

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

U. Barth, Dortmund (D)

W. Bartknecht, Freiburg (D)

G. Pellmont, Binningen/Basel (CH)

INHALT

1. VORBEMERKUNGEN	2
2. ANLAGENKURZBESCHREIBUNG	2
3. SICHERHEITSTECHNISCHE KENNGRÖSSEN VON KLÄRSCHLAMM, DIE DAS ZÜND- UND EXPLOSIONSV ERHALTEN BESCHREIBEN	3
4. BEURTEILUNG DER ZÜNDWIRKSAMKEIT MÖGLICHER ZÜNDQUELLEN IN DER TROCKNUNGSANLAGE	5
5. AUSWAHL DER ZU TREFFENDEN SCHUTZMASSNAHMEN GEGEN DAS ENTSTEHEN UND DIE AUSWIRKUNGEN VON STAUBEXPLOSIONEN IN DER TROCKNUNGSANLAGE	8
6. LITERATURHINWEISE	11

ZUSAMMENFASSUNG

Das Auffinden von Glimmnestern und die unsachgemässe Explosionsdruckentlastung einer lösemittelfreien Klärschlamm-Trocknungsanlage in den Betriebsraum veranlassten den Betreiber das Explosionsschutzkonzept zu überprüfen.

Nach einer Kurzbeschreibung der Anlage wird über die sicherheitstechnischen Kenngrössen des verarbeitenden Klärschlammes berichtet. Anschliessend wird die Wirksamkeit der möglichen Zündquellen in der Trocknungsanlage begutachtet, die ganz allgemein als vorhanden anzusehen sind.

Weil die Anwendung des konstruktiven Explosionsschutzes mit einem erhöhten Aufwand verbunden sind, wurde beschlossen, die Trocknungsanlage auf Stickstoff-Inertisierung umzustellen. Weil die Sauerstoffgrenzkonzentration von Glimmnestern deutlich niedriger ist, als diejenige der anderen üblichen Zündquellen, wurde die Anlage bezüglich des einzuhaltenden Sauerstoffwertes in Stickstoff zweigeteilt.

Abschliessend werden einige wichtige Hinweise gegeben, die bei Anwendung der Schutzmassnahme "Inertisierung mit Stickstoff" zu beachten sind.

1. VORBEMERKUNGEN

In einer im Jahre 1983 errichteten **Scheibentrocknungsanlage für Klärschlamm (lösemittelfrei)** wurden im Verlauf der Jahre **Glimmnester** aufgefunden. Weil aufgrund experimenteller Untersuchungen /1/ bereits geringe Glimmnestoberflächen **als wirksame Zündquellen in Staub/Luft-Gemischen** (Abb.1) anzusehen und daher Staubexplosionen nicht auszu-

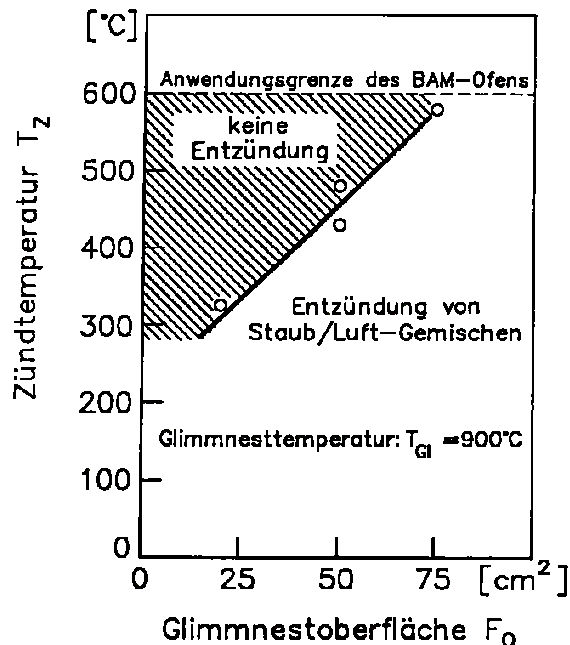


Abb.1: Zusammenhang zwischen Produkt-Zündtemperatur T_z und Glimmnestoberfläche /1/.

schliessen sind, wurde **zwecks Erhöhung der Verfügbarkeit der Anlage** seitens des Betreibers die **konstruktive Schutzmassnahme "Explosionsdruckentlastung"**, **wengleich in den Betriebsraum**, angewendet. Weil diese Anordnung der genannten Schutzmassnahme **unzulässig** ist /2/, wurde das Explosionsschutzkonzept erneut überprüft.

2. ANLAGENKURZBESCHREIBUNG

Der **lösemittelfreie Klärschlamm** wird über den Vorlagebehälter gepumpt (Abb.2). Das Produkt gelangt anschliessend in den Eintragsbereich des Trockners mit Vermischung des im Kreislauf rückgeführten, getrockneten Klärschlammes. Durch Drehung der mit kleinen Paddeln bestückten, dampfbeheizten Rotors wird das Produkt dem Austragsbereich zugeführt. Hierbei erfolgt durch Erwärmung des Schlammes auf über 100°C eine permanente Abgabe von Wasser aus den Brüden.

Um optimale Produkteigenschaften zu erreichen, wird das heisse Trockengut mittels Austrags-, Schrägförder- und Rückfuhrschnecke zum Eintragsbereich transportiert und mit dem angelieferten feuchten Trockenschlamm vermischt. Da im Bereich von 45 - 60% Trockensubstanz der Klärschlamm sehr klebrige Produkteigenschaften hat (sog. Leimphase), welche zu Klumpenbildung und erhöhter Stromaufnahme des Trockners führt, muss das Rückmischungsverhältnis so eingestellt sein, dass die mittlere Trockensubstanz im Eintragsbereich über 65% liegt.

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

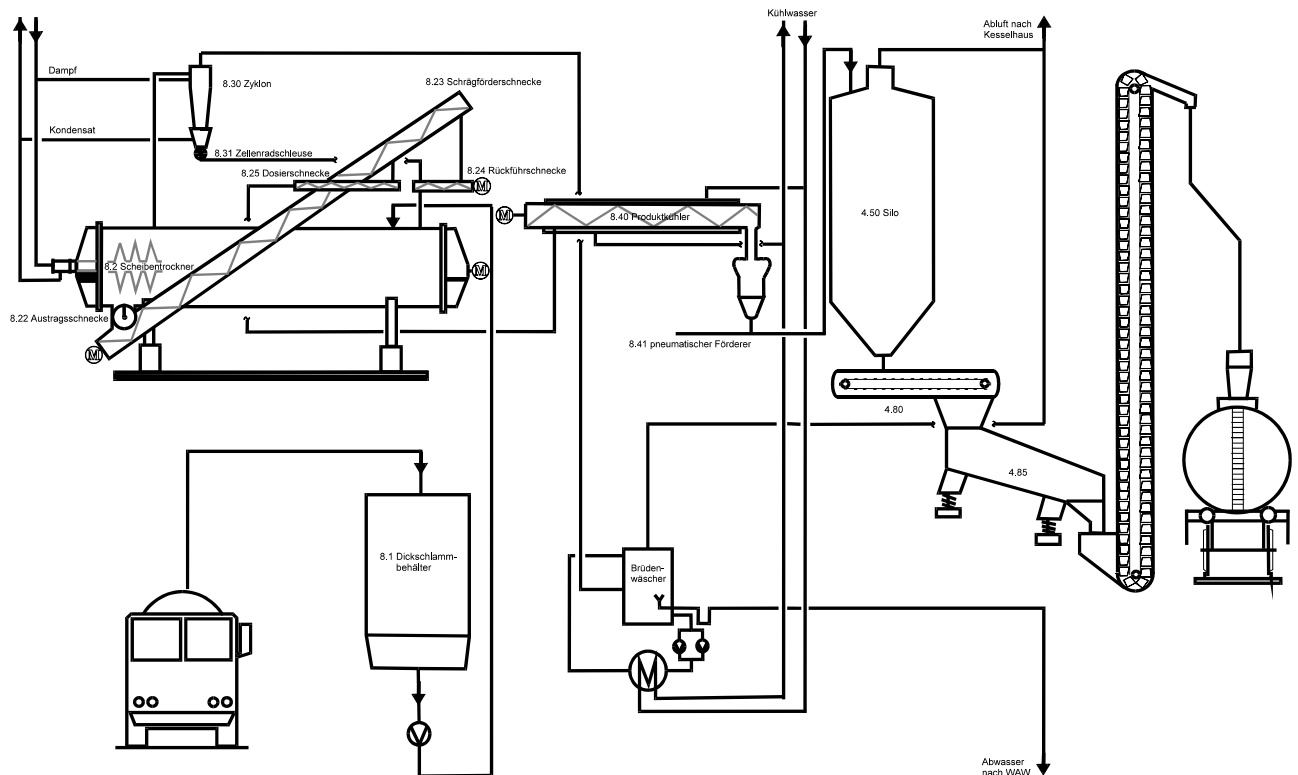


Abb.2: Schematische Darstellung der Scheibentrocknungsanlage für Klärschlamm

Die Entnahme von getrocknetem Klärschlamm erfolgt über die Dosierschnecke, welche in Abhängigkeit vom Produktniveau im Trockner einen kleineren Teil des Kreislaufproduktes aus der Schrägförderschnecke entnimmt und zum Produktkühler fördert. Die heißen Brüden werden über einen Zyklonabscheider (zur Feinstaubabscheidung) zum Brüdenwäscher geleitet, wo durch einen entsprechenden Wäscherkreislauf die Niederschlagung der Brüden erfolgt. Der im Zyklon abgeschiedene Staub wird über eine Zellenradschleuse in den Trockner zurückgefördert, die kondensierten Brüden in die werkseigenen Abwasserreinigungsanlage eingeleitet. Die durch den leichten Überdruckbetrieb anfallende Prozessabluft wird nach dem Brüdenwäscher über einen Feinstaubfilter sowie einen Polzeifilter geleitet und anschliessend im Kesselhaus verbrannt.

Im Produktkühler (horizontale Kühlschnecke) wird das heiße Produkt abgekühlt und anschliessend pneumatisch mit Luft in die Lagersilos gefördert. Die Förderluft wird mit einem Ventilator über Aufsatzfilter der Silos abgesaugt und nach Reinigung in einem Polzeifilter ebenfalls im Kesselhaus verbrannt.

Zur Verladung wird das Produkt aus den Silos über einen horizontalen Kettenförderer zu einem Schwingsieb gefördert, wo die Abtrennung des Überkorns erfolgt. Das gesiebte Produkt wird mittels vertikalen Elevator gehoben, um anschliessend über eine Produktrutsche in den Transportbehälter abzufließen.

3. SICHERHEITSTECHNISCHE KENNGRÖSSEN VON KLÄRSCHLAMM, DIE DAS ZÜND- UND EXPLOSIONSV ERHALTEN BESCHREIBEN

Es ist bekannt, dass Klärschlamm-Trockengüter mit entsprechendem organischen Anteil, auch bei Lösemittelfreiheit explosionsfähig sind [3]. Der verlässlichste Wert sich über die **Brand- und Explosionseigenschaften eines solchen Produktes** zu informieren, besteht darin, eine Probe zu untersuchen, und die **gefährlichen Eigenschaften problembezogen** durch **sicherheitstechnische Kenngrößen** zu beschreiben, deren Kenntnis für die **Auswahl von vorbeugenden, das Entstehen von Explosionen verhindernden, und konstruktiven, die Auswirkungen von Explosionen begrenzenden Schutzmassnahmen**

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

entscheidend ist. Es ist zwischen den Kenngrössen des **aufgewirbelten** und des **abgelagerten** Staubes zu unterscheiden /1,4,5/.

Tabelle 1: Sicherheitstechnische Kenngrössen von Klärschlamm aus der Trocknungsanlage gemäss Abb.2 die das Explosions- und Brandverhalten beschreiben.

Zustand des Staubes:	Sicherheitstechnische Kenngrösse:	Messwert:
aufgewirbelt	Medianwert M [um]	31.4
	untere Explosionsgrenze UEG [g·m ⁻³]	60
	maximaler Explosionsüberdruck p_{max} [bar]	7.7
	staubspezifische Kenngrösse K_{St} [bar·m·s ⁻¹]	84
	Zündtemperatur T_Z [°C] (BAM-Ofen)	440
	O ₂ -Grenzkonzentration cO₂ [Vol.%] (in Stickstoff)	13.0 Vol%
	Mindestzündenergie MZE mit Induktivität ohne Induktivität	125 mJ < MZE ≤ 250 mJ > 12500 mJ
abgelagert	Durchgangswiderstand R_D	< 10⁸ Ω·m
	Brennzahl BZ aus Brennprüfung bei 20°C und bei 100°C:	3
	Selbstentzündungstemperatur T_S :	> 150°C
	Glimmtemperatur T_{Gl} :	250°C
	brennbare Gase ab:	300°C
	spontane Zersetzung (Deflagration)	keine
	O ₂ -Grenzkonzentration in N ₂ zum Vermeiden von Glimmnestern	9.0 Vol%
Schlagempfindlichkeit:	keine	

Die Zahlenangaben der Tabelle 1 beziehen sich naturgemäss nur auf den lösungsmittelfreien Trockenschlamm aus der vorgegebenen Trocknungsanlage.

Der getrocknete Klärschlamm ist der Staubexplosionsklasse St1 ($K_{St} \leq 200 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) zuzuordnen. Aufgrund der Erfahrung ist im Vergleich zu anderen Produkten /3/ bei annähernd gleichen maximalen Explosionsüberdruck von 7.7 bar ein Wechsel der Staubexplosionsklasse in eine höhere Klasse (St2/St3) nicht zu erwarten. Der relativ niedrige Durchgangswiderstand deutet an, dass das Produkt nicht isolierend wirkt.

Grundsätzlich bewegt sich auch die Mindestzündenergie im erwarteten Rahmen, wenngleich bei Vorhandensein einer Induktivität im Entladekreis in einigen Fällen niedrige Grenzwerte ($10 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 100 \text{ mJ}$) gefunden wurden /3/.

Auch die Zündtemperatur und die Sauerstoff-Grenzkonzentration in Stickstoff liegen im erwarteten Rahmen, wenngleich zum Vermeiden von Glimmnestern, wie erwartet ein deutlich niedriger Grenzwert einzuhalten ist.

Die Fähigkeit des Produktes zu Glimmen ist aus dem Ergebnis der Brennprüfung selbst bei 100°C (BZ3: örtliches Brennen oder Glühen, höchstens mit geringer Ausdehnung) nicht ohne weiteres abzulesen. Beim Warmlagerversuch mit grösseren Produktmengen kam es hingegen bei Temperaturen $> 150^\circ\text{C}$ in Verbindung mit einer Zersetzung zu einem Glimmbrand.

Das untersuchte Produkt ist weder deflagrationsfähig noch schlagempfindlich.

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

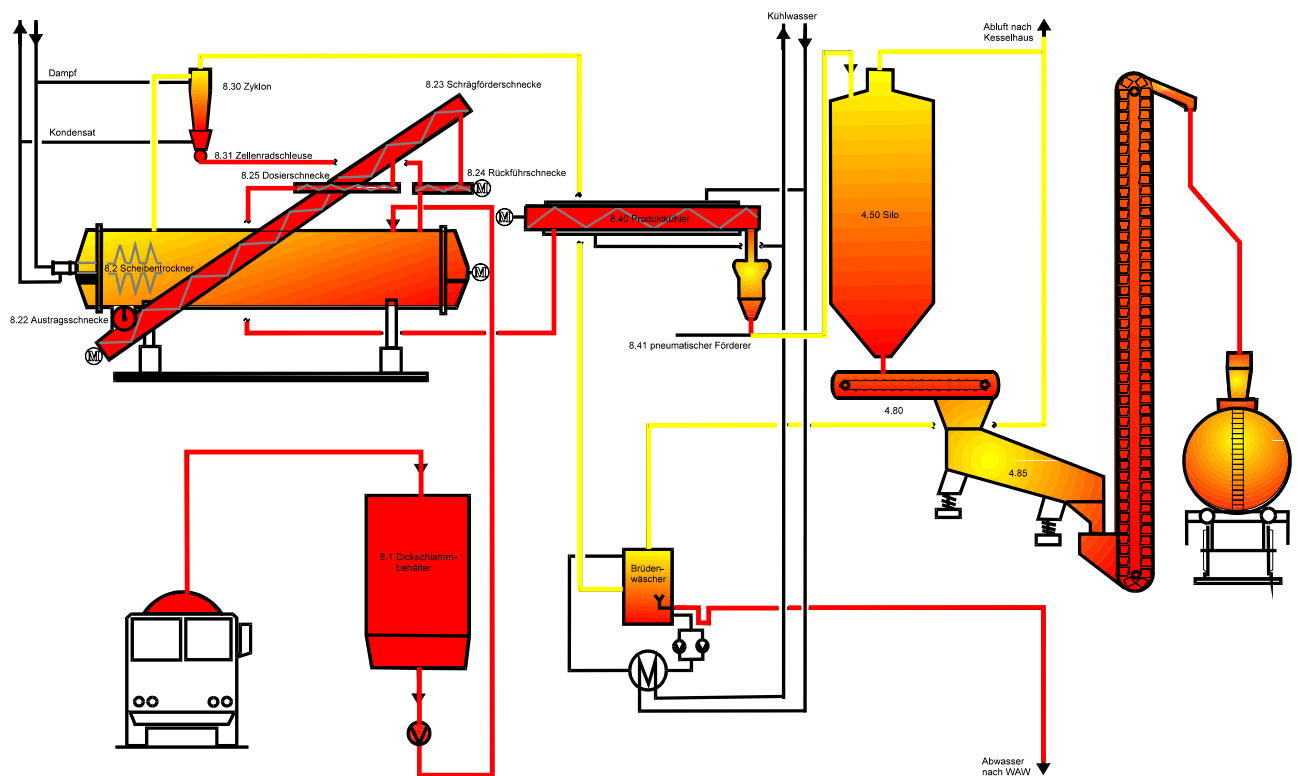


Abb.3: Anzunehmende Verteilung von abgelagertem und aufgewirbeltem Klärschlamm in der Trocknungsanlage.

Abb.3 zeigt die im Trockner anzunehmende Verteilung von **abgelagertem** (dunkelrote (**dunkelgraue**) Einfärbung) und **aufgewirbeltem** (gelbe (**hellgraue**) Einfärbung) **Produkt**.

Die **Arbeitstemperatur der Anlage beträgt $T = 160^{\circ}\text{C}$** .

4. BEURTEILUNG DER ZÜNDWIRKSAMKEIT MÖGLICHER ZÜNDQUELLEN IN DER TROCKNUNGSANLAGE

Wird davon ausgegangen, dass sogenannte

- **Triviale Zündquellen (z.B. unbefugtes Rauchen, Schweißen, Schneiden, Umgang mit offenem Flammen)**

Durch organisatorische Massnahmen sicher verhindert werden, dann ist in der Anlage noch mit folgenden **bedeutsamen Zündquellen** zu rechnen (Abb.4).

⇒ **Elektrostatische Entladungen** /1/ können durch die von ihnen hervorgerufenen Entladungserscheinungen /6/ eine Zündgefahr für Staub/Luft-Gemische darstellen. Für die Beurteilung dieser Gefahr in der Praxis ordnet man ihnen eine auf eine reine Kondensatorentladung bezogene **elektrische Äquivalentenergie E_{Ae}** zu (Abb.5), und vergleicht diese mit der Mindestzündenergie des zu verarbeitenden Produktes **unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf diesen Grenzwert**.

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

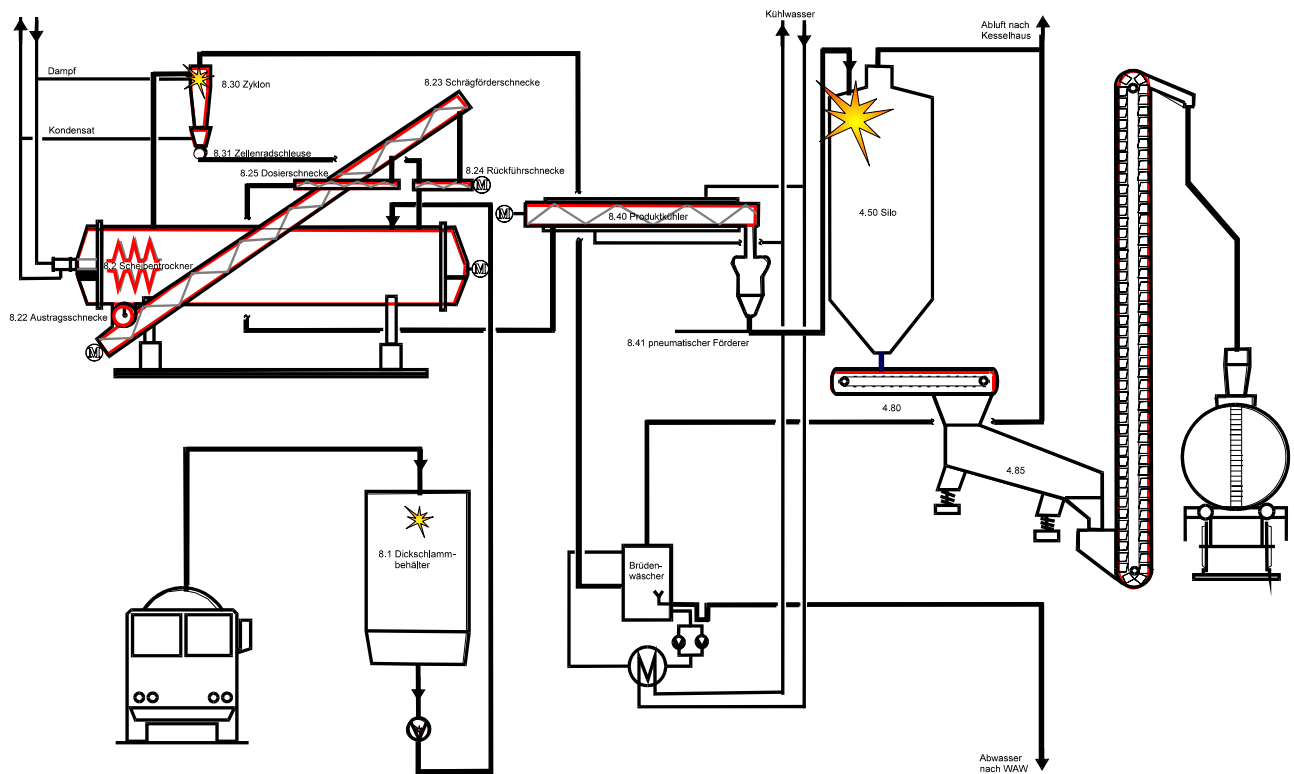


Abb.4: In der Trocknungsanlage zu erwartende bedeutsame Zündquellen.

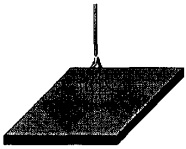
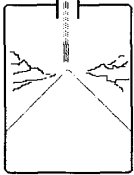
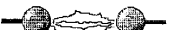
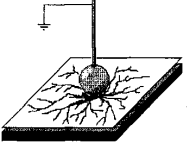
Entladungsart	elektrische Äquivalentenergie E_{Ae}
Büschel-Entladung 	3 mJ
Schüttkegel-Entladung 	1 J
Funken-Entladung 	10 J
Gleitstielbüschel-Entladung 	1 J

Abb.5: Elektrische Entladungen und zuzuordnende elektrische Äquivalentenergie E_{Ae}

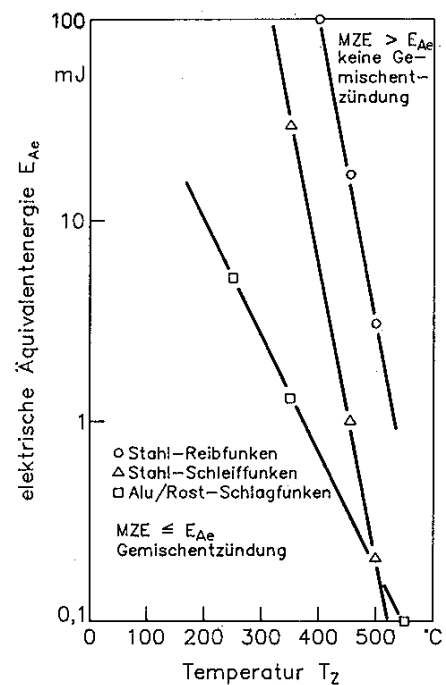


Abb.6: Mechanisch erzeugte Stahlfunken und zuzuordnende elektrische Äquivalentenergie E_{Ae} in Abhängigkeit von der Produkt-Zündtemperatur T_Z .

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

- ⇒ **Mechanisch erzeugten Funken** /1,6/ wird ebenfalls eine erhebliche **elektrische Äquivalentenergie** E_{Ae} zugeordnet, die allerdings auf eine zeitlich gedehnte Kondensatorentladung bezogen ist, und zusätzlich von der **Zündtemperatur** T_z eines Produktes abhängt. Abschätzung der Zündwirksamkeit erfolgt wie im Fall der elektrostatischen Entladungen durch Vergleich mit der temperaturabhängigen Mindestzündenergie eines Produktes.

In Tabelle 2 ist die auf eine Arbeitstemperatur von $T = 160^\circ\text{C}$ bezogene Mindestzündenergie von Klärschlamm-Trockengut verglichen mit den elektrischen Äquivalentenergien E_{Ae} von elektrostatischen Entladungen und mechanisch erzeugten Stahlfunken, bei zusätzlicher Angabe der Zündgefahr.

Tabelle 2: Vergleich Mindestzündenergie von Klärschlamm und elektrischer Äquivalentenergie E_{Ae} für elektrische Entladungen und mechanisch erzeugte Stahlfunken.

- $T = 160^\circ\text{C}$, $\square \cong \text{MZE} \leq E_{Ae} = \text{Zündgefahr}$ -

Mindestzündenergie von Klärschlamm-Trockengut		Elektrostatische Entladungen		Mechanisch erzeugte Funken	
		Entladungsart:	E_{Ae} [mJ]	Funkenart:	E_{Ae} [mJ]
mit Induktivität	$2.8 \text{ mJ} < \text{MZE} \leq 4 \text{ mJ}$	Büschelentladung	3	Stahl-Reibfunken	2017
		Schüttkegel/Gleitstielbüschelentladung	1000	Stahl-Schleiffunken	1.3
ohne Induktivität	$\text{MZE} \geq 26.9 \text{ mJ}$	Funkenentladung	10000	Stahl-Schlagfunken	0.4

Zündgefahr ist also grundsätzlich durch elektrostatische Entladungen (Ausnahme Büschelentladungen) und durch Stahl-Reibfunken gegeben.

Auch

- ⇒ **Glimmester (Abb.7)** mit der Oberfläche eines Würfels mit nur 4 cm Kantenlänge und
- ⇒ **Heisse Oberflächen (Abb.8)**, die nach kurzzeitigem Reiben von Stahl gegen Stahl entstehen (Abb.8) erreichen Temperaturen (Abb.9) die in der Lage sind – **unabhängig von der Mindestzündenergie** – homogene und inhomogene Staubwolken aller brennbaren Stäube, **also auch Klärschlamm-Trockengütern**, zu entzünden, die in den Anwendungsbereich des bekannten BAM-Ofens ($T_z \leq 600^\circ\text{C}$) fallen.

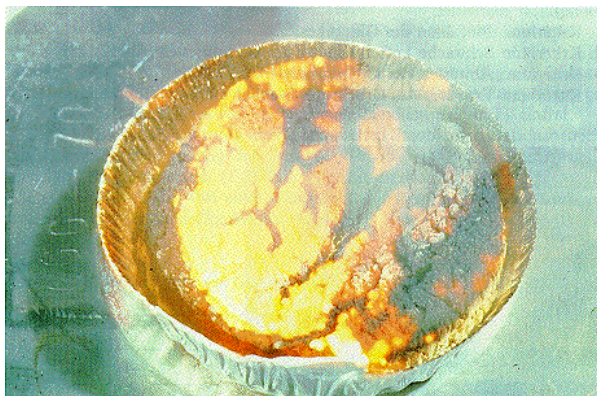


Abb.7: Holzmehl-Glimmester (siehe auch Abb.1)

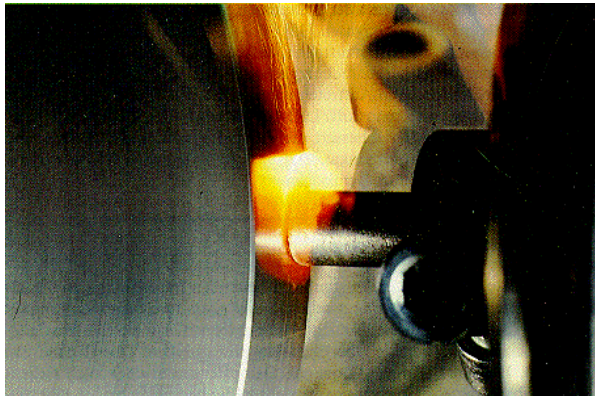


Abb.8: Heisse Oberfläche beim Reiben von Stahl gegen Stahl (Reibzeit 2s).

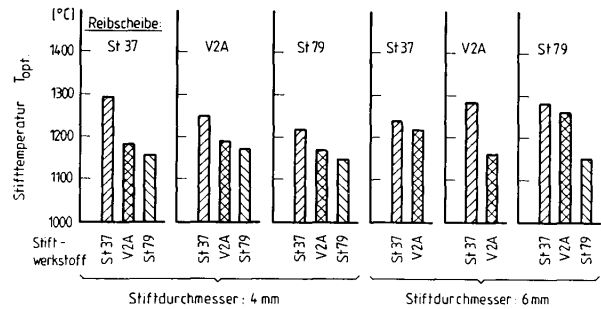


Abb.9: Optimale Stifttemperaturen beim Reiben von Stahl gegen Stahl.

Alle in diesem Abschnitt angesprochenen Zündarten sind mit wenigen Ausnahmen als wirksame Zündquellen in der diskutierten Scheibentrocknungsanlage für Klärschlamm (Abb.2) zu sehen. Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass die Nachweisbarkeit erbracht wurde, dass

- ein brennbarer Stoff vorhanden ist, dass
- das Entstehen einer gefährlichen Menge von explosionsfähiger Atmosphäre gegeben ist, und dass
- wirksame Zündquellen vorhanden sind.

5. AUSWAHL DER ZU TREFFENDEN SCHUTZMASSNAHMEN GEGEN DAS ENTSTEHEN UND DIE AUSWIRKUNGEN VON STAUBEXPLOSIONEN IN DER TROCKNUNGSANLAGE

Für eine Staubexplosion im Trockner wird bekanntlich /1/ benötigt:

- **aufgewirbeltes, brennbares Medium in explosionsfähiger Konzentration,**
- **Luftsauerstoff** und eine
- **wirksame Zündquelle**

wie das bekannte Gefahendreieck (Abb.10) zeigt.

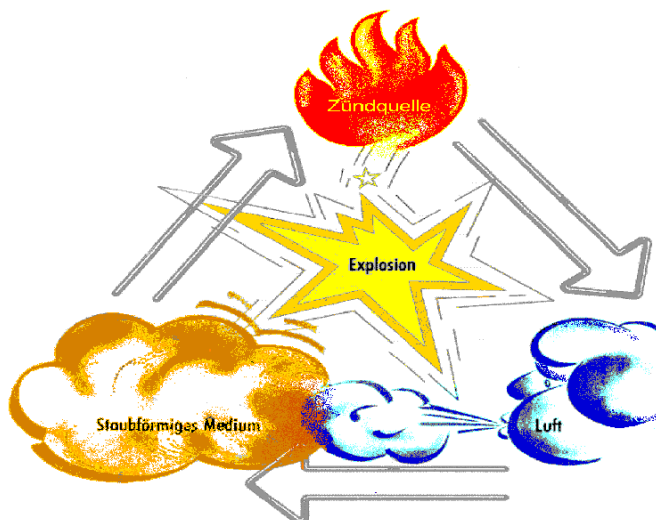


Abb.10: Gefahendreieck

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

Die **vorbeugenden, das Entstehen von Explosionen verhindernden Massnahmen** resultieren aus der Auflösung des Gefahendreiecks. Natürlich ist es aus verfahrenstechnischen Gründen nicht möglich die Schutzmassnahmen

➤ **Vermeidung von explosionsfähigen Staub/Luft-Gemischen**

Und wie in Abschnitt 4 nachgewiesen

➤ **Vermeiden von wirksamen Zündquellen**

anzuwenden. Das

➤ **Vermeiden von Staubexplosionen durch Inertisierung**

ist hingegen möglich.

Auch die Anwendung des **konstruktiven, die Auswirkungen von Staubexplosionen begrenzenden Schutzmassnahmen** ist als Sanierungsmassnahme grundsätzlich möglich, wengleich mit erhöhten Kosten verbunden, weil die **explosionsfeste Bauweise für den vollen maximalen Explosionsüberdruck, die Explosionsdruckentlastung oder die Explosionsunterdrückung** nicht nur eine explosionsfeste (explosionsdruckfeste bzw. explosionsdruckstossfeste) Bauweise verlangt, sondern immer zusätzlich mit dem Einsatz von Entkopplungsmassnahmen (z.B. Zellenräder, Löschmittelsperren usw.) verbunden ist.

Eine **Grundvoraussetzung** für die Anwendung der vorbeugenden Schutzmassnahme „Inertisierung durch Stickstoff“ ist die Kenntnis der

- **Sauerstoffgrenzkonzentration $c_{O_2,gr}$**

Bei der in einem Klärschlamm-Trockengut/Luft-Gemisch eben gerade keine Staubexplosion mehr möglich ist. **Sie ist eine staub- und inertgasspezifische Kenngrösse und fällt mit steigender Temperatur /1,7/**

Die

- **höchstzulässige Sauerstoffkonzentration $c_{O_2,h}$**

ist diejenige Konzentration, die in der zu schützenden Anlage – **auch bei zu erwartenden Störungen** – nicht überschritten werden darf.

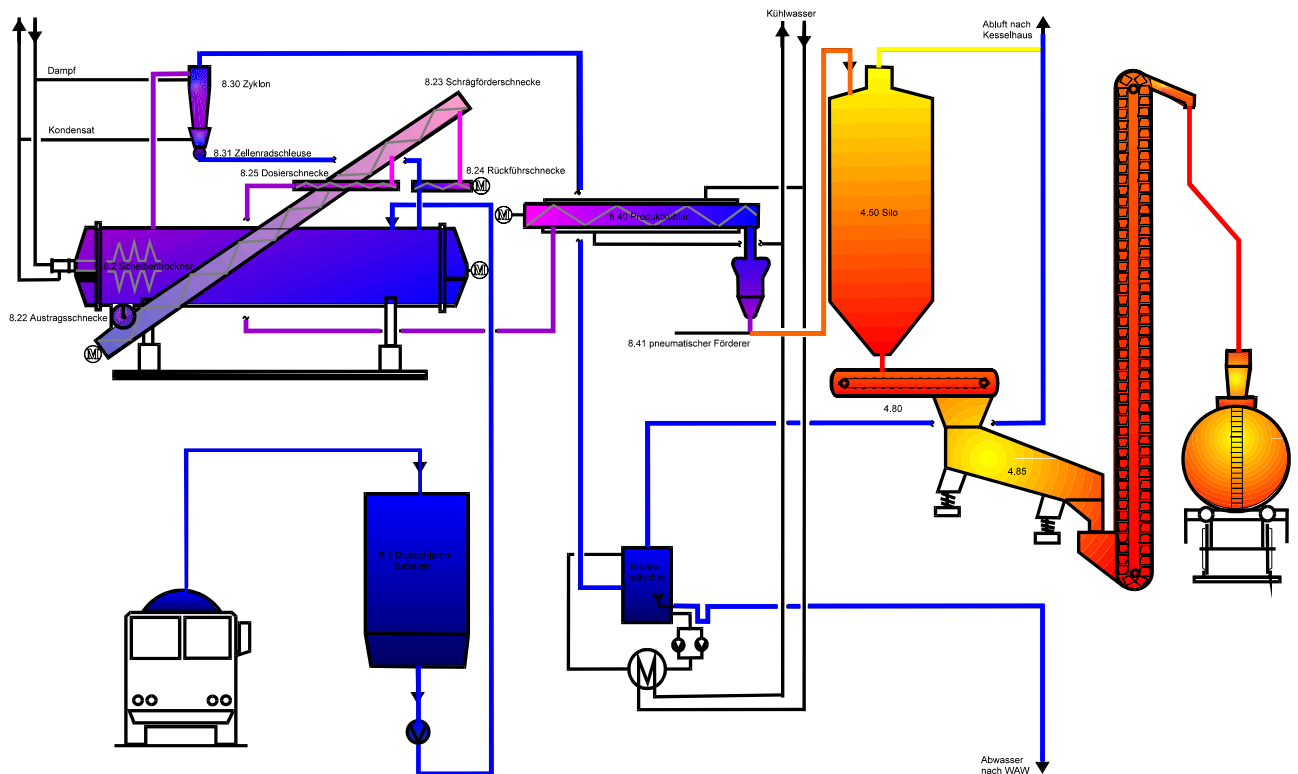
In Tabelle 1 sind zwei Sauerstoffgrenzwerte, und zwar je nachdem ob es darum geht, eine Staubexplosion oder aber ein Glimmnest zu unterbinden. **Unter Berücksichtigung eines mittleren Temperaturkoeffizienten von $\alpha = 0.0016 \text{ Vol}\% \cdot \text{K}^{-1}$ /1/** sind in Tabelle 3 die höchstzulässigen Sauerstoffkonzentrationen angegeben, die in der Klärschlamm-trocknungsanlage unter Betriebsbedingungen anzuwenden sind.

Tabelle 3: Sauerstoff-Grenzkonzentration $c_{O_2,gr}$ und höchstzulässige Sauerstoffkonzentration $c_{O_2,h}$ von Klärschlamm-Trockengut.

Temperatur T	20°C	160°C	
wirksam gegenüber:	$c_{O_2,gr}$		$c_{O_2,h}$
Staubexplosionen	13.0	10.8	9.0
Glimmnestern	9.0	6.8	5.0

Man hat also von folgender **Zündquellenverteilung** in der Trocknungsanlage (Abb.11) auszugehen:

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage



Zündquelle: Glimmnest vorherrschend

Zündquellen: elektrostatische -,
mechanische Funken,
heisse Oberflächen.

Abb.11: Zündquellenverteilung in der Klärschlamm-Trocknungsanlage.

Im Bereich **Dickschlammzufuhr** ⇒ **pneumatischer Förderer** (Abb.11 links) ist vorwiegend mit **Glimmnestern als wirksamen Zündquellen** zu rechnen. Dies bedeutet gemäss Tabelle 3, dass in diesem Bereich der **Sauerstoffgehalt in Stickstoff gesichert 5 Vol%** zu betragen hat.

Im Bereich **pneumatischer Förderer** ⇒ **Abfüllung in einen Bahnkesselwagen** (Abb.11 rechts) hat man es vor allem mit **elektrostatischen Entladungen, mechanisch erzeugten Funken und heissen Oberflächen als wirksame Zündquellen** zu tun, d.h. in diesem Bereich (/1/,S.393, Tabelle 2.18) muss der **Sauerstoffgehalt in Stickstoff nun 9.0 Vol%** betragen.

Nachdem die Auswahl **des Inertgases - nämlich Stickstoff** - getroffen wurde, ist die Anlage so zu überwachen, dass die **höchstzulässigen Sauerstoffkonzentrationen** (Tabelle 3) nicht überschritten werden /7/. Hierbei ist besonders zu beachten:

- **Auswahl einer geeigneten Messgrösse (Sauerstoffkonzentration, Inertgasmenge);**
- **Auswahl der geeigneten Messtechnik;**
(z.B. Messprinzip, Querempfindlichkeit, Fehlergrössen, Eigenzeit des Messgerätes, Zeitverzögerung der Aussage durch den Abstand zwischen Messgerät und Entnahmestelle).
- **Auswahl des geeigneten Messortes,** der unter Beachtung der Strömungsverhältnisse die für die Sauerstoffkonzentration ungünstigsten Zustände erfasst. Gegebenenfalls können mehrere Messorte erforderlich sein.
- **Für den Störfall sind geeignete Massnahmen festzulegen:**

Explosionstechnische Sanierung einer Klärschlamm-Trocknungsanlage

Stilllegen der Anlage beim Überschreiten der höchstzulässigen Sauerstoffkonzentration bzw. beim Unterschreiten des für eine einwandfreie Inertisierung erforderlichen Inertgasmenge. Das Stilllegen soll in der Regel automatisch erfolgen.

Auswahl der geeigneten Alarmschwelle, bei deren Überschreiten geeignete Gegenmassnahmen (automatisch, mechanisch) eingeleitet werden können.

- **Bei intermittierender Messung ist ferner darauf zu achten, dass**
 - ⇒ vollständig in sich geschlossene Systeme mit stets definierter und reproduzierbarer Gasführung vorliegen (Gefahr Reinigungsöffnungen),
 - ⇒ vorher in **einer ausreichend langen Fahrperiode** sichere Betriebsbedingungen für die Fahrperiode festgelegt werden.
 - ⇒ nach jeder Änderung der Anlage die Betriebsbedingungen für die Inertisierung festgelegt werden,
 - ⇒ **Der Inertisierungsgrad des in Frage kommenden Anlageteile bei allen Betriebszuständen bekannt ist**, und
 - ⇒ Ein Ausfall des Inertisierungsmittels durch Alarm gemeldet wird.

Bei Nichtbeachtung obiger Hinweise kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Staubexplosionen mit erheblichem Sach- und Personenschäden.

Bei der Anwendung der Inertisierung sind **ferner Sicherheitsmassnahmen gegen möglichen Sauerstoffmangel** oder gegen **eine gesundheitsschädigende Wirkung des Inertgases** vorzusehen.

Weitere Hinweise sind /7/ zu entnehmen.

6. LITERATURHINWEISE

- /1/ W. Bartknecht: Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag 1993
- /2/ Verein Deutscher Ingenieure: Druckentlastung von Staubexplosionen, Richtlinie VDI 3673, Gründruck Dezember 2000
- /3/ BIA-Report: Brenn- und Explosionskenngrössen von Stäuben, 12/97, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, St. Augustin, November 1997
- /4/ Verein Deutscher Ingenieure: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung - Schutzmassnahmen, Richtlinie VDI 2263, Mai 1992
- /5/ Verein Deutscher Ingenieure: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrössen von Stäuben, Richtlinie VDI 2263/Blatt 1, Mai 1990
- /6/ W. Bartknecht, R. Siwek: Bedeutung von Mindestzündenergie und Zündtemperatur für die Beurteilung von Zündquellen in Staub/Luft-Gemischen,
Teil I: Mindestzündenergie und Zündtemperatur, Staub-Reinhaltung der Luft (54) 1994, Seite 325-330, Springer-Verlag, 1994
Teil II: Beurteilung der Zündwirksamkeit, Staub-Reinhaltung der Luft (54) 1994, Seite 415-421, Springer-Verlag, 1994
- /7/ Verein Deutscher Ingenieure: Inertisierung, Richtlinie VDI 2263, Blatt 2, Mai 1992