



# **Vorbeugender Explosionsschutz**

## **in Kohlemahlanlagen und bei sekundären Brennstoffen**

---

*Inertisierung – Normen & Regelwerk – Schutzkonzepte*  
*Klärschlamm – Holzpellets – Biomasse – Alternative Brennstoffe*

**Technisches Referenzdokument** Erarbeitet auf Basis von: ATEX 2014/34/EU · ATEX 1999/92/EG · CEN/TR 15281:2022 · TRBS 2152 Teil 2 / TRGS 722 · VdS 2154:2008 · DWA-M 379:2021 · DIN EN ISO 20024:2019 · DIN EN ISO 17225-2:2021 · HDI Risk Engineering Guideline · VDI 2263 · DGUV 113-001 · BetrSichV · GefStoffV

Herausgegeben von: Christian Fink robecco GmbH · Horhausen (Westerwald) · robecco.de

Stand: 05.2026 · Version 6

---

# Inhalt

1	Einleitung, Gefährdungspotenzial und Anwendungsbereich .....	4
	Staubexplosion – das Explosionspentagon .....	4
1.1	Normativer Rahmen .....	5
2	Gefährdungspotenzial und Explosionskenngrößen .....	7
2.1	Kohlestaub .....	7
2.2	Klärschlammstaub .....	7
2.3	Holzpellets und Biomasse.....	8
	Pelletklassen nach DIN EN ISO 17225-2:2021 und sicherheitstechnische Relevanz .....	9
3	Primärer Explosionsschutz durch Inertisierung .....	10
3.1	Grundprinzip und Normenbasis .....	10
3.2	Inertgase: CO <sub>2</sub> vs. N <sub>2</sub> – Auswahlkriterien.....	10
3.3	Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) und MAOC .....	10
3.4	Glutnestbekämpfung (reaktive Inertisierung) .....	11
4	Gasanalytik und Monitoring .....	12
4.1	Notwendigkeit der kontinuierlichen Überwachung .....	12
4.2	Messparameter und Messprinzipien .....	12
4.3	Messpunktanordnung .....	12
5	Anlagenspezifische Schutzkonzepte .....	13
5.1	Kohlemahlanlagen.....	13
	5.1.1 Typischer Anlagenaufbau.....	13
	5.1.2 Anforderungen nach CEN/TR 15281 Anhang F.....	13
	5.1.3 Zoneneinteilung mit und ohne Inertisierung .....	13
5.2	Klärschlamm-trocknungsanlagen .....	13
	5.2.1 Besonderheiten des Brennstoffs .....	13
	5.2.2 Dreistufiges Schutzkonzept (DWA-M 379) .....	14
	5.2.3 CO-Monitoring als Pflichtkomponente .....	14
	5.2.4 Trocknertyp-spezifisches Sicherheitskonzept .....	14
	5.2.5 Selbsterwärmung durch hohe Eisengehalte .....	15
	5.2.6 Methanbildung im Nassschlamm-bunker .....	15
	5.2.7 Abkühlpflicht und sichere Silolagerung getrockneter Schlamm .....	16
5.3	Holzpellets und biogene Festbrennstoffe .....	16
	5.3.1 Gefährdungsübersicht nach DIN EN ISO 20024 .....	16
	5.3.2 Schutzmaßnahmen für Silolagerung.....	16
	5.3.3 Staubmanagement .....	17
	5.3.4 Quantifizierte Inertgasmengen im Brandfall.....	17
6	Betreiberpflichten und Explosionsschutzdokument .....	19
6.1	Rechtliche Grundlage.....	19

---

---

6.2 Pflichtinhalte des Explosionsschutzdokuments.....	19
7 Das robecco-Systemkonzept .....	21
7.1 Drei integrierte Komponenten.....	21
7.2 Ergänzende robecco-Lösungen.....	21
7.3 Normative Abdeckung des robecco-Systems .....	21
8 Inbetriebnahme, Prüfung und Wartung.....	22
8.1 Prüfung vor Inbetriebnahme (§14 BetrSichV).....	22
8.2 Wiederkehrende Prüfungen (§15 BetrSichV) .....	22
8.3 An- und Abfahrprozeduren .....	22
Anfahren.....	22
Abfahren.....	22
9 Quellenverzeichnis und weiterführende Normen .....	23

# 1 Einleitung, Gefährdungspotenzial und Anwendungsbereich

Kohlemahlanlagen, Anlagen zur Verarbeitung und Lagerung von Klärschlamm sowie Biomasse- und Pelletanlagen gehören zu den sicherheitstechnisch anspruchsvollsten industriellen Prozessen. Staubexplosionen, Schwelbrände und toxische Gasansammlungen stellen reale Gefährdungen dar, die bei mangelhafter Schutzkonzeption zu katastrophalen Schäden an Anlage, Umwelt und Menschenleben führen können.

Kohlestaub bildet in Verbindung mit Luft ein hochexplosives Gemisch. Zusätzlich können flüchtige Bestandteile des Kohlestaubes zur Bildung von Schwelgas beitragen. Klärschlammstaub weist ähnliche explosive Eigenschaften auf, jedoch mit deutlich variierenden Kenngrößen je nach Trocknungsgrad und Schlammzusammensetzung. Holzpellets und Biomasse führen zu CO-Ausgasungen und Selbsterhitzungsrisiken, die besondere Schutzmaßnahmen erfordern.

## Staubexplosion – das Explosionspentagon

Das klassische Branddreieck (Brennstoff, Sauerstoff, Zündquelle) beschreibt hinreichende Bedingungen für eine Verbrennung – nicht jedoch für eine Staubexplosion. Für eine Staubexplosion sind fünf gleichzeitig wirkende Faktoren erforderlich, die als Explosionspentagon dargestellt werden:

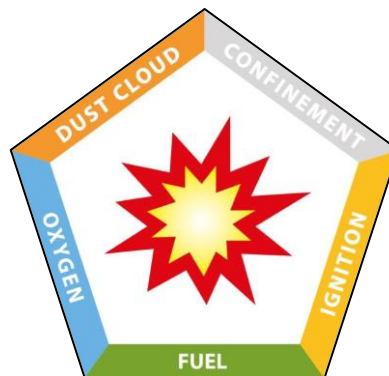


Abb.: Das Explosionspentagon – fünf notwendige Bedingungen für eine Staubexplosion

Faktor	Erläuterung
Fuel (Brennstoff)	Brennbarer Staub in ausreichender Konzentration (z. B. Kohle-, Klärschlamm-, Holzstaub)
Oxygen (Sauerstoff)	Ausreichender O <sub>2</sub> -Gehalt – bei organischen Stäuben typisch > 10–16 Vol-% (SGK-abhängig)
Ignition (Zündquelle)	Wirksame Zündquelle: heiße Oberflächen, Funken, elektrostatische Entladung, Glimmnester
Dust Cloud (Staubwolke)	Aufgewirbelter Staub in explosionsfähiger Konzentration (oberhalb der UEG)
Confinement (Einschließung)	Geschlossenes oder teilweise eingeschlossenes Volumen (Mühle, Silo, Filter, Trockner)

Die Inertisierung ist der einzige primäre Schutzansatz, der durch Absenkung des Sauerstoffgehalts unter die SGK den Faktor Sauerstoff dauerhaft aus dem Explosionspentagon entfernt und damit die Staubexplosion im Kern der Anlage verhindert.

**Zentraler Grundsatz**

Die wirksamste Maßnahme gegen Staubexplosionen ist es, die explosive Atmosphäre selbst zu verhindern.

Inertisierung mit CO<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub> ist der einzige primäre Schutzansatz, der das Entstehen einer explosionsfähigen Atmosphäre im Kern der Anlage dauerhaft verhindert – und damit sämtliche nachgelagerten Schutzmaßnahmen entlastet.

Dieses Dokument beschreibt den Stand der Technik für den vorbeugenden – also primären – Explosionsschutz in diesen Anlagenklassen. Es richtet sich an Betreiber, Planer und Sicherheitsverantwortliche, die ihre Compliancepflichten nach BetrSichV und GefStoffV erfüllen und die normativen Anforderungen von ATEX, CEN/TR 15281, DWA-M 379 und ISO 20024 praxisnah umsetzen müssen.

**1.1 Normativer Rahmen**

Die nachfolgende Tabelle zeigt die normativen Grundlagen dieses Dokuments und ihre Relevanz für die behandelten Anlagentypen.

Dokument	Titel	Relevanz für dieses Dokument
ATEX 2014/34/EU	ATEX-Produktrichtlinie – Geräte und Schutzsysteme in ex-gefährdeten Bereichen	Kennzeichnung und Kategorisierung aller Betriebsmittel in Zonen 0/1/2 und 20/21/22
ATEX 1999/92/EG	ATEX-Betriebsrichtlinie – Mindestvorschriften für Betreiber	Grundlage für Zoneneinteilung, Explosionsschutzdokument (§6 GefStoffV), Betreiberpflichten
CEN/TR 15281:2022	Leitsätze für die Inertisierung zum Explosionsschutz (DIN-Fassung März 2024)	Schlüsseldokument für Inertisierungskonzepte; Anhang F: Kohlemahlanlagen; robecco RSC als Praxisreferenz zitiert
TRBS 2152 T.2 / TRGS 722	Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre	Inertisierung als primäre Maßnahme; Zoneneinteilung und -reduktion durch Inertisierung (§6–8), partielle Inertisierung
VdS 2154:2008	Inertisierung von Silos im Brandfall	Reaktive Siloeinspeisung; Grenzwerte O <sub>2</sub> < 8 Vol-% / 4–6 Vol-% zur Brandbekämpfung
DWA-M 379:2021	Klärschlamm-trocknung – vollständige Ausgabe Juni 2021	Sicherheitskonzepte je Trocknungsverfahren; Eisengehalt-Selbstentzündung; Methanbildung Nassschlambunker; Silobetrieb
DIN EN ISO 20024:2019	Sicherer Umgang und Lagerung von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen	Ausgasung CO/CO <sub>2</sub> , Selbstentzündung, Staubexplosion, Sauerstoffarmut bei Pelletlagern; Inertgasmengen
DIN EN ISO 17225-2:2021	Biogene Festbrennstoffe – Klassifizierung von Holzpellets	Qualitätsklassen A1/A2/B (gewerblich) und I1/I2/I3 (industriell); Feinanteil als sicherheitsrelevanter Parameter für Gefährdungsbeurteilung
HDI Risk Engineering Guideline (2023)	Brandschutz und Brandbekämpfung in Silo- und Bunkeranlagen	Quantifizierte Inertgasmengen; CO <sub>2</sub> -Elektrostatik-Warnung; Löscherfolgskriterium CO < 30 ppm
VDI 2263 Blatt 1/2	Staubbrände und -explosionen; Inertisierung	Kenngößen SGK, KSt, Pmax; SGK-Tabellenwerte je Stoff

Dokument	Titel	Relevanz für dieses Dokument
BetrSichV / GefStoffV	Betriebssicherheitsverordnung; Gefahrstoffverordnung	§3/§15 BetrSichV (Gefährdungsbeurteilung, ZÜS-Prüfung); §6 GefStoffV (Explosionsschutzdokument)
DGUV Regel 113-001	Explosionsschutz-Regeln (EX-RL), Dez. 2022	Zonenbeispielsammlung; Betreiberpflichten; Hinweise zu Normalbetrieb und Zoneneinteilung
TRGS 727	Vermeidung von Zündgefahren durch elektrostatische Aufladungen	Erdung, Potenzialausgleich, Schutzmaßnahmen an Förderanlagen und Silos

## 2 Gefährdungspotenzial und Explosionskenngößen

### 2.1 Kohlestaub

Kohlestaub ist der klassische Ausgangsstoff für Staubexplosionen in Mahlanlagen. Die Explosionsgefährlichkeit hängt entscheidend von der Flüchtigkeit (VM, Volatile Matter) des Kohletyps ab: Je höher der Flüchtigengehalt, desto niedriger die Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) und desto gefährlicher das Verhalten im Brandfall.

Kohletyp	Flüchtige (VM)	SGK (O <sub>2</sub> -Grenze)	KSt-Wert (typisch)	Explosionsgefährdung
Anthrazit	< 10 %	ca. 16 Vol-%	80–100 bar·m/s	hoch
Fettkohle	15–25 %	12–14 Vol-%	100–130 bar·m/s	sehr hoch
Flammkohle / Subbituminös	25–40 %	10–12 Vol-%	100–150 bar·m/s	sehr hoch
Braunkohle (Lignit)	> 40 %	< 10 Vol-%	150–200 bar·m/s	extrem hoch
Petcoke	variable	8–12 Vol-%	150–200 bar·m/s	sehr hoch

#### Hinweis zur SGK-Bestimmung

Die Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) muss für jeden eingesetzten Kohletyp – und bei Brennstoffwechsel erneut – durch akkreditierte Prüfung nach EN 14034-4 bestimmt werden. Die in der Tabelle genannten Werte sind Orientierungswerte.

Der Betreiber ist für die anlagenspezifische SGK-Festlegung verantwortlich.

### 2.2 Klärschlammstaub

Klärschlamm Trocknung erzeugt einen Staub, der eine Kombination aus organischen Bestandteilen, residualen Fetten und biogenen Verbindungen enthält. Nach DWA-M 379 sind folgende Kenngrößen maßgebend:

Parameter	Wert / Bemerkung
Staubexplosionsklasse	ST-1 (KSt 80–150 bar·m/s) – je nach Trocknungsgrad
KSt-Wert	80–150 bar·m/s
P <sub>max</sub>	7–9 bar
Untere Explosionsgrenze (UEG)	30–60 g/m <sup>3</sup>
Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)	6,5–12,5 Vol-% O <sub>2</sub> (stark prozessabhängig)
Mindestzündenergie (MZE)	100–1.000 mJ (vergleichsweise hoch)
Mindestzündtemperatur Staubwolke	ca. 260–420 °C (DWA-M 379)
Mindestzündtemperatur ruhender Staub	ca. 360 °C (DWA-M 379)
Mindestzündtemperatur Staubschicht (5 mm)	ca. 145 °C – kritisch für heiße Oberflächen

### Besonderheit Klärschlamm

Der Trocknungsgrad des Klärschlammes beeinflusst die Explosionskenngrößen erheblich. Nassmasse mit > 50 % Wassergehalt ist nicht explosionsfähig; bei Restfeuchten unter 15 % nimmt die Explosionsgefahr deutlich zu.

CO-Monitoring ab dem Trockner ist daher bereits bei niedrigen Trocknungsgraden essentiell.

Zusätzlich zu den Explosionskenngrößen definiert DWA-M 379 spezifische Sicherheitsanforderungen für die Lagerung und Handhabung:

- Inertisierung ist eine Maßnahme des primären Explosionsschutzes und bei Klärschlamm-trocknungsanlagen mit Volltrocknung (> 45 % TR) zwingend erforderlich.
- Temperaturen über 50 °C bei der Lagerung über mehrere Stunden oder Tage sind zu vermeiden – insbesondere bei Schlämmen mit erhöhtem Eisengehalt (Selbsterwärmungsrisiko).
- Für Siloanlagen mit einem Volumen > 100 m<sup>3</sup> empfiehlt DWA-M 379 eine stationäre Inertgasversorgung vor Ort (Flüssigtank mit Verdampfer oder Flaschenbündel), da im Brandfall keine ausreichende Reaktionszeit für die Anlieferung mobiler Einheiten besteht.

## 2.3 Holzpellets und Biomasse

Pellets aus biogenen Festbrennstoffen (Holzpellets, Agropellets, Miscanthus, Stroh, Reisschalen) weisen gegenüber Kohle ein weiteres, spezifisches Gefährdungsprofil auf, das im DIN EN ISO 20024:2019 umfassend beschrieben wird:

Gefährdung	Beschreibung
Staubexplosion	Holzstaub < 500 µm ist explosiv; KSt-Werte 100–200 bar·m/s; UEG ca. 20–50 g/m <sup>3</sup>
Selbsterhitzung / Schwelbrand	Exotherme biologische und chemische Oxidationsprozesse – besonders kurz nach Herstellung oder bei erhöhtem Wassergehalt
CO-Ausgasung	Pellets setzen bereits bei Raumtemperatur Kohlenstoffmonoxid frei; in geschlossenen Räumen lebensgefährliche Konzentrationen möglich
CO <sub>2</sub> -Ausgasung	Gleichzeitig mit CO: Sauerstoffverdrängung in abgeschlossenen Lagerräumen (Erstickungsgefahr)
Sauerstoffarmut	O <sub>2</sub> -Gehalt in Silokopfräumen kann < 10 Vol-% sinken – tödlich ohne Atemschutz
Selbstzündung Staubschicht	Staubschichten auf heißen Oberflächen können unterhalb der MIT (Mindestzündtemperatur) entzünden

### Warnung: CO-Vergiftungsgefahr in Pelletlagern

Bereits bei Holzpellets im Lager ohne sichtbare Anzeichen von Selbsterhitzung können CO-Konzentrationen > 1.000 ppm auftreten.

Der MAK-Wert für CO beträgt 20 ppm (8-Std.-Wert). Das Betreten geschlossener Pelletlager ohne persönliches CO/O<sub>2</sub>-Messgerät und Atemschutzbereitschaft ist lebensgefährlich (DIN EN ISO 20024, Abschnitt 7.6).

**Pelletklassen nach DIN EN ISO 17225-2:2021 und sicherheitstechnische Relevanz**

Die Norm definiert sechs Qualitätsklassen: A1, A2, B für gewerbliche/häusliche Nutzung sowie I1, I2, I3 für industrielle Anwendungen. Für die Gefährdungsbeurteilung und Zoneneinteilung sind folgende Parameter sicherheitsrelevant:

Parameter	A1 / A2	I1	I2	I3	Relevanz Explosionsschutz
Wassergehalt M	≤ 10 %	≤ 10 %	≤ 10 %	≤ 10 %	Trockene Pellets (< 10 %) sind staubexplosionsgefährlich
<b>Feinanteil F (&lt; 3,15 mm)</b>	<b>≤ 1 %</b>	<b>≤ 4 %</b>	<b>≤ 5 %</b>	<b>≤ 6 %</b>	<b>Kritisch:</b> Höherer Feinanteil = mehr explosionsfähiger Staub
Mechanische Festigkeit DU	≥ 97,5–98 %	≥ 97,5 %	≥ 97,0 %	≥ 96,5 %	Geringere Festigkeit → mehr Abrieb bei Förderung → mehr Feinstaub
Schüttdichte BD	600–750 kg/m <sup>3</sup>	≥ 600 kg/m <sup>3</sup>	≥ 600 kg/m <sup>3</sup>	≥ 600 kg/m <sup>3</sup>	Relevant für Berechnung der Inertgasmengen (Schüttungsvolumen)

**Hinweis zu Industriepellets (I2/I3)**

Beim Einsatz von Industriepellets der Klasse I2 oder I3 mit einem zulässigen Feinanteil von bis zu 5–6 % ist gegenüber Pellets der Klasse A1 (max. 1 % Feinanteil) mit einer deutlich erhöhten Staubexplosionsgefahr zu rechnen.

Schutzkonzept, Entstaubung und Reinigungsintervalle sind entsprechend anzupassen.

Die Pelletklasse muss im Explosionsschutzdokument dokumentiert sein.

(DIN EN ISO 17225-2:2021, Tabellen 1 und 2)

## 3 Primärer Explosionsschutz durch Inertisierung

### 3.1 Grundprinzip und Normenbasis

Die Inertisierung ist nach CEN/TR 15281:2022 und TRBS 2152 Teil 2 / TRGS 722 die wirksamste primäre Maßnahme zur Verhinderung explosionsfähiger Atmosphäre in Staubverarbeitungsanlagen. Durch Absenkung des Sauerstoffgehalts unter die Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) wird jede zündfähige Atmosphäre im Inneren der Anlage dauerhaft verhindert.

#### CEN/TR 15281:2022 – Stand der Technik

Die DIN CEN/TR 15281:2022 (Deutsche Fassung März 2024) zitiert das robecco Secure Center (RSC) ausdrücklich als SPS-Praxisdarstellung einer Kohlenmühlen-Inertisierungsanlage. Dies belegt, dass robecco-Systeme dem normativen Stand der Technik entsprechen.

### 3.2 Inertgase: CO<sub>2</sub> vs. N<sub>2</sub> – Auswahlkriterien

Inertgas	Vorteile	Nachteile / Besonderheiten
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	Höhere Inertisierungswirkung; geringerer Verbrauch je m <sup>3</sup> Anlage	Reaktion mit alkalischen Stäuben möglich; Erstickungsgefahr bei Leckagen; nicht für alle Materialien geeignet (Vereisung des Verdampfers bei hohem Durchfluss durch Auskondensieren von Luftfeuchtigkeit)
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	Chemisch inert gegenüber allen Brennstoffen; geringeres Gefährdungspotenzial für Personal	Höherer Verbrauch; trockene Lagerung der Versorgungseinheit nötig

### 3.3 Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) und MAOC

Der MAOC-Wert (Maximum Allowable Oxygen Content) ist der operativ einzuhaltende Alarmpegel. Er liegt definitionsgemäß unterhalb der SGK und berücksichtigt Messungenauigkeiten, Ansprechzeiten des Monitoring-Systems und Sicherheitszuschläge nach CEN/TR 15281.

Begriff	Definition	Maßnahme / Bemerkung
SGK	Sauerstoffgrenzkonzentration	Messwert aus Prüfung nach EN 14034-4; brennstoffspezifisch
MAOC	Maximum Allowable Oxygen Content	SGK minus Sicherheitszuschlag (mind. 1 Vol-% unter SGK); operativer Alarmpegel
Alarm 1 (Frühwarnung)	MAOC + Toleranz	Erhöhte Aufmerksamkeit; Überprüfung des Inertgassystems
Alarm 2 (Warnung)	MAOC	Automatische Inertgaseinspeisung erhöhen; Betriebsführer alarmieren
Alarm 3 (Abschaltung)	SGK – 0,5 Vol-%	Automatisches Abfahren der Anlage; Personenwarnung
Brandfall: O <sub>2</sub> -Ziel	< 4–6 Vol-%	Gezieltes Absenken zur Glutnestbekämpfung (VdS 2154); mehrere Stunden halten

### 3.4 Glutnestbekämpfung (reaktive Inertisierung)

Schwelbrände im Inneren von Mühlen, Silos oder Filtern erfordern ein gezieltes Absenken des Sauerstoffgehalts weit unter die SGK. Nach VdS 2154 und CEN/TR 15281 gilt:

- Ziel-O<sub>2</sub>: 2–3 Vol-% – deutlich unter SGK
- Haltezeit: mehrere Stunden bis Tage, bis Temperaturen normalisiert sind
- Wiederholungen: typisch 3–4 Inertisierungszyklen erforderlich
- Gleichzeitig CO-Monitoring als Freigabekriterium für Wiederanfahren
- Bei Silos: Inertgaseinspeisung vom Fuß (CEN/TR 15281); bei Staubexplosionsgefahr zuerst Kopf, dann Fuß (VdS 2154)

#### **Achtung: CO<sub>2</sub>-Feuerlöschsysteme in Silos**

Konventionelle CO<sub>2</sub>-Feuerlöschsysteme speisen flüssiges CO<sub>2</sub> direkt ein. Beim Entspannen durch die Düse fällt der Druck unter den Tripelpunkt (5,18 bar / –56,6 °C) – die Flüssigkeit sublimiert zu CO<sub>2</sub>-Eiskristallen (Trockeneis).

Diese Eiskristalle bauen elektrostatische Aufladungen auf, die sich als Funken entladen und die entflammbaren Pyrolysegase im Silokopfraum entzünden können.

robecco-Systeme sind davon nicht betroffen: CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> werden ausschließlich nach Verdampfung, bzw. aus der Gasphase des Lagertank gasförmig eingespeist – der beschriebene Phasenübergang tritt dabei nicht auf.

Quellen: ISO 20024 D.2.3.2; Hedlund 2018; HDI Risk Engineering Guideline 2023

## 4 Gasanalytik und Monitoring

### 4.1 Notwendigkeit der kontinuierlichen Überwachung

Gemäß CEN/TR 15281:2022, TRBS 2152 Teil 2 und DWA-M 379 ist eine kontinuierliche Überwachung der sicherheitskritischen Messgrößen zwingend. Punktuelle Handmessungen sind für die prozesskritische Überwachung unzureichend, da Glutnester und Sauerstoffanomalien rasch und ohne Vorwarnung entstehen können.

### 4.2 Messparameter und Messprinzipien

Parameter	Messprinzip	Bedeutung / Einsatz
O <sub>2</sub> – Sauerstoff	Elektrochemisch oder paramagnetisch	Primärparameter für Inertisierungsnachweis; SGK-/MAOC-Überwachung
CO – Kohlenstoffmonoxid	Infrarot (NDIR)	Frühindikator für Schwelbrand und exotherme Reaktion; obligatorisch bei Pellets und Klärschlamm
CO <sub>2</sub> – Kohlendioxid	Infrarot (NDIR)	Ergänzend bei Pelletlagern zur Sauerstoffverdrängungsbewertung
CH <sub>4</sub> – Methan	Infrarot (NDIR) oder Katalytisch	Relevant bei Biomasse und Klärschlamm; Pflicht im Nassschlamm bunker (UEG CH <sub>4</sub> = 4,4 Vol-%)
Temperatur	Thermoelemente / PT100	Glutnesterkennung; Pflicht nach DWA-M 379 und ISO 20024
Staubgehalt	Optisch / Streulicht	Prozessüberwachung; Leckagedetektion im Förderbereich

#### Wichtig: CO-Messung allein ist nicht ausreichend

CO-Monitoring zeigt Schwelbrände an, kann aber die Sauerstoffmessung nicht ersetzen.

Nur die Kombination O<sub>2</sub> + CO (+ ggf. CH<sub>4</sub> bei Biomasse und Klärschlamm) erlaubt eine vollständige Sicherheitsbewertung (CEN/TR 15281, Abschnitt 4.4.5.2).

### 4.3 Messpunktanordnung

Die Anordnung der Messpunkte muss die tatsächlichen Gasbewegungen in der Anlage berücksichtigen:

- Mühle: Messpunkte Eingang und Ausgang (vor Filter) CO und O<sub>2</sub>
- Filter: CO und O<sub>2</sub> vor und nach Filter zum Nachweis der Inertisierungswirkung
- Siloköpfe: CO und O<sub>2</sub> im Freiraum über dem Lagergut
- Förderabgänge: Temperaturmessung und CO und O<sub>2</sub> an Übergabestellen
- Klärschlamm Trockner: Temperatur im Trockner + CO und O<sub>2</sub> am Abluftstrom
- Pelletlager: CO und O<sub>2</sub> im Freiraum über dem Lagergut

## 5 Anlagenspezifische Schutzkonzepte

### 5.1 Kohlemahlanlagen

#### 5.1.1 Typischer Anlagenaufbau

Eine Kohlemahlanlage besteht typischerweise aus Kohleaufgabe, Kohlenmühle (Walzenschüsselmühle oder Kugelmühle), Siebter, Kohlefilter, Kohlebunker und Brennstoffzufuhr. Alle diese Komponenten bilden ein abgeschlossenes System, das als Gesamtheit inertisiert werden muss.

#### 5.1.2 Anforderungen nach CEN/TR 15281 Anhang F

Für Kohlenmühlenanlagen schreibt CEN/TR 15281:2022, Anhang F, folgende Mindestanforderungen fest:

- Kontinuierliche O<sub>2</sub>-Messung an allen sicherheitskritischen Punkten
- MAOC-Alarmpegel mit automatischer Inertgasnachspeisung
- Automatische Anlagenabschaltung bei Erreichen der SGK
- CO-Monitoring als Ergänzungsparameter für Frühbranderkennung
- SPS-Steuerung mit USV (bei Stromausfall sicher)
- Redundante Gasanalyse an kritischen Stellen
- Dokumentierte An- und Abfahrprozeduren mit Inertisierungsverriegelung

#### 5.1.3 Zoneneinteilung mit und ohne Inertisierung

Die folgende Tabelle zeigt die nach TRBS 2152 Teil 2, §6–8 mögliche Zonenreduktion durch Inertisierung:

Bereich / Zustand	Zone ohne Inertisierung	Zone mit Inertisierung	Reduktion
Inneres Mühle / Filter (ohne Inertisierung)	Zone 20	Zone 20	—
Inneres Mühle / Filter (mit einfacher Inertisierung + Abfahren bei Ausfall)	Zone 20	Zone 21	-1 Stufe
Inneres Mühle / Filter (mit Inertisierung bei 1 vorhersehbarem Fehler)	Zone 20	Zone 22	-2 Stufen
Inneres Mühle / Filter (mit Inertisierung bei 2 unabh. Fehlern)	Zone 20	kein ex-Bereich	-3 Stufen
Nahbereich Mühle (ohne Inertisierung)	Zone 21	Zone 21	—
Nahbereich Mühle (mit Inertisierung + Abfahren)	Zone 21	Zone 22	-1 Stufe

### 5.2 Klärschlamm-trocknungsanlagen

#### 5.2.1 Besonderheiten des Brennstoffs

Klärschlamm weist im Vergleich zu Kohle einige sicherheitstechnisch relevante Besonderheiten auf, die das Schutzkonzept nach DWA-M 379 beeinflussen:

- Stark schwankende Wasserhaltigkeit → variierende Explosionskenngrößen
- Hoher Anteil an biologisch abbaubaren Substanzen → anaerobe Gasbildung (CH<sub>4</sub>) bei feuchtem Schlamm
- Thermische Trockner (Scheibentrockner, Bandtrockner, Wirbelschicht) als primäre Zündquellengefahr
- Trockenrückstand mit SGK-Werten von 6,5–12,5 Vol-% → vergleichbar gefährlich wie Kohle

### 5.2.2 Dreistufiges Schutzkonzept (DWA-M 379)

Das Schutzkonzept nach DWA-M 379 folgt der ATEX-Logik in drei Stufen:

Stufe	Ziel	Maßnahmen
1. Primärer Schutz	Vermeidung explosionsfähiger Atmosphäre	Inertisierung der Trockenkammer; CO-Monitoring im Brüdenstrom; Prozessführung mit Grenzwertüberwachung
2. Sekundärer Schutz	Vermeidung von Zündquellen	ATEX-gerechte Betriebsmittel in allen Zonen; Erdung und Potenzialausgleich; Temperaturkontrolle heißer Oberflächen (< 145 °C bei 5 mm Staubschicht)
3. Tertiärer Schutz	Begrenzung der Auswirkungen	Explosionsdruckstoßfeste Bauweise; Druckentlastungsöffnungen; Entkopplungssysteme zwischen Trockner und Silo

### 5.2.3 CO-Monitoring als Pflichtkomponente

Das CO-Monitoring ist in Klärschlamm-trocknungsanlagen nach DWA-M 379 verpflichtend und muss folgende Alarmschwellen umfassen:

- Frühwarnpegel (typisch 25–50 ppm CO): Erhöhte Aufmerksamkeit, Sichtprüfung
- Warnschwelle (typisch 100–200 ppm CO): Automatische Anlagenreaktion, Führung informieren
- Abschaltschwelle (typisch 500 ppm CO): Notabschaltung des Trockners, Inertgaseinspeisung

### 5.2.4 Trocknertyp-spezifisches Sicherheitskonzept

Die DWA-M 379 (vollständige Ausgabe 2021) differenziert das Sicherheitskonzept explizit nach dem eingesetzten Trocknungsverfahren:

Trocknungsverfahren / -grad	Sicherheitstechnische Anforderung
Scheibentrockner – Teiltrocknung (bis 45 % TR)	Im Trocknungsinneren wird in der Regel keine Zone ausgewiesen: Bei diesem Trocknungsgrad entsteht kein Staub, und der hohe Wasserdampfgehalt der Brüden wirkt inertisierend. Pflicht: Brüdenabzugsventilator muss nachlaufen (redundant, mit Funktionsüberwachung); bei längerem Stillstand Trockner entleeren.
Scheibentrockner – Volltrocknung (> 45 % TR)	Inertgasbetrieb mit N <sub>2</sub> zwingend erforderlich. O <sub>2</sub> -Messung, N <sub>2</sub> -Anschlüsse an mehreren Positionen. Zusätzlich CO-Messung nach dem Kondensator. Wassereindüsung bei erhöhten CO-Werten aktivieren. An- und Abfahrprozedur dokumentationspflichtig.
Bandtrockner / Wirbelschichttrockner	Anfahrinertisierung notwendig. Vor Inbetriebnahme Inertgasbedingungen herstellen und bestätigen. Trockengut vor Einlagerung auf < 50 °C kühlen (Kühlschnecke erforderlich).
Trommeltrockner	Anfahrinertisierung notwendig (Rückmischung erforderlich). Inertgasüberwachung gemäß dreistufigem Konzept.
Solar- / Hallentrockner (NT-Trocknung)	Kein Inertgasbetrieb im Normalbetrieb erforderlich. Mindest-Luftwechsel 10-fach/h bei Betreten; persönliches CO-/O <sub>2</sub> -Messgerät beim Betreten Pflicht wegen H <sub>2</sub> S- und NH <sub>3</sub> -Ausgasung.

#### Hinweis zu Zonenausweisungen

Bei Teiltrocknung (bis 45 % TR) im Scheibentrockner kann auf eine Zonenausweisung im Inneren verzichtet werden, sofern der Brüdenabzug sichergestellt ist. Bei Volltrocknung ist das Trocknungsinnere als Zone 20 einzustufen – und durch Inertisierung auf Zone 21 oder 22 reduzierbar (DWA-M 379:2021, Abschnitt 5.2.1.3).

### 5.2.5 Selbsterwärmung durch hohe Eisengehalte

Vollgetrockneter Klärschlamm gilt im Normalfall als weitgehend stabil gegen Selbstentzündung – jedoch mit einer wichtigen Ausnahme, die in der DWA-M 379:2021 explizit beschrieben wird:

Schlämme mit Eisengehalten von mehr als 5–12 % des Trockenrückstands können auch nach Volltrocknung zu exothermen Reaktionen neigen. Eisen agiert dabei als Katalysator und unterliegt selbst leichter Oxidation. Hohe Eisengehalte entstehen durch Eisenzugaben während der Abwasserbehandlung (Phosphatfällung).

Besonderes Risiko besteht bei Schlämmen, die unter niedrigem Sauerstoffgehalt im Trocknungsgas getrocknet wurden: Eisensulfidverbindungen reagieren beim Kontakt mit Luftsauerstoff exotherm. Zusätzlich beginnen sich Eisenphosphatverbindungen ab 75 °C zu zersetzen und Energie freizusetzen.

- Kritische Grenztemperatur: Getrockneter Klärschlamm darf nicht über mehrere Stunden auf Temperaturen > 50 °C erwärmt und gehalten werden
- Isolierungswirkung des Schüttguts: Da getrockneter Klärschlamm wie Isoliermaterial wirkt, kann sich im geschlossenen Silo bei minimalen Wärmeverlusten eine Selbstentzündung entwickeln
- Maßnahme: Regelmäßige Temperaturüberwachung mit Tiefensensoren; CO-Monitoring am Silokopf; stationäre N<sub>2</sub>-Versorgung vor Ort empfohlen

#### Praxishinweis Eisengehalt

Bei Anlagen, die Eisensalze zur Phosphatfällung einsetzen (häufig in kommunalen Kläranlagen), sollte der Eisengehalt des Trockenrückstands regelmäßig bestimmt werden. Liegt er über 5 % TR, ist eine erhöhte Selbsterwärmungsüberwachung anzuordnen (DWA-M 379:2021, Abschnitt 8.5.3).

### 5.2.6 Methanbildung im Nassschlamm bunker

Nassschlamm bunker und Annahmehunker für entwässerten Schlamm stellen eine eigenständige Explosionsgefahr durch Methanbildung dar, die gesondert zu betrachten ist:

Bei der Zwischenlagerung von entwässertem Schlamm in Bunkern können anaerobe Prozesse zur Methanentwicklung führen. Im ungünstigsten Fall ist eine Methanproduktion von 0,7 l/(kg oTR · h) anzunehmen (VGB M 116). Da Methan nicht in Wäschern, Biofiltern oder Aktivkohlefiltern abgebaut werden kann, muss es gezielt abgeführt werden.

- Pflicht: Kontinuierliche Absaugung des Bunkers – Methankonzentration unter 40 % der UEG halten (UEG CH<sub>4</sub> = 4,4 Vol-% bei 20 °C)
- Bei Ausfall des Absaugventilators: Bunkerdeckel manuell hochfahren (natürliche Entlüftung als Notfallmaßnahme)
- Der Betreiber ist verpflichtet, die Absaugung auch bei Stillstand der Trocknungsanlage zu betreiben oder den Bunker zu entleeren
- Achtung: In Kellerbereichen mit Annahmehunkern kann sich H<sub>2</sub>S aus länger gelagertem Schlamm entwickeln und in Kellerräume diffundieren – Grenzwert H<sub>2</sub>S: 5 ppm AGW (TRGS 900)

#### Dimensionierungshinweis

Die erforderliche Aspirationsluftmenge ist in Abstimmung mit der maximalen Methanemission zu berechnen. Als Richtwert gilt ein Mehrfaches des leeren Bunkervolumens pro Stunde. CH<sub>4</sub>-Monitoring als Ergänzung zur Absaugüberwachung empfohlen (DWA-M 379:2021, Abschnitt 8.2).

### 5.2.7 Abkühlpflicht und sichere Silolagerung getrockneter Schlamm

Für die Einlagerung und den Betrieb von Trockgutsilos gelten nach DWA-M 379:2021 folgende konkrete betriebliche Anforderungen:

- Abkühlpflicht: Vollgetrockneter Schlamm muss vor Einlagerung auf unter 50 °C gekühlt werden – z. B. über Kühlschnecke, Fließbettkühler oder Schüttgutkühler
- Lagerungsfrequenz: Silos ein- bis zweimal pro Woche entleeren, um Wärmeakkumulation zu verhindern
- Silobauweise: Zylindrische Silos möglichst luftdicht ausführen; Entlüftung über selbst-abreinigenden Filter
- Kondensationsschutz: Wasserdampfkondensation an Silowänden verhindern (Siloisolierung, elektrische Konusbeheizung)
- Sicherheitsausrüstung Mindestausrüstung: Inertgasanschluss (N<sub>2</sub>), Temperatursensoren, CO-Messung am Silodach
- Bei Glimmbrand (CO-Anstieg oder Temperaturanstieg): Entleerung nur nach vorhergehender Inertisierung über N<sub>2</sub> – um Entzündung des beim Glimmbrand gebildeten CO zu verhindern

## 5.3 Holzpellets und biogene Festbrennstoffe

### 5.3.1 Gefährdungsübersicht nach DIN EN ISO 20024

Der DIN EN ISO 20024:2019 identifiziert folgende Hauptgefährdungen bei der gewerblichen Handhabung und Lagerung von Pellets:

Gefährdung	Einstufung	Ursache / Hinweis
Staubexplosion	Hoch	Holzstaub < 500 µm; KSt 100–200 bar·m/s; Zündung durch Funken, heiße Oberflächen, Elektrostatik
Selbsterhitzung / Schwelbrand	Hoch	Exotherme Oxidation; besonders bei frisch hergestellten Pellets oder erhöhtem Wassergehalt
CO-Ausgasung / Vergiftung	Sehr hoch	Auch bei Raumtemperatur > 1.000 ppm CO möglich; ohne CO-Messgerät lebensgefährlich beim Betreten geschlossener Räume
Sauerstoffarmut (Erstickung)	Sehr hoch	O <sub>2</sub> in Silokopfräumen kann auf < 10 Vol-% sinken; ohne Atemschutz tödlich
Lawinen / Verschüttung	Mittel	Hohe Fließfähigkeit; Brücken- und Rattenlochbildung in Silos; Verschüttungsgefahr bei Betreten
Brandübertragung	Mittel	Schwelendes Material in Förderanlagen; Funken durch Reibung und Abrieb

### 5.3.2 Schutzmaßnahmen für Silolagerung

Für die Lagerung in Silos und Bunkern gelten nach DIN EN ISO 20024 folgende Mindestmaßnahmen:

- Kontinuierliche CO- und O<sub>2</sub>-Überwachung im Silokopfbereich
- Temperaturüberwachung im gelagerten Massengut (Tiefensonden)
- Inertisierungsbereitschaft: N<sub>2</sub>-Anschluss am Silofuß und Silokopf
- Notentleerungsmöglichkeit muss konstruktiv vorgesehen sein
- First-In-First-Out-Betrieb zur Vermeidung von Langzeitlagerung und Selbsterhitzung
- Keine Langzeitlagerung > 3–4 Wochen ohne kontinuierliche Überwachung
- Vor Betreten: O<sub>2</sub>-Messung ≥ 18 Vol-% und CO-Messung < 20 ppm; andernfalls Atemschutz Pflicht

### 5.3.3 Staubmanagement

Staubansammlungen sind nach ISO 20024 die häufigste Ursache sekundärer Staubexplosionen und müssen systematisch kontrolliert werden:

- Reinigungsplan mit definierten Intervallen
- Staubschicht > 0,5–1 mm allgemein oder > 3 mm auf > 5 % des Bereichs = potentiell gefährliche Bedingung
- Reinigung ausschließlich mit ATEX-zertifizierten Industriesaugern – kein Druckluftreinigen
- Farbmarkierungen an Ablagerungsflächen als visuelle Reinigungsanzeige empfohlen (ISO 20024, §7.4.2)

### 5.3.4 Quantifizierte Inertgasmengen im Brandfall

Die HDI Risk Engineering Guideline (2023) und die ISO 20024 geben konkrete Richtwerte für die benötigten Inertgasmengen bei der Silobrandbekämpfung. Diese Werte sind für die Dimensionierung stationärer Inertgassysteme und die Bevorratungsplanung maßgebend:

Parameter	Richtwert / Bemerkung
Inertgasmenge Kopfraumbereich	1,0–1,5 m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> (gasförmig) pro m <sup>3</sup> freies Silovolumen → O <sub>2</sub> < 8 Vol-% (keine Staubexplosionsgefahr für organische Stoffe)
Inertgasmenge Schüttungsbereich	0,5–1,0 m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> (gasförmig) pro m <sup>3</sup> Schüttvolumen → O <sub>2</sub> < 2 Vol-% (zur Löschung des Glimmbrands)
Aufgaberate Kopfraum	ca. 300 m <sup>3</sup> /h (bei 1.200 m <sup>3</sup> freiem Kopfraumvolumen)
Aufgaberate Schüttung	ca. 75–150 m <sup>3</sup> /h (langsam, mit wenig Druck – Kanalbildung vermeiden)
Tankzugladung N <sub>2</sub>	Ca. 20.000 kg flüssig = ca. 17.100 m <sup>3</sup> gasförmig (nur erste 3 h direkt gasförmig entnehmbar), danach nur über Verdampfer
Löscherfolgskriterium	CO-Konzentration am Silokopf < 30 ppm, dauernd nach Beendigung der Inertgasaufgabe, mindestens 48 h halten
Gasaufgabe von unten	Langsam und mit wenig Druck, damit Schüttung gleichmäßig durchdrungen wird (keine Kanalbildung)
Ausräumen des Silos	Erst nach bestätigter Brandlöschung (CO < 30 ppm) und unter Inertatmosphäre in Silo UND Fördereinrichtungen

#### Wichtig: Bevorratung vor Ort empfohlen

Da bei einem Silobrand mehrere Stunden bis zum Eintreffen eines Tankfahrzeugs vergehen können, empfiehlt die HDI Guideline die Vorhaltung von Inertgas vor Ort (Flaschenbündel oder Flüssigtank mit Verdampfer). Für ein Silo mit 40 m Höhe und 8 m Durchmesser (ca. 800 m<sup>3</sup> freier Kopfraum) werden ca. 1.200 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> und zusätzlich 600 m<sup>3</sup> für die Schüttung benötigt – entspricht ca. 3.160 kg Stickstoff (HDI Risk Engineering Guideline 2023, Abschnitt 5.1.1).

### Theoretical purging quantity required

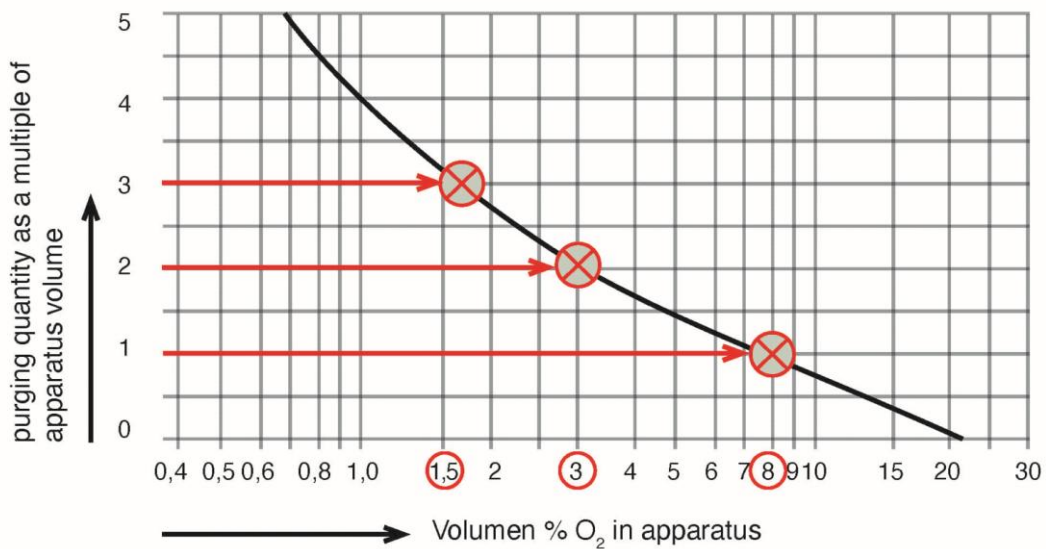


Abb. 1: Theoretisch benötigte Inertgasmenge als Vielfaches des Apparatevolumens in Abhängigkeit vom angestrebten Restsauerstoffgehalt (Quelle: CEN/TR 15281:2022) & ESCIS Heft 3

Das Diagramm verdeutlicht den exponentiell steigenden Inertgasbedarf bei sinkenden O<sub>2</sub>-Zielwerten: Während für eine Absenkung auf 8 Vol-% O<sub>2</sub> (keine Staubexplosionsgefahr bei organischen Stoffen) bereits etwa das 1-fache des freien Apparatevolumens an Inertgas ausreicht, steigt der Bedarf für eine Löschinertisierung auf unter 2 Vol-% O<sub>2</sub> auf das 3-fache und mehr. Diese Werte gelten für eine ideale Durchmischung; in der Praxis – insbesondere bei der Schüttungsdurchdringung von unten – sind zusätzliche Mengen für Verluste durch Undichtigkeiten und unvollständige Durchmischung einzuplanen.

## 6 Betreiberpflichten und Explosionsschutzdokument

### 6.1 Rechtliche Grundlage

Als Betreiber einer Anlage mit explosionsgefährdeten Bereichen sind Sie nach deutschem und europäischem Recht zu folgenden Maßnahmen verpflichtet:

- Gefährdungsbeurteilung nach §3 BetrSichV und §6 GefStoffV
- Erstellung und Aktualisierung des Explosionsschutzdokuments nach §6 Abs. 9 GefStoffV
- Zoneneinteilung und Kennzeichnung nach ATEX 1999/92/EG
- Sicherstellung ATEX-konformer Betriebsmittel in allen Zonen
- Prüfung vor Inbetriebnahme und wiederkehrende Prüfungen nach §14/§15 BetrSichV
- Betriebsanweisungen und Unterweisungen aller Beschäftigten

### 6.2 Pflichtinhalte des Explosionsschutzdokuments

Das Explosionsschutzdokument nach §6 Abs. 9 GefStoffV muss mindestens folgende Inhalte enthalten:

#	Anforderung	Norm/Quelle
1	Angaben zur Anlage und zum Betreiber (Name, Standort, Verantwortlicher, Datum)	§6 GefStoffV
2	Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung mit Auflistung aller brennbaren Stoffe und ihrer Kenngrößen	§3 BetrSichV
3	Zoneneinteilung für alle explosionsgefährdeten Bereiche mit Lageplänen und Begründung	ATEX 1999/92/EG
4	Dreistufiges Schutzmaßnahmenkonzept (primär/sekundär/tertiär) mit Wirksamkeitsnachweis	ATEX 1999/92/EG, TRBS 2152
5	Nachweis der ATEX-Konformität aller Betriebsmittel in Zonen (Kategorie, Kennzeichnung)	ATEX 2014/34/EU
6	Koordinationsmaßnahmen bei Tätigkeit mehrerer Arbeitgeber	ATEX 1999/92/EG Art. 8
7	Prüfnachweise vor Inbetriebnahme; Fristen für wiederkehrende Prüfungen	§14/§15 BetrSichV
8	Betriebsanweisungen für alle Tätigkeiten in ex-gefährdeten Bereichen	§3 BetrSichV
9	Unterweisungsnachweise der Beschäftigten	§14 GefStoffV
10	Datum der Erstellung und Aktualisierungshistorie	§6 GefStoffV
11	Bei Inertisierung: anlagenspezifischer SGK-Wert je Brennstoff	CEN/TR 15281
12	Bei Inertisierung: MAOC-Alarmpegel; Monitoring-Konzept; Redundanznachweise	CEN/TR 15281
13	Bei Inertisierung: dokumentierte An- und Abfahrprozeduren	CEN/TR 15281
14	Bei Pellets/Biomasse: Risikobewertung für CO-Ausgasung und Sauerstoffarmut	ISO 20024
15	Bei Klärschlamm: CO-Monitoring-Konzept; Maximaltemperaturen heißer Oberflächen	DWA-M 379
16	Bei Klärschlamm Volltrocknung: Eisengehalt-Beurteilung; Selbsterwärmungsüberwachung	DWA-M 379:2021

#	Anforderung	Norm/Quelle
17	Bei Nassschlamm-Bunker: CH <sub>4</sub> -Monitoring-Konzept; Aspiration; Ausfallmaßnahmen	DWA-M 379:2021

**robecco unterstützt Sie**

robecco liefert alle technischen Systemdaten (SGK-Basis, MAOC-Einstellungen, Kalibrierprotokolle, Redundanznachweise der RSC-Steuerung), die der Betreiber für die Inertisierungsabschnitte seines Explosionsschutzdokuments benötigt. Die Gefährdungsbeurteilung selbst muss durch eine fachkundige Person unter Einbeziehung der Gesamtanlage erstellt werden.

## 7 Das robecco-Systemkonzept

### 7.1 Drei integrierte Komponenten

Das robecco-System für den vorbeugenden Explosionsschutz besteht aus drei aufeinander abgestimmten Komponenten, die gemeinsam die Anforderungen von CEN/TR 15281, TRBS 2152 und den anlagenspezifischen Normen erfüllen:

Produkt	Funktion	Beschreibung
robecco RSC	Secure Center / SPS-Steuerung	Zentrale Steuerungseinheit; Verarbeitung aller Messsignale; automatische Inertgasregelung; Alarmmanagement; in CEN/TR 15281:2022 als Praxisreferenz zitiert
robecco GAS	Gasanalyzesystem	Kontinuierliche O <sub>2</sub> -, CO-, CO <sub>2</sub> - und CH <sub>4</sub> -Messung; elektrochemische und infrarotbasierte Sensoren; ATEX-zertifizierte Gasentnahmesonden; Filterung und Konditionierung des Messgases
robecco INERT	Inertisierungssystem	CO <sub>2</sub> - und N <sub>2</sub> -Inertisierungsanlagen ggf. mit Verdampfer (gasförmige Einspeisung); Druckminderer, Inertisierungsventile, Düsensysteme, Wägezellen; geeignet für präventive Dauerinertisierung und reaktive Brandfalleinspeisung

### 7.2 Ergänzende robecco-Lösungen

- Brandfrüherkennung: CO-Trend-Monitoring für frühzeitige Glutnesterkennung
- Siloautomatisierung: Vollständige O<sub>2</sub>- und CO-Überwachung nach VdS 2154
- Retrofit: ATEX-Compliance für Bestandsanlagen; Nachrüstung ohne Gesamtaustausch

### 7.3 Normative Abdeckung des robecco-Systems

Norm	Thema	Abdeckung durch robecco
CEN/TR 15281:2022 Anhang F	Kohlenmühlenanlagen	Vollständig · RSC als Praxisreferenz zitiert
TRBS 2152 Teil 2 / TRGS 722	Inertisierung als primäre Maßnahme	Vollständig · Zonenreduktionsnachweis möglich durch partielle Inertisierung
VdS 2154:2008	Siloeinspeisung im Brandfall	Vollständig · INERT-System für reaktive Einspeisung
DWA-M 379:2021	Klärschlamm-trocknung	Vollständig · GAS + RSC für CO-Monitoring und Alarmketten; INERT für Trockner- und Siloinertisierung
DIN EN ISO 20024:2019	Pellets / Biomasse Silo und Förderung	Weitgehend · GAS für CO/O <sub>2</sub> -Überwachung; INERT für Siloeinspeisung gasförmig
HDI Risk Engineering Guideline	Silobrandbekämpfung	Vollständig · INERT-System mit Verdampfer; gasförmige Einspeisung ohne Elektrostatisrisiko
VDI 2263 Blatt 1/2	Kenngrößen und Inertisierung Stäube	Vollständig · SGK-basierte MAOC-Einstellung
ATEX 2014/34/EU	Produktkonformität Betriebsmittel	Vollständig · alle Komponenten ATEX-zertifiziert

---

## 8 Inbetriebnahme, Prüfung und Wartung

### 8.1 Prüfung vor Inbetriebnahme (§14 BetrSichV)

Vor der erstmaligen Inbetriebnahme einer Anlage in explosionsgefährdeten Bereichen ist eine Prüfung durch eine befähigte Person oder zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) erforderlich. Diese Prüfung umfasst:

- Vollständigkeits- und Übereinstimmungsprüfung der Anlage mit dem Explosionsschutzdokument
- Funktionsprüfung aller Schutzeinrichtungen: Gasanalyse, Inertisierungsregelung, Alarmketten
- Dichtheitsprüfung des Inertisierungssystems mit Inertgas
- Nachweis der ATEX-Konformität aller Betriebsmittel in Zonen
- Dokumentation der Prüfergebnisse als Teil des Explosionsschutzdokuments

### 8.2 Wiederkehrende Prüfungen (§15 BetrSichV)

Die Fristen für wiederkehrende Prüfungen legt der Betreiber auf Basis der Gefährdungsbeurteilung fest. Als Orientierung gilt:

- Gasanalysegeräte: Kalibrierung mindestens jährlich, bei kritischen Anlagen halbjährlich
- Inertisierungsventile und -düsen: Funktionsprüfung bei jeder Revision
- SPS-Steuerung (RSC): Überprüfung der Alarmschwellen jährlich
- Zonenkennzeichnung und ATEX-Betriebsmittel: Sichtprüfung halbjährlich
- Tankanlagen (Inertgasversorgung): Wiederkehrende Prüfung nach BetrSichV Anhang 2 Abschnitt 4 (drucktragende Ausrüstung); Prüffristen gemäß Explosionsschutzdokument und ZÜS-Vorgaben festlegen
- Gesamtanlage: ZÜS-Prüfung nach betriebsinternem Prüfintervall (max. alle 3 Jahre empfohlen)

### 8.3 An- und Abfahrprozeduren

An- und Abfahrvorgänge sind die kritischsten Betriebszustände. Die Prozeduren müssen dokumentiert und als Teil der Betriebsanweisung verfügbar sein:

#### Anfahren

- Inertisierungsanlage in Betrieb nehmen; O<sub>2</sub>-Gehalt auf MAOC-Niveau absenken
- O<sub>2</sub>-Gehalt durch Messgerät bestätigen lassen (Freigabe durch RSC)
- CO-Monitoring aktivieren und Nullpunkt bestätigen
- Mühle/Trockner/Förderanlage anfahren
- Laufende O<sub>2</sub>-Überwachung; MAOC-Alarm auf automatische Regelung

#### Abfahren

- Brennstoffzufuhr unterbrechen
- Anlage unter Inertisierungsbedingungen abfahren (O<sub>2</sub> weiter überwacht)
- Warten bis CO-Wert Normalwert und O<sub>2</sub> unter MAOC
- Erst nach vollständiger Abkühlung und stabilem CO-Signal: Inertisierung beenden
- Anlage belüften und für Wartungszugang freigeben (O<sub>2</sub> ≥ 18 Vol-%: Freigabe)

---

## 9 Quellenverzeichnis und weiterführende Normen

### Alle in diesem Dokument zitierten und verwendeten Regelwerke:

- ATEX 2014/34/EU: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen
- ATEX 1999/92/EG: Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können
- DIN CEN/TR 15281:2024-03 (CEN/TR 15281:2022): Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Leitsätze für die Inertisierung zum Explosionsschutz
- TRBS 2152 Teil 2 / TRGS 722 (März 2012): Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, partielle und totale Inertisierung
- VdS 2154:2008: Inertisierung von Silos im Brandfall
- DWA-M 379 (Juni 2021): Klärschlamm-trocknung – vollständige Ausgabe, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DIN EN ISO 20024:2019-03 (prEN ISO 20024:2019): Biogene Festbrennstoffe – Sicherer Umgang und Lagerung von Pellets aus biogenen Festbrennstoffen in kommerziellen und industriellen Anwendungen
- DIN EN ISO 17225-2:2021-09 (EN ISO 17225-2:2021): Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets. Ersetzt DIN EN ISO 17225-2:2014-09
- HDI Risk Consulting, Risk Engineering Guideline: Brandschutz und Brandbekämpfung in Silo- und Bunkeranlagen (April 2023) – erarbeitet unter Mitwirkung des Zentrums für Brand- und Explosionsschutz der DMT GmbH & Co. KG, Dortmund
- VDI 2263 Blatt 1 (2022): Staubbrände und Staubexplosionen – Kenngrößen
- VDI 2263 Blatt 2: Staubbrände und Staubexplosionen – Inertisierung
- BetrSichV: Betriebssicherheitsverordnung in der geltenden Fassung
- GefStoffV: Gefahrstoffverordnung in der geltenden Fassung
- DGUV Regel 113-001 (ehemals BGR 104), Beispielsammlung Explosionsschutz-Regeln (EX-RL), August 2021: Vorbemerkungen und Zonenbeispiele; DGUV Fachbereich Rohstoffe und chemische Industrie
- TRGS 727: Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen
- EN 14034-4: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen – Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration
- EN 16750: Ortsfeste Löschanlagen – Sauerstoffreduktionsanlagen
- E DIN EN 1127-1 (Entwurf Aug. 2025): Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Grundlagen und Methodik
- VGB M 116 (1998): Brand- und Explosionsschutz beim Trocknen und Verbrennen von Klärschlamm
- Hedlund, F.H. (2018): Carbon dioxide not suitable for extinguishment of smouldering silo fires: Static electricity may cause silo explosion, Biomass and Bioenergy 108, p. 113–119

*robecco GmbH · Horhausen (Westerwald) · [www.robecco.de](http://www.robecco.de) · [www.robecco.net](http://www.robecco.net)*

*Im Bereich vorbeugender Explosionsschutz weltweit führend und einzigartig · > 500 Anlagen weltweit*