 °C) verwendet wird, kann sich bei dessen Verdampfung schnell gefährlicher Sauerstoffmangel einstellen.

Erhöhte Sauerstoffkonzentrationen (z.B. mehr als 25 Vol-%) können vom Menschen nicht wahrgenommen

werden, haben aber erhebliche Konsequenzen hinsichtlich der Entflammbarkeit von Materialien bis hin zur Selbstentzündung. Auch der Explosionsschutz bezieht sich ausschließlich auf die atmosphärische Sauerstoffkonzentration.

Ab wann wird es gefährlich?

Sauerstoffkonzentration in Vol-%	Sauerstoff-Partialdruck in hPa	Symptome
kleiner 17	kleiner 170	Tendenz zur Gefahr durch Sauerstoffmangel
11 bis 14	110 bis 140	Unbemerkte Verminderung der physischen und geistigen Leistungsfähigkeit
8 bis 11	80 bis 110	Möglichkeit der Bewusstlosigkeit ohne Vorwarnung nach einer gewissen Zeitspanne
6 bis 8	60 bis 80	Bewusstlosigkeit in wenigen Minuten, Wiederbelebung möglich wenn sofort eingeleitet
kleiner 6	kleiner 60	Sofortige Bewusstlosigkeit



Gase und Dämpfe sind fast immer gefährlich! Wenn Gase nicht in der uns vertrauten und atembaren atmosphärischen Zusammensetzung vorliegen, ist die sichere Atmung gefährdet. Mehr noch: Alle Gase sind potentiell gefährlich, im verflüssigten, im komprimierten wie auch im Normalzustand – entscheidend ist nur ihre Konzentration.

Prinzipiell gibt es drei Gefahren-Kategorien

- **Explosionsgefahr (Ex)** durch brennbare Gase
- **Sauerstoff (Ox)**
Erstickungsgefahr durch Sauerstoffmangel
Brandgefahr durch Sauerstoffüberschuss
- **Vergiftungsgefahr (Tox)** durch toxische Gase

Ohne Hilfsmittel ist der Mensch nicht in der Lage, solche Gefahren so frühzeitig zu erkennen, dass er noch Abwehrmaßnahmen treffen kann. Und unsere Nase hat sich als Warninstrument mit wenigen Ausnahmen als höchst unzuverlässig erwiesen.

Beispielsweise ist Schwefelwasserstoff in sehr geringen Konzentrationen noch durch den Geruch nach faulen Eiern wahrnehmbar, aber tödliche Konzentrationen von Schwefelwasserstoff kann die Nase nicht mehr wahrnehmen. Durch Flucht in den vermeintlich gefahrlosen, nämlich geruchlosen Bereich sind schon viele tödliche Unfällen passiert.

Auch harmlose Gase wie Argon, Helium oder Stickstoff sind dann gefährlich, wenn durch deren plötzliche Freisetzung der lebenswichtige Sauerstoff verdrängt wird. Erstickungsgefahr! Eine Sauerstoffkonzentration von weniger als 6 Vol-% ist tödlich. Sauerstoffüberschuss fördert die Brandgefahr bis hin zur Selbstentzündung von brennbaren Materialien.

Brennbare Gase und Dämpfe können bei Entzündung nicht nur erhebliche Anlagenschäden verursachen, sondern auch Menschenleben gefährden.

Es gilt, Ex-Ox-Tox-Gefahren zuverlässig zu detektieren und durch geeignete Maßnahmen Menschenleben, Anlagen und Umwelt zu schützen.

- Dazu benötigt man Gas-Detektoren.
- Dazu benötigt man Gaswarnanlagen.

Toxische Gase und Dämpfe

Die Toxizität von industriell verwendeten Gasen und Dämpfen wird in Laborversuchen durch Ermittlung der LC50-Rate festgelegt. Hieraus und aus weiteren wissenschaftlichen und arbeitsmedizinischen Untersuchungen mit deutlich geringeren Konzentrationen leiten beauftragte Kommissionen Vorschläge für Luftgrenzwerte ab, die dann gegebenenfalls gesetzlich verbindlich werden.

Ein solcher Luftgrenzwert sagt aus, dass ein Mitarbeiter keinen gesundheitlichen Schaden nimmt, wenn er über sein ganzes Arbeitsleben keine höheren Gaskonzentrationen als die des Grenzwertes einatmet – das allerdings ist sicherzustellen.

Die Konzentrationen solcher Grenzwerte erstrecken sich über sieben Zehnerpotenzen:

Grenzwert	ausgewählte Substanzen, für die dieser Grenzwert gilt
5000 ppm	Kohlenstoffdioxid
1000 ppm	Propan, Butan
500 ppm	Aceton
200 ppm	Methylethylketon (MEK)
100 ppm	Butanol
50 ppm	n-Hexan, Toluol
20 ppm	Acetonitril
10 ppm	Chlorbenzol
5 ppm	Diethylamin
1 ppm	1.1.2.2-Tetrachlorethan
500 ppb	Chlor
200 ppb	Methylchlorformiat
100 ppb	Chlordioxid
50 ppb	Decaboran
20 ppb	Phosgen
10 ppb	Methylisocyanat
5 ppb	MDI (Methyldiphenyldiisocyanat)

T+ Sehr giftig $LC_{50} < 0.5 \text{ g/m}^3$

Arsenwasserstoff, Bortrichlorid, Bortrifluorid, Brom, Cyanwasserstoff, Diboran, Fluor, Fluorwasserstoff, Ozon, Phosgen, Phosphorwasserstoff, Schwefeltetrafluorid, Schwefelwasserstoff, Stickstoffdioxid, Stickstoffmonoxid, Wolframhexafluorid

T Giftig $LC_{50} = 0.5 \dots 2.0 \text{ g/m}^3$

Acetonitril, Ammoniak, Benzol, Chlor, Chlorwasserstoff, Dicyan, Kohlenstoffmonoxid, Methanol, Methylbromid, Schwefeldioxid, Schwefelkohlenstoff, Stickstofftrifluorid

Die LC_{50} (LC steht für „lethal concentration“ = letale Konzentration) ist die Gaskonzentration in Luft, durch deren Einatmung innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums (meist vier Stunden) 50% der Versuchstiere (meist weiße Labor-Ratten) verendet sind.

Brennbare Gase und Dämpfe

Brennbare Gase sind umso gefährlicher, je niedriger ihre untere Explosionsgrenze (UEG) liegt. Brennbare Dämpfe sind umso gefährlicher, je niedriger ihr Flammpunkt liegt. Der Flammpunkt definiert sich aus dem temperaturabhängigen Dampfdruck und der UEG.

Dampf	UEG Vol-%	UEG g/m ³	Flamm- punkt in °C	Dampf- druck bei 20 °C in mbar	Zünd- temperatur in °C
Aceton	2.5	60.5	< -20	246	535
Acrylnitril	2.8	61.9	-5	117	480
Benzol	1.2	39.1	-11	100	555
n-Butanol	1.7	52.5	35	7	325
n-Butylacetat	1.2	58.1	27	11	390
n-Butylacrylat	1.2	64.1	37	5	275
Chlorbenzol	1.3	61.0	28	12	590
Cyclohexan	1.0	35.1	-18	104	260
Cyclopentan	1.4	40.9	-51	346	320
1,2-Dichlorethan (EDC)	6.2	255.7	13	87	440
Diethylether	1.7	52.5	-40	586	175
1,4-Dioxan	1.9	69.7	11	38	375
Epichlorhydrin	2.3	88.6	28	16	385
Ethanol	3.1	59.5	12	58	400
Ethylacetat	2.0	73.4	-4	98	470
Ethylbenzol	1.0	44.3	23	10	430
n-Hexan	1.0	35.9	-22	160	240
Methanol	6.0	80.0	9	129	440
1-Methoxy-2-propanol	1.8	67.6	32	12	270
Methylethylketon (MEK)	1.5	45.1	-10	105	475
Methylmethacrylat	1.7	70.9	10	40	430
n-Nonan	0.7	37.4	31	5	205
n-Octan	0.8	38.1	12	14	205
n-Pentan	1.4	42.1	-40	562	260
i-Propanol (IPA)	2.0	50.1	12	43	425
Propylenoxid	1.9	46.0	-37	588	430
Styrol	1.0	43.4	32	7	490
Tetrahydrofuran (THF)	1.5	45.1	-20	200	230
Toluol	1.1	42.2	6	29	535
Xylol (Isomergemisch)	1.0	44.3	25	7	465

Gas	UEG Vol-%	UEG g/m ³	Zünd- temperatur in °C
Acetylen	2.3	24.9	305
Ammoniak	15.4	109.1	630
1,3-Butadien	1.4	31.6	415
i-Butan	1.5	36.3	460
n-Butan	1.4	33.9	365
n-Buten (Butylen)	1.2	28.1	360
Dimethylether	2.7	51.9	240
Ethen (Ethylen)	2.4	28.1	440
Ethylenoxid	2.6	47.8	435
Methan	4.4	29.3	595
Methylchlorid	7.6	159.9	625
Propan	1.7	31.2	470
Propen (Propylen)	1.8	31.6	485
Wasserstoff	4.0	3.3	560

Nur brennbare Flüssigkeiten haben einen Flammpunkt.

Für brennbare Gase gibt es definitionsgemäß keinen Flammpunkt.

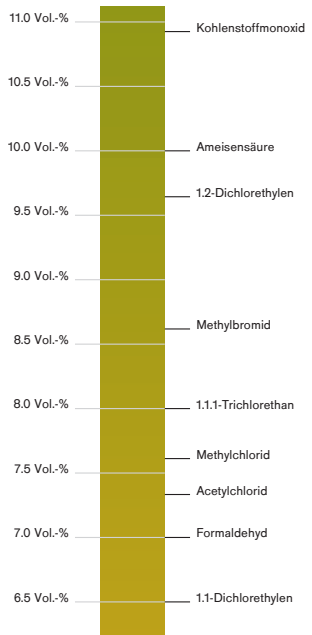
UEG und vorbeugender Explosionsschutz

Brennbare Gase und Dämpfe können mit Luft zündfähige Gemische bilden, doch muss das Verhältnis von Brenngas und Sauerstoff (bzw. Luft) innerhalb gewisser Grenzen liegen.

Die untere Explosionsgrenze (UEG) ist dadurch definiert, dass sich bei einer solchen in Vol-% angegebenen Brenngas-Konzentration das Brenngas-Luft-Gemisch unter genormten Bedingungen entzünden lässt und selbstständig weiter brennt. Die UEG aller bekannten brennbaren Gase und Dämpfe liegt im Bereich von etwa 0.5 bis 15 Vol-%. Zum Beispiel liegt die UEG für Wasserstoff-Luft-Gemische bei 4 Vol-%, demnach ist ein Prüfgas mit 2 Vol-% Wasserstoff in Luft definitiv nicht zu entzünden.

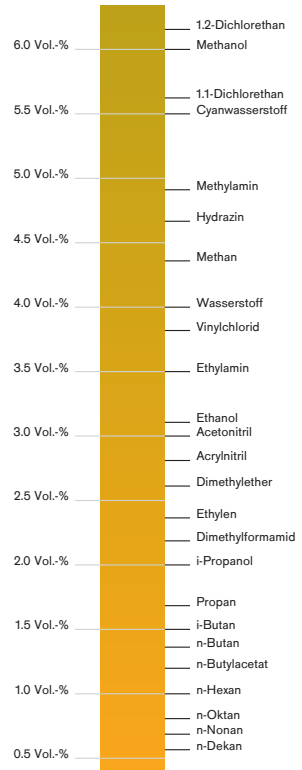
Konzentrationsbegrenzung

Dieses Verhalten hat eine wichtige Konsequenz für den praktischen



Explosionsschutz: Wenn ein brennbares Gas unterhalb der UEG nicht entzündet werden kann, dann kann man sich also dadurch vor Explosionen schützen, dass man die Gaskonzentration kontinuierlich misst und durch geeignete Maßnahmen dafür sorgt, dass z.B. niemals die Hälfte der UEG (50 % UEG) überschritten wird.

Diese Methode des vorbeugenden Explosionsschutzes bezeichnet man oft als primäre Maßnahme: Nicht die Zündung, sondern schon die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre wird zuverlässig verhindert. Die Konzentrationsmessung nimmt man hierbei vorzugsweise mit Infrarot- oder Wärmestönungssensoren vor, die für diesen Zweck gewisse sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen müssen.

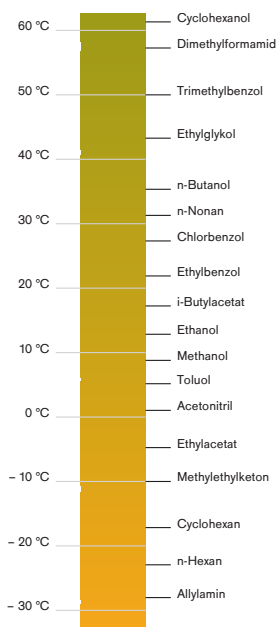


Flammpunkt brennbarer Flüssigkeiten

ST-3101-2004

Man spricht zwar von brennbaren Flüssigkeiten, brennbar allerdings ist nicht der flüssige Zustand, sondern ausnahmslos der Dampf, denn nur dieser kann mit Luftsauerstoff ein brennbares Gemisch bilden. Die Flüchtigkeit des Dampfes und dessen untere Explosionsgrenze (UEG) ist ein Maß für das Gefahrenpotential. Dieses wird beschrieben durch den dem sog. Flammpunkt.

Um überhaupt entzündet werden zu können, muss die Konzentration des Dampfes über der Flüssigkeitsoberfläche natürlich die UEG überschreiten. Ob sie das tut oder nicht, ist davon abhängig, wie viel Dampf erzeugt wird. Hierfür ist der sog. Dampfdruck verantwortlich, der von der Flüssigkeitstemperatur abhängt. Dieses Verhalten wird sicherheitstechnisch durch den sog. Flammpunkt (F) beschrieben. Der Flammpunkt ist die Temperatur, bei der sich soviel Dampf bildet, dass das Dampf-Luft-Gemisch in einer genormten Apparatur entzündet werden kann (und selbstständig weiter brennt). Liegt der Flammpunkt einer brennbaren Flüssigkeit oberhalb von 50 °C, so kann diese bei Temperaturen von 30 °C definitiv nicht entzündet werden.



Diesel (F > 55 °C) kann man nicht mit einem Streichholz entzünden, wohl aber Ottokraftstoff (F < -20 °C)!

Demnach sind brennbare Flüssigkeiten umso gefährlicher, je niedriger ihr Flammpunkt liegt. Da Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten unterhalb ihres Flammpunktes nicht entzündlich sind, kann man vorbeugenden Explosionsschutz auch dadurch betreiben, dass man Flüssigkeiten verwendet, deren Flammpunkt deutlich höher liegt als die Umgebungstemperatur. Das wird oft auch praktiziert, allerdings erkaufte man sich hiermit den Nachteil, dass zur Verdampfung solcher Flüssigkeiten, wenn sie als Lösemittel eingesetzt werden, wiederum viel Energie aufgewendet werden muss. Gase haben definitionsgemäß keinen Flammpunkt, weil sie unter Normalbedingungen nicht in flüssiger Form vorliegen.



ST-7448-2006

Gaswarngeräte sind in erster Linie Produkte der Sicherheitstechnik, und werden vornehmlich im Bereich des Personenschutzes und der Anlagensicherung eingesetzt. Sie sind dazu vorgesehen, rechtzeitig gefährliche Gaskonzentrationen zu detektieren, zu warnen und möglichst auch Gegenmaßnahmen einzuleiten, noch bevor es zu Personen-, Anlagen und Umweltschäden kommen kann.



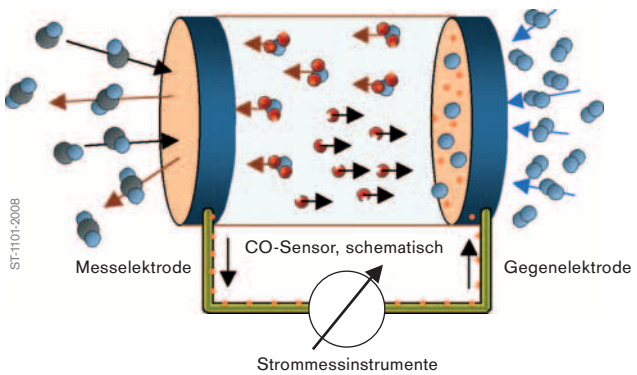
Gaswarngeräte können tragbare (oder semi-portable) Gasmessgeräte sein oder stationäre Gaswarnanlagen. Die Sicherheit eines durch gefährliche Gase und Dämpfe gefährdeten Bereiches hängt also sehr auch von der Zuverlässigkeit der Gaswarnanlage, insbesondere auch von der Qualität der verwendeten Sensoren ab. Im Gegensatz zu Sensoren in tragbaren Gasmessgeräten müssen die stationären Sensoren einschließlich ihrer Elektronik jahrelang 24 Stunden pro Tag einsatzbereit sein, um – ähnlich einem Feuerlöscher – für den seltenen Fall eines Gasausbruchs verfügbar zu sein. Und das unter zum Teil extremen Umweltbedingungen, bei z.B. – 50 °C, bei 65 °C und hoher Feuchte, doch auch in sehr trockenen Atmosphären, im Außenbereich bei Regen, Sturm und Schnee genauso wie in der heißen Wüste, bei elektromagnetischen Störungen und starker Vibration... Und selbstverständlich darf hierbei der Explosionsschutz nicht beeinträchtigt sein und die Messqualität nur minimal beeinflusst werden. Wie aus der grafischen Darstellung hervorgeht, gibt es einen fließenden Übergang von der Gasesstechnik zur Prozessmesstechnik. Obwohl als Produkt der Sicherheitstechnik entwickelt, haben gewisse Gasmess-Transmitter heutzutage so hervorragende messtechnische Eigenschaften, dass sie zusehends häufiger auch im Bereich der Prozessmesstechnik angetroffen werden.

Messprinzip elektrochemischer Sensor

ST-3751-2003

Sehr viele toxische Gase sind auch sehr reaktiv und lassen sich unter geeigneten Bedingungen chemisch umsetzen. Der elektrochemische Sensor ist ein Mikro-Reaktor, der bei Anwesenheit solcher Gase einen sehr geringen aber messbaren Strom erzeugt. Wie bei einer Batterie ist hier Elektrochemie im Spiel, denn die chemische Umsetzung produziert Elektronen.

Ein elektrochemischer Sensor besteht aus mindestens zwei Elektroden (Mess- und Gegen-Elektrode), die auf zweierlei Weise miteinander Kontakt haben: Einerseits über eine elektrisch leitendes Medium (sog. Elektrolyt, d.h. eingedickte Flüssigkeit als Ionenleiter), andererseits über einen äußeren elektrischen Stromkreis (Elektronenleiter):



- CO-Molekül, Messgas, dringt in die Messelektrode ein
- CO₂-Molekül, Reaktionsprodukt, tritt aus der Messelektrode aus
- H₂O-Molekül, Bestandteil des Elektrolyten
- H⁺, Wasserstoff-Ion, positiv geladen, weil ihm ein Elektron fehlt
- O, Sauerstoffatom, aggressiv, „saugt“ Elektronen auf
- O₂, Sauerstoffmolekül, zerfällt an der Gegenelektrode atomar
- Elektron, fließende Elektronen sind als elektrischer Strom messbar

Die Elektroden sind aus speziellem Material und wirken katalytisch, so dass bestimmte chemische Reaktionen an der sog. 3-Phasen-Grenze, wo Gas, Katalysator und Elektrolyt vorhanden sind, stattfinden. Der für die Reaktion erforderliche „Elektronensauger“ Sauerstoff stammt aus der Umgebungsluft, andere Elektronensauger sind z.B. Chlor, Fluor, Ozon oder NO₂. Bei Sensoren zur Messung dieser Gase fließt der Strom daher in umgekehrter Richtung. Solche Ströme lassen sich mit einem Mikro-Amperemeter messen.

Messprinzip elektrochemischer Sensor

Elektrochemische Sensoren

Mit den elektrochemischen DrägerSensoren sind weit mehr als hundert Gase und Dämpfe detektierbar. Einige dieser Sensoren reagieren sehr spezifisch auf das Zielgas, andere wiederum sind typische Gas-Gruppen-Sensoren, die eine Vielzahl reaktiver Gase detektieren können.

Elektrochemische Dräger-Sensoren sind mit drei Elektroden ausgestattet: Messelektrode, Gegenelektrode und Referenzelektrode, wobei eine gewisse Sensorvorspannung die Messqualität deutlich verbessert und über die Referenzelektrode und einen elektronischen Regelkreis (sog. Potentiostat) konstant gehalten wird. Außerdem findet sich im Sensor-Inneren ein Temperaturlaufnehmer, denn elektrochemische Prozesse sind extrem temperaturabhängig und müssen entsprechend kompensiert werden.

Erst durch die äußere Beschaltung des Sensors, insbesondere auch die Temperaturkompensation und die Aufbereitung des geringen und verrauschten Messstroms (wenige Mikroampere) zu einem 4-20-mA-Signal wird aus dem EC-Sensor ein Gasmess-Transmitter. Folgende Messbereiche sind hiermit realisierbar (und z.B. am Polytron 7000 sogar auch einstellbar):

Messgas	minimaler Messbereichs-endwert	maximaler Messbereichs-endwert
Acidic Compounds	3 ppm	30 ppm
Ammoniak	50 / 300 ppm	200 / 1000 ppm
Chlor	1 ppm	50 ppm
Chlorwasserstoff	20 ppm	100 ppm
Cyanwasserstoff	10 ppm	50 ppm
Hydrazin	0,3 ppm	3 ppm
Hydride	0,3 ppm	1 oder 20 ppm
Kohlenstoffmonoxid	50 / 200 ppm	1000 / 5000 ppm
Organic Vapours	20 ppm	100 oder 200 ppm
Ozon	0,5 ppm	5 ppm
Phosgen	0,1 ppm	1 ppm
Sauerstoff	5 Vol-%	25 / 100 Vol-%
Schwefeldioxid	5 ppm	100 ppm
Schwefelwasserstoff	10 / 100 ppm	100 / 1000 ppm
Stickstoffdioxid	5 ppm	100 ppm
Stickstoffmonoxid	30 ppm	200 oder 500 ppm
Wasserstoff	500 ppm	3000 ppm
Wasserstoffperoxid	1 / 1000 ppm	50 / 7000 ppm

Der elektrochemische Sensor benötigt so wenig Leistung, dass er problemlos eigensicher betrieben werden kann. Da durch können aufwändige Maßnahmen der druckfesten Kapselung entfallen und der Sensorwechsel vor Ort einfach durchgeführt werden.

Messprinzip Wärmetönungssensor

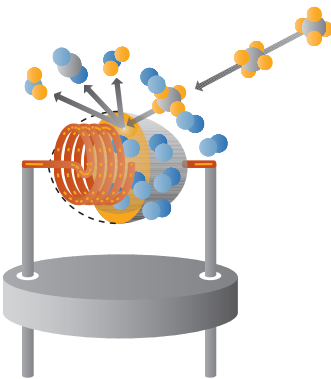


ST-1940-2004

Unter gewissen Umständen kann man brennbare Gase und Dämpfe unter Freisetzung von sog. Reaktionswärme mit Luftsauerstoff oxidieren. Hierzu verwendet man geeignet temperiertes Katalysatormaterial, das sich durch diese Reaktionswärme zusätzlich messbar erwärmt. Diese geringe Temperaturerhöhung ist ein Maß für die Gaskonzentration.

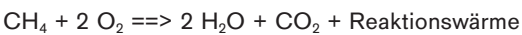
Sog. Pellistoren sind kleine sehr poröse Keramikugeln (Durchmesser ca. 1 mm), in die eine Platinspirale eingebettet ist. Die Platinspirale wird von einem Strom durchflossen, der den Pellistor auf einige hundert Grad aufheizt.

Enthält der Pellistor geeignetes Katalysatormaterial, so wird sich seine Temperatur bei Anwesenheit von brennbaren Gasen erhöhen, was sich wiederum in einer Widerstandserhöhung der Platinspirale auswirkt. Die Widerstandsänderung kann nun elektronisch ausgewertet werden.



ST-1581-2007

An einem heißen Pellistor wird mit Hilfe des im porösen Material vorhandenen aktivierten Luftsauerstoffs von außen zugeführtes gasförmiges Methan oxidiert. Hierbei entsteht neben Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid messbare Reaktionswärme.



Um Veränderungen der Umgebungstemperatur zu eliminieren, verwendet man einen zweiten Pellistor, der nahezu gleichartig aufgebaut ist, auf Gas jedoch nicht reagiert (z.B. dadurch, dass dieser Pellistor kein Katalysatormaterial enthält).

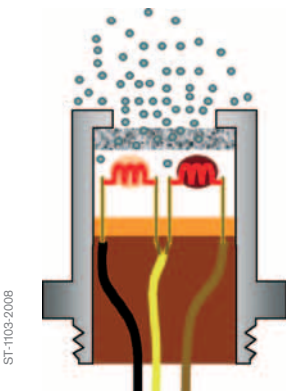
In einer sog. Wheatstoneschen Brückenschaltung entsteht auf diese Weise ein Sensorkreis, der weitgehend unabhängig von der Umgebungstemperatur die Anwesenheit brennbarer Gase und Dämpfe in Luft detektieren kann.

Wärmetönungssensoren

Ein Pellistor allein ist zur Detektion brennbarer Gase und Dämpfe nicht geeignet. Erst durch die Erweiterung um einen zweiten Pellistor (sog. Kompensator), der den Umgebungseinfluss und insbesondere den Temperatureinfluss kompensiert, und durch integrierte Zündschutzmaßnahmen (druckfeste Kapselung und Sinterscheibe) wird hieraus ein brauchbarer Wärmetönungssensor.

Der Kompensator ist völlig gleichartig zum aktiven Pellistor aufgebaut, er enthält jedoch keinen Katalysator, kann also kein Gas oxidieren: Ändert sich die Umgebungstemperatur, so ändern sich beide Pellistorwiderstände, ist Gas vorhanden, so ändert sich nur der Widerstand des aktiven Pellistors.

Da der Wärmetönungssensor etwa 450 °C heiße Pellistoren enthält, kann er – bei Überschreitung der UEG – selbst zur Zündquelle werden. Durch den Einsatz einer Metall-Sinterscheibe wird das verhindert: Kommt es im Innern des Wärmetönungssensors zur Zündung, so hält der Sensor dem Explosionsdruck stand und die Flamme wird durch die Sinterscheibe unter die Zündtemperatur des Gases abgekühlt. So ist sichergestellt, dass die Flamme nicht in den



Der aktive Pellistor und der Kompensator sind in einem druckfest gekapselten Gehäuse untergebracht. Das Gas gelangt durch die Sinterscheibe in den Innenraum des Sensors und trifft dort auf die heißen Pellistoren.

Außenraum durchschlägt – genau dieses sind die Merkmale der druckfesten Kapselung.

Wärmetönungssensoren werden an einer Wheatstone-Messbrücken-Schaltung betrieben, um die geringen Widerstandsunterschiede der Pellistoren in eine Spannung umzuwandeln.

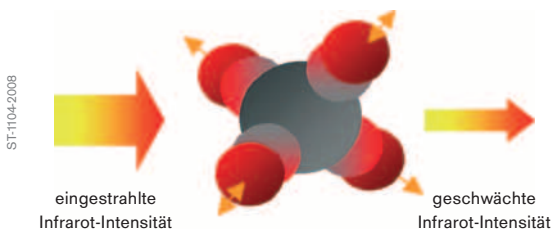
Abhängig davon, wo sich die zweite Hälfte der Messbrücke befindet, können Wärmetönungssensoren über eine sehr lange Leitung mit einer Zentrale verbunden oder auch direkt in einem Transmitter eingebaut sein.

Messprinzip Infrarotsensor

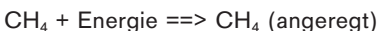
Untersucht man die große Palette der brennbaren Gase und Dämpfe, so kommt man zu der Erkenntnis, dass die meisten dieser Substanzen chemische Verbindungen aus vornehmlich Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und manchmal auch Stickstoff sind. Man bezeichnet solche sog. organischen Verbindungen als Kohlenwasserstoffe. Und diese haben gewisse Eigenschaften, die man sich bei der Infrarot-Messtechnik zu Nutze macht.

Alle Gase absorbieren Strahlung auf charakteristische Weise, einige sogar im sichtbaren Bereich (Wellenlänge 0,4 bis 0,8 Mikrometer), daher ist Chlor gelbgrün, Brom und Stickstoffdioxid braun, Joddampf violett usw., sichtbar aber leider nur in hohen (tödlichen) Konzentrationen.

Kohlenwasserstoffe hingegen absorbieren Strahlung in einem ganz bestimmten Wellenlängenbereich, so etwa von 3,3 bis 3,5 Mikrometer – und das lässt sich messtechnisch nutzen, denn Luft, d.h. Sauerstoff, Stickstoff und Argon absorbieren in diesem Bereich nicht.



Ein zu Schwingungen angeregtes Methan-Molekül absorbiert Energie



Ein Behältnis, das gasförmigen Kohlenwasserstoff wie z.B. Methan oder Propan enthält, wird die Intensität von eingestrahlt Infrarot vorhersagbar schwächen, und diese Schwächung ist von der Gaskonzentration abhängig.

Luft: Infrarot geht ungeschwächt hindurch – keine verringerte Intensität, kein Messsignal

Gas: Infrarot geht geschwächt hindurch – Intensität verringert sich entsprechend der Konzentration.

Dieses ist das Prinzip eines Infrarot-Messgerätes, wobei die Zuordnung der Intensitätsschwächung zur im Behältnis vorhandenen Gaskonzentration erst über die sog. Kalibrierung hergestellt wird: Eine definierte vorgegebene Gaskonzentration verursacht stets die gleiche Intensitätsschwächung, und daher das gleiche Messsignal.

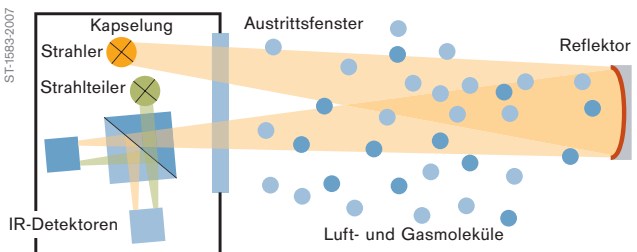
Brennbare Gase und Dämpfe sind meist Kohlenwasserstoffe, und Kohlenwasserstoffe sind fast immer über ihre typische IR-Absorption detektierbar.

Infrarot-Transmitter

Das Messprinzip ist einfach: Kohlenwasserstoffe schwächen messbar Infrarotstrahlung (IR) im Wellenlängenbereich von etwa 3,3 bis 3,5 Mikrometer (μm), abhängig vom Absorptionsspektrum des betrachteten Gases. Die Schwächung ist allerdings sehr gering und messtechnisch eine Herausforderung. Und leider kann die Intensitätsschwächung auch durch andere Umstände erfolgen, z.B. durch eine verschmutzte Optik oder nachlassende Strahlerintensität.

Die Strahlungsquelle eines Infrarotsensors ist eine mit Unterspannung betriebene blinkende Glühlampe, deren Strahlung einen hohen Infrarot-Anteil hat. Diese Strahlung trifft (durch ein IR-durchlässiges Fenster) auf einen Strahlteiler, der die Strahlung auf zwei IR-Detektoren verteilt, den sog. Mess- und Referenzdetektor. Ein Detektor besteht aus einem gekapselten pyroelektrischen Kristall, der die empfangene Strahlungsenergie in eine Signalspannung umsetzt. Durch sog. Interferenzfilter erhält der Kristall jedoch nur Strahlung einer gewissen Wellenlänge: der Messdetektor z.B. nur Strahlung mit 3,4 μm , der Referenzdetektor nur Strahlung mit 4,0 μm . Gase absorbieren im Bereich um 4,0 μm nicht. Messen demnach beide Detektoren eine verringerte Strahlungsenergie, so kann nicht Gas die Ursache sein! Mit Hilfe des Referenzdetektors ist es also möglich, die Messung

bis zu einem gewissen Grade verschmutzungstolerant zu machen und auch zur präventiven Wartung aufzufordern.



Der IR-Sensor des Polytron IR Typ 340, schematisch

IR-Transmitter sind mit solchen oder ähnlichen Sensoren ausgestattet. Das Messsignal der beiden IR-Detektoren wird entsprechend aufbereitet und steht schließlich als 4 ... 20-mA-Signal zur Verfügung. In der industriellen Messtechnik sind IR-Transmitter aufgrund ihrer Lebensdauer sehr begehrt, denn die Messelemente selbst kommen nicht – wie beim elektrochemischen oder Wärmetönungssensor – mit dem Messgas in Berührung. Solange keine Kondensation in der Optik stattfindet – und das wird durch beheizte Oberflächen verhindert – haben IR-Transmitter so hervorragende messtechnische Eigenschaften, dass sie auch prozessnahen Anwendungen betrieben werden können.

ST-3719-2003



Die große Geschwindigkeit von Gasmolekülen hat zur Folge, dass sich Gase schnell ausbreiten und sich insbesondere auch schnell mit anderen Gasen vermischen. Solange aber die Durchmischung nicht vollständig ist, also lokale Konzentrationsunterschiede existieren, kommt dieser Vorgang der Vermischung nicht zur Ruhe.

Solche Konzentrationsunterschiede können sogar wie eine Mikropumpe wirken. Denn wenn man den Konzentrationsunterschied aufrecht erhält, entsteht ein kontinuierlicher Molekülfluss, und genau ein solcher wird in der Gasmess-technik ausgenutzt. Man spricht von diffusionsgetriebenen Sensoren.

Der Trick: Beim Wärmetönungssensor und beim elektrochemischen Sensor wird das zu detektierende Gas durch chemische Reaktion abgebaut, direkt am Ort der Reaktion ist deshalb die Konzentration dieses Gases verschwindend gering, viel geringer als in der Umgebung, und es entsteht eine Verarmungszone. Aufgrund dieses erzwungenen Konzentrationsgefälles strömen kontinuierlich Moleküle dieses Gases in den Reaktionsbereich des Sensors nach.

ST-1105-2008

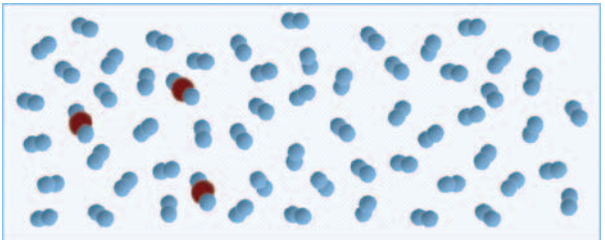


Abbildung: Bedingt durch die Molekularbewegung „gibt die Natur nicht eher Ruhe“, bis die drei größeren Moleküle sich über das ganze Volumen gleichförmig verteilt haben. Ist die Gleichverteilung erreicht, so endet der Diffusionsvorgang.

Konvektion zum Sensor, Diffusion in den Sensor

Während das Gas im wesentlichen durch Konvektionsströme zum Sensor gelangt, ist das Eindringen in den Sensor durch Sintermetall oder Staubfilter eher ein Diffusionsvorgang, denn die Poren enthalten ruhende Luft und Konvektion gibt es dort nicht. Die Poren selbst behindern den Gasdurchtritt nicht, sondern die ruhende Luft: Wäre das Gasmolekül so groß wie eine Erbse, so hätte eine Sinter- oder Filterpore einen Durchmesser von 100 bis 1000 Meter!

Diffusionsgetriebene Sensoren brauchen keine Pumpe.

Open Path Detektoren

Denkt man sich den Strahlengang eines Infrarot-optischen Gassensors um ein Vielfaches verlängert, so erhält man ein Gasmesssystem mit einer offenen Messstrecke: Gasmoleküle, die den Messstrahl passieren, verursachen eine messbare Infrarot-Absorption. Wenn man so will, sind solche Gasmessgeräte Lichtschranken für Gase. Und das für Messstrecken bis zu 200 Metern!

Das Messergebnis einer Open-Path-Messung ist etwas ungewohnt. Während man beim optischen System eines Infrarotsensors noch davon ausgehen kann, dass dieses homogen mit einer vorgegebenen Gaskonzentration gefüllt ist, ist das bei einer großen Messstrecke niemals der Fall.

Prinzipiell kann man gar nicht unterscheiden, ob auf einem kleinen Teil der Messstrecke eine hohe Gaskonzentration vorhanden ist oder auf einem doppelt so langen Teil der Messstrecke nur eine halb so große Gaskonzentration: In beiden Fällen ist das Messergebnis das gleiche, denn alle Moleküle innerhalb der Messstrecke tragen zum Messergebnis bei – unabhängig von ihrer Verteilung.

Doch die Wahrscheinlichkeit, dass eine Gaswolke durch eine solche Messstrecke driftet, ist in gewissen Anwendungen größer als dass sie von einem Punktdetektor erkannt wird.

Sicherheitstechnisch betrachtet verzichtet man auf die gewohnte Konzentrationsmessung zu Gunsten einer höheren Detektionswahrscheinlichkeit.

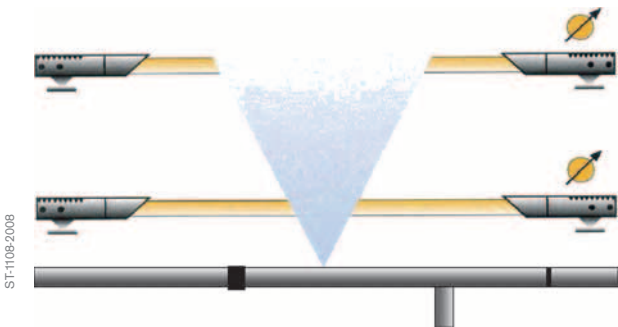


Abb.: Solange die Gaswolke in der Messstrecke bleibt, liefert sie das gleiche Signal, und zwar unabhängig davon, ob sie sich mit Luft verdünnt oder nicht: ein Open-Path-Messsystem zählt sozusagen die Moleküle, ihr Abstand spielt keine Rolle.

Man sagt, ein Open-Path-Detektor sei eher ein zuverlässiger Gasgefahrenmelder als ein Gasmessgerät. Die Information „es ist Gas vorhanden“ ist für Anwendungen mit hohem Gefahren-Potential wie z.B. in der Erdgas-Exploration, schon genügend Anlass, sicherheitstechnische Maßnahmen zu aktivieren.

Ein Sensor zur Gas-Detektion ist für die Gasesstechnik noch nicht ausreichend. Die Sensorsignale müssen elektronisch aufbereitet, insbesondere auch temperaturkompensiert werden und für die Kalibrierung sogar auch angezeigt werden, Messbereiche konfiguriert werden – hierzu ist natürlich Versorgungsspannung erforderlich.

Es hat sich bei Transmittern der Gasesstechnik weitgehend durchgesetzt, diese mit 24 V Gleichspannung zu betreiben – wobei diese Spannung in weiten Grenzen schwanken, d.h. zum Beispiel zwischen 16 und 30 Volt liegen darf. Die Transmitter-Elektronik wandelt das Sensorsignal so in einen Strom um, dass bei reiner Luft (Nullsignal) ein Strom von 4 mA zur Zentrale fließt, bei Vollausschlag ein Strom von 20 mA.

Wir die Messleitung durchtrennt, kann kein Strom fließen – was für die Zentrale erkennbar ist. Überhaupt werden Signale unterhalb von 3.8 mA oder oberhalb von 20.5 mA nicht als Messsignal interpretiert, sondern als Sondersignale, um z.B. Nullpunktunter- oder Messbereichsüberschreitung anzuzeigen, aber auch gewisse andere Wartungszustände. Das 4 ... 20-mA-Signal ist ein weltweiter Industriestandard und im Gegensatz zu Spannungssignalen unabhängig vom Leitungswiderstand, zudem niederohmig und relativ störunempfindlich.

Transmitter mit elektrochemischen Sensoren benötigen so wenig elektrische Leistung, dass sie sogar mit einem Strom von weniger als 4 mA betrieben werden können und je nach Gaskonzentration einen zusätzlichen Strom von 4 ... 20 mA aus der Versorgungsspannung ziehen: Signal und Versorgung über nur zwei Leiter, das ist der sog. 2-Draht-Anschluss. Bei größerem Leistungsbedarf (Wärmetönungs- und IR-Sensoren) braucht man leider drei Leiter.

Man kann auf das 4 ... 20-mA-Signal ein symmetrisches frequenzmoduliertes Signal von ± 1 mA aufmodulieren, um hierüber zusätzlich digitale Informationen zwischen Zentrale und Transmitter auszutauschen. Dieses ist das sog. HART-Signal, mit dem man sogar auch gezielt bestimmte Transmitter digital ansprechen und zur Ausgabe des aktuellen Messwertes auffordern kann. Hierzu können mehrere HART-fähige Transmitter an nur einer 2-adrigen Kommunikationsleitung betrieben werden.

Die digitale Kommunikation, sei es nun über HART oder auch über eine sog. RS 485-Schnittstelle, gibt dem Betreiber die Möglichkeit, ferngesteuert das „Wohlbefinden“ der Transmitter abzufragen und präventiv Wartungsmaßnahmen durchzuführen.

Es gibt viele Gründe, den Sensor nicht direkt an dem Ort zu haben, wo auch das zu detektierende Gas auftritt. Eine kontinuierliche Ansaugung löst das Problem und hat darüber hinaus sogar auch Vorteile. Man kann die angesaugte Probe aufbereiten (filtrieren, temperieren, trocknen und Kondensat ableiten), Druckschwankungen kompensieren, durch Umschalten weitere Ansaugleitungen überwachen und auch automatisch Prüfgas auf den Sensor geben.

Zonenverschleppung

Ansaugung aus dem Ex-Bereich bedeutet, dass man die Ex-Zone (meist Zone 1) in den sicheren Bereich verschleppt. Da dort keine Zündschutzmaßnahmen existieren, kann es zur Entzündung kommen. Durch den Einsatz von in der Ansaugleitung eingebauten Flammensperren kann man zumindest den Flammenrückschlag in den Ex-Bereich verhindern.

Ansaugleitungen

Je kleiner der Leitungsquerschnitt, umso größer der Druckabfall – je größer der Leitungsquerschnitt, umso länger die Reaktionszeit: Gute Kompromisse erzielt man mit 4 mm Innen-Rohrdurchmesser bei einem Durchfluss von etwa 1 bis 2 Liter pro Minute.

Vorsaugung

Durch den Einsatz einer kräftigeren Pumpe (10 bis 20 L/min) kann man über sehr lange Ansaugleitungen vorsaugen und die Gasprobe mit Hilfe einer kleineren Messgasförderpumpe (ca. 1 L/min) dem Sensor zuführen.

Pumpen- und Leitungsüberwachung

Sicherheitstechnisch ist zu beachten, dass eine Probenahme die Reaktionszeit verlängert und die einwandfreie Funktion des gesamten Ansaugweges überwacht werden muss. Hierzu verwendet man Durchflusswächter mit Alarmkontakt, der im Fall einer Pumpenstörung oder einer verstopften Ansaugleitung einen Alarm auslöst. Werden Filter oder Kondensatabscheider eingesetzt, so müssen diese natürlich regelmäßig gewechselt bzw. geleert werden.

Material und Wandungseffekte

Als Rohrmaterial haben sich insbesondere Teflon und Viton sowie Edelstahl bewährt. Es ist darauf zu achten, dass einige Gase leicht von der Oberfläche des Materials absorbiert werden und bei ppm-Messungen das Ergebnis hierdurch verfälscht werden kann.

Bei industriellen Prozessen sind sehr häufig brennbare Substanzen, möglicherweise auch brennbare Stäube beteiligt. In diesen Bereichen können brennbare Gase und Dämpfe prozessbedingt (z. B. durch Entlastungsventile) oder auch durch unvorhersehbare Vorgänge (Störfälle) freigesetzt werden. Präventiv werden solche Gefährdungsbereiche zu Ex-Bereichen („Zonen“) deklariert, in denen ausschließlich Betriebsmittel eingesetzt werden dürfen, die mit einer zuverlässigen Zündschutzart versehen sind.

Weltweit ist der Explosionsschutz genormt, wobei die Normungsbasis nach IEC, CENELEC (Europa) und NEC 505 (Nordamerika) vergleichbar ist und auf dem 3-Zonen-Konzept aufbaut, das zusehends auch in den USA akzeptiert wird.

Zone nach IEC, NEC 505 und CENELEC	Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre existiert...
Zone 0	ständig, häufig oder langfristig
Zone 1	gelegentlich
Zone 2	selten und kurzzeitig

während der typisch amerikanische Explosionsschutz nach NEC 500 noch auf dem 2-Divisions-Konzept aufbaut:

Division nach NEC 500	Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre existiert...
Division 1	ständig oder gelegentlich
Division 2	selten oder kurzzeitig

Nach IEC, NEC 505 und CENELEC gibt es sieben genormte Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel in der Zone 1 während in Nordamerika (USA/Kanada) nach NEC 500 lediglich drei Zündschutzarten für die Division 1 angewendet werden:

Zündschutzarten nach IEC, NEC 505 und CENELEC	vergleichbare Zündschutzarten nach NEC 500
Druckfeste Kapselung	Explosion proof
Vergusskapselung	–
Sandkapselung	–
Ölkapselung	–
Fremdbelüftung	Purged / Pressurized
Erhöhte Sicherheit	–
Eigensicherheit	Intrinsically safe

Die Zündschutzarten Sand- und Ölkapselung werden in der Mess- und Regeltechnik heute kaum noch angewendet und spielen in der Gasmesstechnik keine Rolle. Fremdbelüftung, d.h. kontinuierliches Spülen mit z.B. Druckluft ist eine typische Zündschutzart für Großgeräte und Schaltschränke. Die normgerechte Kennzeichnung eines Betriebsmittels, z.B. Ex de IIC T4, informiert den Fachmann über die Verwendbarkeit in dem vorgesehenen Gefahrenbereich.



Für Produkte der Mess- und Regeltechnik, die mit einer relativ geringen elektrischen Leistung betrieben werden, ist die sog. Eigensicherheit die eleganteste Methode des Explosionsschutzes. Elegant, weil das Produkt so konstruiert ist, dass selbst im 1. oder 2. Fehlerfall nachweislich weder Funken ausreichender Energie noch heiße Oberflächen entstehen können, also niemals zur Zündquelle wird.

Elektrische Funkenentladungen müssen eine gewisse Mindestenergie (**Zündenergie**) haben, andernfalls können sie selbst das zündwilligste Gemisch eines vorgegebenen brennbaren Gases in Luft – und somit auch keine beliebige andere Konzentration – zünden.

Auch die Oberflächentemperaturen von elektronischen Komponenten dürfen für ein vorgegebenes brennbares Gas eine gewisse Temperatur (**Zündtemperatur**) nicht überschreiten.

Legt man also die elektronischen Stromkreise eines Produktes entsprechend fehlersicher aus und begrenzt deren gespeicherte elektrische Energie (wirksame Kapazitäten und Induktivitäten) und die elektrische Leistung (d.h. Strom und Spannung) auf vorgegebene Größen, so kann dieser Stromkreis keine Zündung hervorrufen, das Produkt ist dann eigensicher.

Hierzu gibt es ein wichtiges Zubehör: Verlassen die eigensicheren Stromkreise den Ex-Bereich, so müssen diese durch sog. **Sicherheitsbarrieren** vor fehlerhaften Spannungen geschützt werden. Sicherheitsbarrieren enthalten mindestens eine Feinsicherung, Widerstände zur Strombegrenzung und Zenerdioden zur Spannungsbegrenzung.

Eigensichere Produkte sind durch „i“ (von intrinsic safety) gekennzeichnet.

Ihre Bauform ist leicht und einfach – und prinzipiell darf an ihnen sogar unter Spannung gearbeitet oder Leitungen aufgetrennt und Sensoren gewechselt werden, denn zündfähige Funken können definitiv nicht entstehen.

Zündschutzart druckfeste Kapselung



Die Zündschutzart der druckfesten Kapselung ist die älteste, sie wurde schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts im deutschen Bergbau angewendet (die internationale Kennzeichnung „d“ verweist auf den deutschen Ursprung) und ist im Vergleich zur Eigensicherheit eine recht grobe, nämlich rein mechanische Methode, die Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre zu vermeiden:

Man lässt sie einfach im Gehäuse-Inneren stattfinden und vermeidet zuverlässig den Flammenrückschlag. Gehäuse der Zündschutzart druckfeste Kapselung müssen deshalb so konstruiert sein, dass sie dem im Inneren stattfindenden Explosionsdruck standhalten. Je größer das Gehäusevolumen, umso größer der mögliche Explosionsdruck, umso robuster muss ein solches Gehäuse sein.

Wenn also brennbare Gase in das Innere des Gehäuses eindringen, ist eine Zündung durch die darin befindlichen elektrischen (auch Funken produzierenden) Stromkreise nicht ausgeschlossen. Erfolgt eine Zündung, so hält das Gehäuse dem Explosionsdruck stand, und der Explosionsdruck wird durch sog. Spalte abgebaut.

Die meist metallischen Spalte mit vorgegebener Oberfläche (Spaltmaße) haben eine sehr wichtige Funktion: Sie kühlen die an ihnen vorbeifließenden heißen Gase bis unter die Zündtemperatur – eine sehr wirksame Flammenlöschung. So kann die Flamme nicht in den gefährdeten Bereich zurückschlagen und Rückzündungen verursachen.

Druckfest gekapselte Produkte sind schwer und dürfen nicht unter Spannung geöffnet werden (zur Wartung solcher Geräte muss eine offizielle Erlaubnis eingeholt werden). Druckfest gekapselte Geräte können auf dreierlei Art angeschlossen werden:

1. **Conduit-Verrohrung:** Die elektrischen Leitungen werden in zugelassenen Rohrleitungen verlegt, die ebenfalls druckfest gekapselt sind. Die Rohre werden direkt in die dafür vorgesehene konische Rohrverschraubung des Produkts eingeschraubt.
2. Das Kabel wird über eine zugelassene **druckfeste Kabelverschraubung** herausgeführt. Nachteil: Der Zündschutz wird erst bei der Installation vor Ort hergestellt.
3. Das Anschlusskabel wird über einen zugelassenen **Klemmenkasten mit erhöhter Sicherheit** („e“) angeschlossen.



Bekannt auch als ATEX 137 (ehemals ATEX 118a), verbindlich seit 30. Juni 2006. Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen (Nationale Umsetzung in Deutschland: Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV). Betrifft die Mindestanforderungen an Gesundheitsschutz und Sicherheit der Arbeitnehmer in explosionsgefährdeten Bereichen.

Zonen-Definition:

Gas, Dampf	Staub	zündfähige Atmosphäre existiert..
Zone 0	Zone 20	ständig, langfristig, häufig
Zone 1	Zone 21	gelegentlich
Zone 2	Zone 22	normalerweise nicht, kurzzeitig

Auswahl von Betriebsmitteln (diese Tabelle verbindet die Kategorien der ATEX 95 mit den Zonen der ATEX 137):

erlaubter Einsatz	Gas, Dampf (G)	Staub (D)
Geräte mit Kategorie 1	Zone 0, 1, 2	Zone 20, 21, 22
Geräte mit Kategorie 2	Zone 1, 2	Zone 21, 22
Geräte mit Kategorie 3	Zone 2	Zone 22

Beispiel: In der Zone 21, wo gelegentlich zündfähige Atmosphären von Staub entstehen können, müssen eingesetzte Betriebsmittel mit II 2D oder II 1D gekennzeichnet sein.

Erforderliche Maßnahmen:

- Beurteilung des Explosionsrisikos
- Einteilung des gefährdeten Bereiches in Zonen
- Kennzeichnung des gefährdeten Bereichs durch dreieckiges Warnschild „Ex“
- Sicherheitsstrategien des Betreibers
- Explosionsschutzdokument
- Qualifikation der Arbeitnehmer
- Kriterien für Zulassung von Arbeiten im gefährdeten Bereich

Leitsatz der Gefahrenabwehr:

- Bildung von explosionsfähiger Atmosphäre vermeiden, falls das nicht möglich ist:
- Entzündung von explosionsfähiger Atmosphäre verhindern, falls das nicht möglich ist:
- Schädliche Auswirkung der Explosion auf ein erträgliches Maß reduzieren.

Der Begriff Safety Integrity zieht sich wie ein Modewort durch die technisch-basierte und automatisierte Sicherheitstechnik. Auch die stationäre Gasmesstechnik macht hierbei keine Ausnahme. Der Safety Integrity Level (SIL) ist ein objektives Maß zur Beurteilung der Zuverlässigkeit einer risiko-mindernden Einrichtung.

- Wo potentielle Gefahr für Menschen, Umwelt und Anlagen existiert, gilt es, durch risiko-mindernde Maßnahmen ein gefordertes Maß an Sicherheit zu erzielen. Wenn solche Maßnahmen automatisch durch sog. elektrische, elektronische oder programmierbare elektronische Systeme realisiert werden, geht es um funktionale Sicherheit.
- Solche Systeme, oftmals als Schutzsysteme oder sicherheitsrelevante Systeme bezeichnet, führen eine Sicherheitsfunktion aus und müssen eine dem Risiko angemessene Zuverlässigkeit (Integrity) besitzen.
- Durch beliebige auftretende Fehler aber können solche Systeme durchaus ausfallen. Fallen sie aus, müssen sie aber zumindest in den sicheren Zustand gehen und unverzüglich repariert werden. Das aber setzt voraus, dass das Auftreten solcher Ausfälle erkennbar ist.

- Ein hoher Anteil aller möglichen Fehler (die durch eine sog. FMEDA ermittelt werden) lässt sich durch elektronische Fehlerüberwachung (Diagnoseeinrichtung) erkennbar machen, so dass das System im Fehlerfall in den sicheren Zustand versetzt werden kann (Fehlersicherheit).
- Rein statistisch bleibt jedoch stets ein sehr kleiner Anteil eines zufälligen Fehlers, der sich der automatischen Detektierbarkeit entzieht, nämlich der sog. gefährliche nicht-detektierbare (dangerous undetected) oder kurz DU-Fehler, der zwar sehr selten auftritt, die Ausführung der Sicherheitsfunktion aber verhindert.
- Aus dem Verhältnis der Auftrittswahrscheinlichkeit des DU-Fehlers zu allen Fehlern lassen sich Diagnosedeckungsgrad DC und der Safe Failure Fraction SFF berechnen. Sie dürfen je nach Anforderung vorgegebene Prozentsätze nicht unterschreiten.
- Durch sinnvolle Anlagenkonzepte (insbesondere auch Redundanzen), periodisch wiederkehrende Funktionsprüfung und präventive Maßnahmen kann die Auftrittswahrscheinlichkeit eines DU-Fehlers weiter reduziert werden.
- Das hierdurch verbleibende Restrisiko kann statistisch bewertet und klassifiziert werden. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Sicherheitsniveaus von SIL1 bis SIL4.



Was tun im Alarmfall? Gaswarnanlagen sind dazu vorgesehen, rechtzeitig zu alarmieren, den Betreiber über den Alarmzustand in Kenntnis zu setzen und Maßnahmen zur Abwendung der Gefahrensituation einzuleiten. Das geschieht meist automatisch, kann aber über einen Alarmplan auch organisatorisch geregelt werden. Im Alarmfall liegt die Verantwortung für die adäquate Reaktion beim Anlagenbetreiber.

Das Konzept einer Gaswarnanlage ist stets:
Gasgefahr erkennen, reagieren und abwenden.

Hauptalarm

Prinzipiell ist das Überschreiten nur einer Hauptalarmschwelle ausreichend. Der gefahrlose Zustand wird dann erzielt durch Absichern des Gefahrenbereiches (optische/akustische Alarmierung und Evakuierung) oder Abschalten von Gasversorgungen oder das Unwirksammachen von Zündquellen, Auffordern zum Anlegen von persönlicher Schutzausrüstung, Atemschutz etc. Das ist eine sichere aber harte, nämlich unwirtschaftliche Maßnahme, denn der gesamte Prozess steht still.

Voralarm

Ein Voralarm bei einer niedrigeren Konzentration als der der Hauptalarmschwelle kann das möglicherweise verhindern. Hiermit schaltet man automatische Gegenmaßnahmen, die einen Hauptalarm verhindern. Wird der Voralarm geschaltet, so kann durch effektive Lüftung dafür gesorgt werden, dass die Gaskonzentration nicht übermäßig steigt und die Hauptalarmschwelle nicht erreicht. Das ist optimal, denn: **Durch den Voralarm kann ein Gefahrenzustand ohne Prozessstillstand beherrscht werden.** Es liegt also im Interesse des Betreibers, die Gegenmaßnahmen so effektiv auszuführen, dass der Hauptalarm nach Möglichkeit niemals erreicht wird: **Richtig ausgelegte Gaswarnanlagen erreichen den Hauptalarm nur selten oder gar nicht.**

Störungsalarm

Störungsalarme geben einen Hinweis darauf, dass die Anlage teilweise oder gänzlich ihren Dienst versagt und im Falle eines Gasausbruchs nicht reagieren kann. Vorsorglich müssen im Störfall die gleichen Maßnahmen getroffen werden wie bei Hauptalarm, d.h. ein sicherer Zustand eingeleitet werden.



ST-725-2002

Die Zuverlässigkeit einer Gaswarnanlage ist nicht nur von deren Eigenschaften abhängig, sondern auch von deren Installation und Betrieb. Verständlicherweise können Sensoren nur einen Gasausbruch detektieren, wenn der Sensor von der Gaswolke umgeben ist. Falsch positionierte Sensoren können eine Gaswarnanlage unbrauchbar machen.

Leckagen sind dadurch gekennzeichnet, dass Gase tiefkalt (verflüssigt) und/oder unter Druck in die Umgebungsluft freigesetzt werden und sich mit dieser vermischen. Deren Konzentration sinkt, und die Ausbreitung hängt meist mehr von den Temperaturverhältnissen und der vorhandenen Luftströmung ab als von der Dichte des reinen Gases.

Drei Faustregeln:

- Es gibt nur 3 brennbare Gase, die sehr viel leichter sind als Luft: Wasserstoff, Methan und Ammoniak. Gemische dieser drei Gase mit Luft steigen im allgemeinen auf.
- Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten sind immer schwerer als Luft – sie fließen nach unten, sofern sie nicht durch Konvektion gestört werden.
- Unabhängig von der Dichte des Gases sind Gaskonzentrationen von weniger als 1000 ppm in Luft praktisch gleich schwer wie Luft. Die Ausbreitung solcher Konzentrationen folgt der vorhandenen Luftströmung.

Platzierungsstrategie:

Die optimale Methode der Leckagedetektion besteht darin, Sensoren möglichst dicht an den potentiellen Leckstellen zu positionieren. Solche Leckstellen sind Pumpen, Ventile, flexible Leitungen, Anschlüsse, Absperrvorrichtungen, Entlastungsbalgen, Flansche, etc. Sind solche Stellen weniger gut bekannt, so müssen die Sensoren im gesamten gefährdeten Bereich verteilt werden (Bereichsüberwachung). Stets ist darauf zu achten, dass unter den aktuellen Verhältnissen das zu detektierende Gas auch tatsächlich den Sensor erreichen kann. Die örtlichen Verhältnisse des Überwachungsbereiches sind individuell so verschieden, dass es zwar Leitfäden für die Sensorpositionierung gibt (z.B. die EN 50073), jedoch keine verbindlichen Vorgaben.



Zunächst einmal messen Gassensoren keine Gaskonzentrationen, sondern elektrochemische Sensoren eine Elektronenflussänderung, Wärmetönungssensoren eine Widerstandsänderung und IR-Detektoren eine Strahlungsleistungsänderung (im nahen Infrarot), wobei sich die Änderungen auf den Zustand beziehen, der sich in sauberer Luft einstellt und den man Nullpunkt nennt, weil kein Gas vorhanden ist. Erst durch den Vorgang der sog. Kalibrierung, d.h. durch Herstellung einer festen Beziehung zwischen Gaskonzentration und Messsignal wird aus solchen Gassensoren ein Gasmessgerät.

Die Kalibrierung ist außerordentlich wichtig, denn verständlicherweise können Gasmessgeräte nicht richtig messen, wenn sie falsch kalibriert sind. Während die Nullpunkt-Kalibrierung sich meistens recht einfach gestaltet, weil ja oftmals die Umgebungsluft hierzu herangezogen werden kann, ist die Kalibrierung der Empfindlichkeit nicht ganz so trivial. Gerade, weil elektrochemische Sensoren oft reaktive Gase detektieren, müssen diese auch mit reaktiven Gasen kalibriert werden – und reaktive Gase reagieren auch in geringen Konzentrationen schon mit (feuchten) Materialoberflächen oder Kunststoffen. Wenn auch aus sicherheitstechnischer Sicht stets mit dem Zielgas kalibriert werden sollte, also dem Gas, das auch betrieblich detektiert werden soll, so gibt es vielerlei Gründe, ein Ersatz-Prüfgas für die Kalibrierung zu verwenden.

Sollen mehrere Gase mit ein und demselben Sensor detektiert werden, so muss der Sensor auf das Gas kalibriert werden, auf das er am unempfindlichsten reagiert. Man ist dann auf der sicheren Seite, weil alle anderen Gase in ihrer Konzentration überbewertet werden. Die Empfindlichkeit des Sensor gegenüber vorgegebenen Gasen lässt sich nicht aus gasspezifischen Daten ermitteln, sondern ausschließlich durch die Vermessung solcher Sensoren. Um gute Ergebnisse zu erzielen, sollte die Kalibrierung immer so gut wie möglich unter den betrieblich zu erwartenden Bedingungen durchgeführt werden.

Kalibrierkammer für brennbare Flüssigkeiten

Zur Herstellung von vorgegebenen %UEG-Konzentrationen von brennbaren Dämpfen empfiehlt sich die Verwendung einer sog. Kalibrierkammer, in die eine berechenbare Flüssigkeitsmenge (z.B. 100 Mikroliter) eingespritzt wird, die bei vollständiger Verdampfung eine Konzentration von z.B. 50% UEG für die Kalibrierung erzeugt.

Anforderungen an Gasmessgeräte

Als Produkte der Sicherheitstechnik müssen Gasmessgeräte bzw. Gaswarnanlagen für den industriellen Einsatz neben den gesetzlichen Auflagen (elektrische Sicherheit, Explosionsschutz, elektromagnetische Verträglichkeit) auch weitere Anforderungen erfüllen, so dass auch unter harten Einsatzbedingungen die Produktqualität und die Zuverlässigkeit der Alarmierung erhalten bleibt.

Explosionsschutz-Normen:

Konstruktionsanforderungen stellen sicher, dass das Gerät nicht zur Zündquelle wird, weltweit akzeptierte Normen z.B. von CENELEC (ATEX), IEC, CSA, UL, GOST, etc.

Elektromagnetische Verträglichkeit nach EN 50 270:

Prüfnormen stellen sicher, dass das Gerät nicht leitungsgebundene Störungen oder Störstrahlung produziert, insbesondere aber auch leitungsgebundene Störungen (Surges, Bursts) und Hochfrequenz-Einstrahlung (80 MHz bis 2 GHz bei Feldstärken bis 30 V/m) und elektrische Stoßentladung verträgt und die Zuverlässigkeit des Gerätes nicht beeinträchtigt wird. Die diesbezüglichen Prüfnormen sind im wesentlichen die Serie IEC 61000.

Klima, Vibration und Stoß, z.B. nach IEC 60028:

Temperaturzyklen (bis 70 °C) trocken und feucht (mit Kondensation!) über mehrere Tage sowie Kältetest. Hierbei festgelegte Funktionsprüfungen und Prüfung des Isolationswiderstands. Vibration mit bis zu vierfacher Erdbeschleunigung, im Bereich von zuvor ermittelten Resonanzfrequenzen Vibration je Achse 90 Minuten ohne Funktionsbeeinträchtigung.

Qualität der Messfunktion:

Einhaltung einer vorgegebenen Messqualität auch unter extremen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck, Wind, Feuchte, Vibration, etc):

EN 61 779 - für brennbare Gase und Dämpfe

EN 45 544 - für toxische Gase und Dämpfe

Digitale Kommunikation nach EN 50 271:

Transmitter und Zentralen sind heutzutage meist mikroprozessorgesteuert. Sowohl Hardware als auch Software müssen gewisse Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen.

Seeschiffszulassungen:


Anforderungen der Klassifikationsgesellschaften z.B. Det Norske Veritas (DNV), Lloyds Register of Shipping (LRS), Germanischer Lloyd (GL), Bureau Veritas (BV), etc.



Eigenschaften von gefährlichen Gasen und Dämpfen

Brennbare und toxische Gase und Dämpfe kommen in vielen Bereichen vor. Die von ihnen ausgehende Gefahr gilt es zu beherrschen – dazu dienen Gaswarnanlagen.

Hinsichtlich der messtechnischen und sicherheitstechnischen Belange soll dieser Faltprospekt dem Leser gewisse Grundlagen der Gasmesstechnik vermitteln.





Sensoren und Messprinzipien

Sensoren zur Detektion von Gasen und Dämpfen sind Geräte, die gewisse Eigenschaften der Gase nutzen, um diese in ein elektrisches Signal zu konvertieren.

In der industriellen Gasmesstechnik haben sich insbesondere drei Messverfahren durchgesetzt: Elektrochemische Sensoren, Wärmetönungssensoren und Infrarot-Sensoren.



Explosionsschutz und Anlagensicherheit

In nahezu allen industriellen Bereichen kommen brennbare Substanzen vor. Betriebsmittel, die in solchen Bereichen installiert sind, unterliegen dem Explosionsschutz und müssen entsprechend geprüft und zertifiziert sein.

Erst durch geeignete Sicherheitskonzepte, hohe Verfügbarkeit und Fehlersicherheit werden Gaswarnanlagen zu zuverlässigen Schutzsystemen.

ANLAGENBAU
GASMESSTECHNIK

VERTRIEB DEUTSCHLAND

REGION NORD

Revalstraße 1
23560 Lübeck
Tel 0451 882 4722
Fax 0451 882 4724
agt.nord@draeger.com

REGION OST

An der Harth 10 B
04416 Markkleeberg
Tel 0341 3534 673
Fax 0341 3534 672
agt.ost@draeger.com

REGION SÜD

Leonhardsweg 4
82008 Unterhaching
Tel 089 615203 13
Fax 089 615203 10
agt.sued@draeger.com

REGION WEST

Kimplerstraße 284
47807 Krefeld
Tel 02151 3735 39
Fax 02151 3735 35
agt.west@draeger.com

VERTRIEB INTERNATIONAL

P. R. CHINA

Beijing Fortune Draeger
Safety Equipment Co., Ltd.
Beijing 101300
Tel +86 10 80 49 80 00
Fax +86 10 80 49 80 05

FRANCE

Dräger Safety France S.A.S.
67025 Strasbourg Cedex
Tel +33 388 40 76 76
Fax +33 388 40 76 67

SINGAPORE

Draeger Safety Asia Pte. Ltd.
139950 Singapore
Tel +65 68 72 92 88
Fax +65 67 73 20 33

UNITED KINGDOM

Draeger Safety UK Ltd.
Blyth, Northumberland NE24 4RG
Tel +44 1670 352 891
Fax +44 1670 544 475

USA

Draeger Safety, Inc.
Sugar Land, TX 77478
Tel +1 281 498 1082
Fax +1 281 498 5190

TOCHTERGESELLSCHAFTEN

Dräger Safety Austria Ges.m.b.H

Wallackgasse 8
1230 Wien
Tel +43 1 609 36 02
Fax +43 1 699 62 42

Dräger Safety Schweiz AG

Aegertweg 7
8305 Dietlikon
Tel +41 44 805 82 82
Fax +41 44 805 82 80

Dräger Safety AG & Co. KGaA

Revalstraße 1
23560 Lübeck, Germany
Tel +49 451 882 0
Fax +49 451 882 2080
www.draeger.com