

Tabelle 2.9: Einfluss des Inertgases auf die Sauerstoff-Grenzkonzentration SGK brennbarer Stäube [5]

- Normalbedingungen, $V \ 0 \ 1\text{m}^3$, $E = 10 \text{ kJ}$ -

Inertgas	N ₂	CO ₂
Staubart	SGK [Vol%]	
Lycopodium	11,0	15,0
HDPE	11,5	15,0
Kohle	14,0	17,0
Erbsenmehl	15,5	17,0

Tabelle 2.9 gibt für Normalbedingungen und drei weitere brennbare Stäube den Einfluss des Inertgases auf die Sauerstoff-Grenzkonzentration SGK an.

Zusammenfassung des Inhalts der Tabellen 8 und 9 ergibt den folgenden durchschnittlichen Zusammenhang zwischen der mit Kohlendioxid gemessenen Sauerstoff-Grenzkonzentration SGK_{CO_2} und dem mit Stickstoff gemessenen Grenzwert SGK_{N_2}

$$SGK_{CO_2} = 1.9 \cdot SGK_{N_2} \quad [\text{Vol}\%] \quad (2.16)$$

Folgende

Massnahmen bei Anwendung der Inertisierung durch gas-oder dampfförmige Inhibitoren

zum Schutz von Behältern, Apparaten oder Anlagen zu beachten. So ist zu überwachen, dass die höchstzulässige Sauerstoff-Grenzkonzentration[40] nicht überschritten wird. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen (s.Richtlinie VDI 2263, Blatt 2):

- Auswahl einer geeigneten Messgrösse (Sauerstoffkonzentration, Inertgasmenge)
- Auswahl der geeigneten Messtechnik (**z.B.** Messprinzip, Querempfindlichkeit, Fehlergrenzen, Eigenzeit des Messgerätes, Zeitverzögerung der Anzeige 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:

- Stilllegen der Anlage bei der höchstzulässigen Sauerstoffkonzentration bzw. bei Unterschreiten der 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 reproduzierbar Gasführung vorliegen (Gefahr: Reinigungsöffnung),
- vorher in einer ausreichend langen Fahrperiode sichere Betriebsbedingungen für die in der Inertisierung festgelegt werden,
- nach jeder Änderung der Anlage die Betriebsbedingungen für die Inertisierung überprüft und gegebenenfalls neu festgelegt werden,
- der Inertisierungsgrad der in Frage kommenden Anlageteile bei allen Betriebszuständen bekannt ist,
- ein Ausfall des Inertisierungsmittel durch Alarm gemeldet wird.

Eine gegen das Entstehen von Staubexplosionen ausreichende Inertisierung ist keine Schutzmassnahme zum Vermeiden von Bränden, einer exothermen Zersetzung oder einer Deflagration, eines abgelagerten Staubes.

2.233 Inertisieren durch Zugabe von Feststoffen

Wie bei den Brenngasen (Abb.2.25) kann auch die Inertisierung von brennbaren Stäuben durch Zugabe von inerten pulverförmigen Feststoffen durchgeführt werden. Dies geschieht in der Form, dass das brennbare Produkt mit dem Inertstaub gut vermischt wird.

Bei der Inertisierung der Verbrennungsluft mit Stickstoff (Abb.2.45) wird bei Veränderung des Sauerstoff/Stickstoff-Verhältnisses zugunsten des Stickstoffs die Mindestzündenergie der brennbaren Stäube rasch angehoben. Wird hingegen z.B. Erbsenmehl durch ein Löschpulver auf der Basis von Ammoniumsphosphat (Tropolar) inertisiert (Abb.2.46), dann steigt die Mindestzündenergie MZE der Brennstaub/Inertstaub-Gemische mit zunehmendem Inertstaubanteil ebenfalls sehr schnell an. Aus diesem Grund wird derjenige Inertstaubanteil im Gesamtgemisch als Inertstaub-Grenzkonzentra-

tion definiert, bei der in Gegenwart der Prüfzündquelle mit einem Gesamtenergieinhalt von $E = 10 \text{ kJ}$ eben gerade keine Gemischentzündung mehr stattfindet. Wegen nicht vorhandener Gesetzmäßigkeiten muss die genannte Grenzkonzentration von Fall zu Fall bestimmt werden. Solche Untersuchung erfolgen wiederum nach dem Normverfahren im explosionsfesten 1m^3 -Behälter (Abb.2.26).

Wie die Sauerstoff-Grenzkonzentration bei der Inertisierung durch gasförmige Medien, hängt auch die Inertstaub-Grenzkonzentration von der aufgewendeten Zündenergie E ab (Abb.2.47).

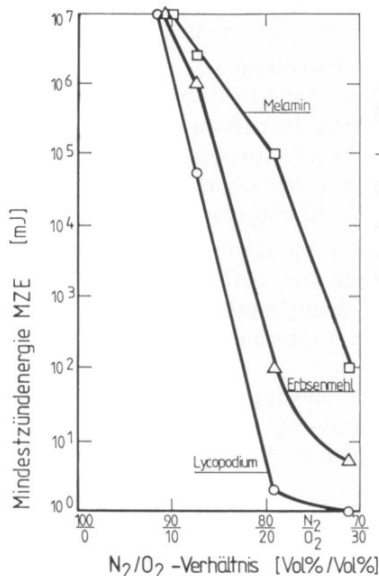


Abb.2.45: Mindestzündenergie MZE brennbarer Stäube als Funktion des Stickstoff/Sauerstoff-Verhältnisses

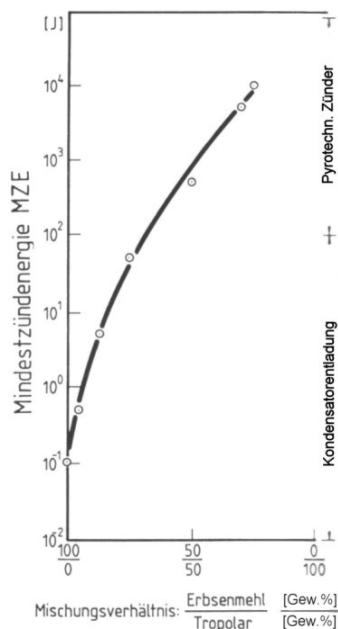


Abb.2.46: Mindestzündenergie MZE von Erbsenmehl als Funktion des Mischungsverhältnisses mit Tropolar

In der Grossapparatur hat sich ergeben, dass fallende Zündenergie den Grenzwert für die Inertstaub-Zumischung vermindert. Ist daher in der Praxis in zu schützenden Behältern oder Apparaten mit weniger energiereichen Zündquellen zu rechnen, dann genügt be-

reits eine Zumischung von ca. 20 Gew.% um z.B. die Gemische von Cellulose ausreichend zu inertisieren.

Wie die Inertgase haben auch inerte Feststoffe eine unterschiedliche Wirksamkeit bei der Inertisierung brennbarer Stäube, wie aus den Angaben der Tabelle 2.10 hervorgeht.

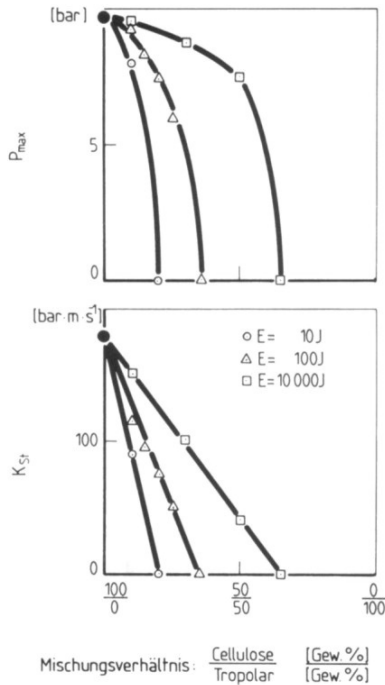


Abb.2.47: Einfluss der Zündenergie E auf die Inertstaub-Grenzkonzentration von Cellulose

Tabelle 2.10: Wirksamkeit verschiedener Inertstube bei der Inertisierung von brennbaren Stuben
(V = 1 m³, E = 10 kJ)

Brennbarer Staub	Wirksamkeit des Inertstaubes	
	Günstig	Ungünstig
Kohlenstaub	NH ₄ H ₂ PO ₄	KHCO ₃
Zucker	NaHCO ₃	KCl
Dextrin	NaHCO ₃	KCl
Organ. Pigment	NH ₄ H ₂ PO ₄	NaCl
Aluminium	NaHCO ₃	NaCl

In der Tabelle 2.11 ist abschliessend die Inertstaub-Grenzkonzentration IGK in brennbaren Stuben angegeben, die bei Anwendung der bei Staubuntersuchungen üblichen kräftigen Zündquelle für eine vollständige Inertisierung erforderlich ist.

Tabelle 2.11: Inertstaub-Grenzkonzentration IGK von Inertstuben

(V = 1 m ³ , E = 10 kJ)				
Brennbarer Staub	M	Inertstaub	M	IGK
	[μm]		[μm]	[Gew %]
Methylcellulose	70	CaSO ₄	<15	70
Cellulose	22	NaH ₄ H ₂ PO ₄	29	65
Steinkohle (Fett-)	20	CaCO ₃	14	65
Steinkohle (Fett-)	20	NaHCO ₃	35	65
Organ. Pigment	<10	NaH ₄ H ₂ PO ₄	29	65
Aluminium	<10	NaHCO ₃	35	65
Dextrin	<63	KHCO ₃	25	55
Zucker	30	NaHCO ₃	35	50
Erbsenmehl	25	NH ₄ H ₂ PO ₄	29	40

Im Allgemeinen sind also Inertstaubzusatze von mehr als 50 Gew.% für eine Inertisierung notwendig[41]. Ist jedoch in der Industriep Praxis mit weniger energiereichen Zündquellen zu rechnen, so sind gemäss Abb.2.47 deutlich geringere Inertstaubmengen ausreichend.

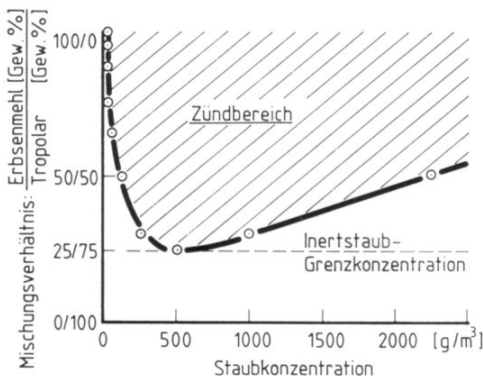


Abb.2.48: Einfluss des Mischungsverhältnisses von Inertstaub zu Erbsenmehl auf den Zündbereich

- V = 20 l, E = 10 kJ -

Abb.2.48 zeigt den in der 20 l-Laborapparatur gemessenen Einfluss der **Zugabe von Tropolar (einem bekannten Löschpulver) zu Erbsenmehl**. Ähnlich wie bei der Stickstoffinertisierung ist der Einfluss auf die untere Explosionsgrenze gering, bei starker Einschränkung der oberen Explosionsgrenze. Gleichzeitig vermindern sich die Explosionskenngrößen (maximaler Explosionsüberdruck $p_{\max}$, staubspezifische Kenngröße K_{St} -Wert.) und enden bei einer Inertstaubgrenzkonzentration von 75 Gew.% Inertstaub in Tropolar (Abb.2.49).

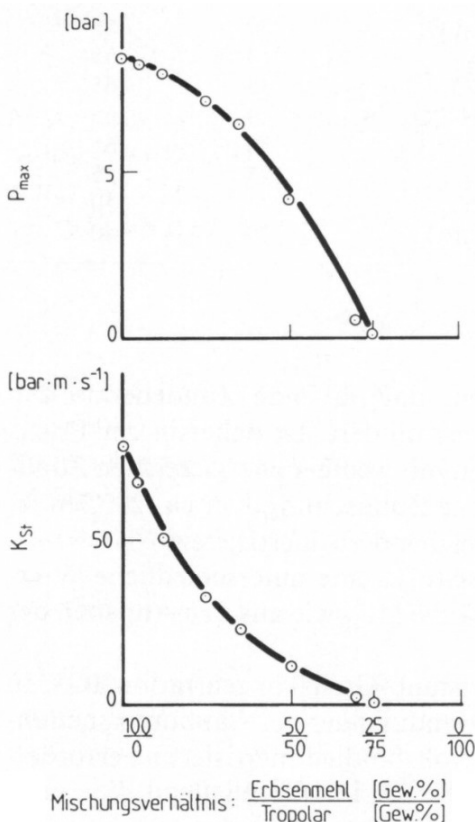


Abb.2.49: Explosionskenngrößen von Erbsenmehl als Funktion des Mischungsverhältnisses mit Tropolar

- V = 20 l, E = 10 kJ -

Man beachte, dass die Inertstaub-Grenzkonzentration in der 20 l-Laborapparatur um ca. 50 % höher ist als in der Grossapparatur, was wiederum der kräftigen Zündquelle (E = 10 kJ) zuzuschreiben ist. Nach den Angaben von Tabelle 2.12 beträgt die äquivalente Zündenergie für die Kleinapparatur E = 1 kJ.

Tabelle 2.12: Einfluss des Prüfvolumens V und der Zündenergie E auf die Inertstaub-Grenzkonzentration IGK verschiedener brennbarer Stäube

Prüfvolumen V [m ³]	1,0	0,02
Zündenergie E [kJ]	10	1
Staubart	IGK [Gew. %]	
Lycopodium	65	70
Technocel	40	40
Erbsenmehl	40	40
Maisstärke	40	40
Weizenmehl	30	30

2.234 Anwenden von Vakuum

Wie bekannt, verändern sich die maximalen Explosionskenngrossen brennbarer Stäube (maximaler Explosionsüberdruck $p_{\max}$, staubspezifische Kenngrösse K_{St}) proportional zum Vordruck, dem Ausgangsdruck für eine Staubexplosion. Durch **Herabsetzen des Ausgangsdrucks unter den Atmosphärendruck** kann erreicht werden, dass entweder

- keine Staubexplosion mehr stattfindet (das ist im allgemeinen bei einem Vordruck von einigen 10 mbar der Fall) oder
- der maximale Explosionsüberdruck unter dem Atmosphärendruck bleibt (dies ist im Zusammenhang mit den **organischen Stäuben** allgemein bis zu einem Vordruck von $p_v = 0.1 \text{ bar}_{\text{abs}}$ der Fall).

Gleichzeitig steigt die Mindestzündenergie an. Je grösser der Unterdruck ist, umso höher ist, wie bei den Brenngasen, das Sicherheitsniveau. Diese Schutzmassnahme gegen das Entstehen von Staubexplosionen wird häufig an Vakuum-Schaufeltrocknern angewendet. Ihr Vakuum muss messtechnisch überwacht sein und im Störfall (z.B. Lufteinbruch) durch eine andere Schutzmassnahme (z.B. Inertisierung oder Vermeiden von wirksamen Zündquellen) ersetzt werden.

2.24 Hybride Gemische

Die Versuchsbedingungen für die Bestimmung der Sauerstoff-Grenzkonzentration bei der Inertisierung mit Stickstoff der Einzelkomponenten von hybriden Gemischen aus brennbarem Staub mit Brenngasen sind sehr unterschiedlich. Während

- Staub/Luft-Gemische bei mittlerer oder auch niedriger Gemischturbulenz durch eine Zündquelle in Form von pyrotechnischen Zündern mit einem Gesamtenergieinhalt von $E = 10 \text{ kJ}$ entzündet werden (siehe. Abb.2.26), wird in
- Brenngas/Luft-Gemischen bei ruhendem Zustand eine Zündquelle in Form einer Kondensatorentladung oder eines Induktions-Dauerfunken mit einer Energie von ca. $E = 10 \text{ J}$ wirksam.

Die Sauerstoff-Grenzkonzentration von Propan ist unabhängig davon, ob die Gemische in ruhendem Zustand oder aber bei mittlerer Turbulenz entzündet werden (Abb.2.50). Ruhend entzündete Gemische haben allerdings einen etwas erweiterten Zündbereich.

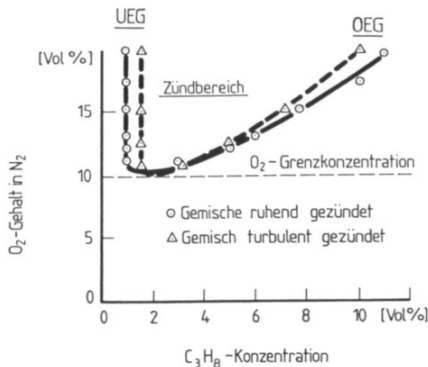


Abb.2.50: Einfluss der Sauerstoffkonzentration in Stickstoff und der Gemischturbulenz von Propan

- $V = 1 \text{ m}^3$, $E = 10 \text{ kJ}$ -

Allerdings ist der Einfluss der bei Staubuntersuchungen üblichen sehr energiereichen Zündquellen ($E = 10 \text{ kJ}$) auf den Grenzwert zu beachten, der mit 11,8 Vol% deutlich höher ist, wenn die bei Brenngasuntersuchungen übliche Zündenergie von $E = 10 \text{ J}$ eingesetzt wird. Dies gilt auch für andere Brenngase, wie Tabelle 2.13 ausweist. Bei kräftiger Zündquelle ($E = 10 \text{ kJ}$) vermindert sich also gegenüber der Normzündquelle für Brenngase ($E = 10 \text{ J}$) der Sauerstoff-Grenzwert in Stickstoff um durchschnittlich 2 Vol%.

Tabelle 2.13: Einfluss der Zündenergie E auf die Sauerstoff-Grenzkonzentration SGK in Stickstoff ruhend und turbulent entzündeter Brenngas/Luft-Gemische

- V = 1 m³-Behälter -

Zündenergie E [kJ]	0,01	10
Brenngas	SGK [Vol%]	
Propan	11,8	10,0
Butan	12,1	10,0
Methan	12,0	10,5

Abb.2.51 zeigt für den Fall des gemeinsamen Auftretens von Erbsenmehl und Propan das Verhalten der Explosionskenngrößen der Einzelkomponenten und ihrer hybriden Gemische bei Stickstoff-Inertisierung. Die Sauerstoff-Grenzkonzentration des Staubes liegt mit 15.5 Vol% deutlich höher, als diejenige des Brenngases mit 10 Vol%.

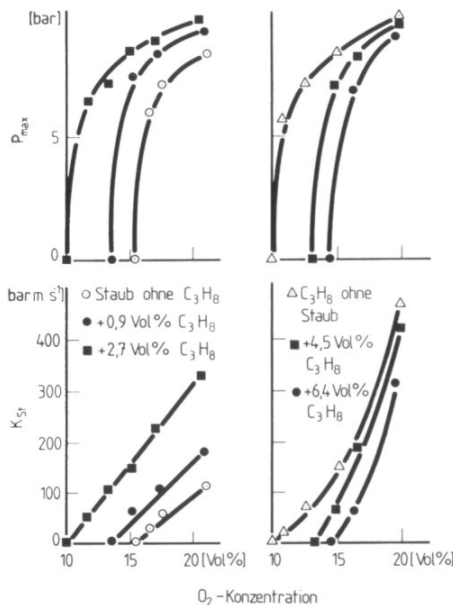


Abb.2.51: Explosionskenngrößen hybrider Gemische aus Erbsenmehl und Propan

- V = 1 m³, E = 10 kJ -

Die Reduzierung des Sauerstoffgehalts bewirkt, unabhängig vom Propangehalt, zunächst geringe und im Bereich der Sauerstoff-Grenzkonzentration eine sprunghafte Veränderung des maximalen Explosionsüberdruckes p_{max} . Sie beeinflusst, wie beim alleinigen Vorhandensein von Staub, die staubspezifischen Kenngrößen K_{St} linear, wenn die Propankonzentration im Bereich der unteren Explosionsgrenze liegt, und nähert sich wie beim alleinigen Vorhandensein von Propan asymptotisch der Abszisse, wenn die Brenngas-zumischung hochprozentig ist.

Insgesamt ist festzustellen (Abb.2.52), dass sich die Sauerstoff-Grenzkonzentrationen der brennbaren Stäube auf diejenigen des zusätzlich vorhandenen Propan zu bewegen, um sich dann, bei höheren Brenngaskonzentrationen, von diesen wieder zu entfernen. Der Propanwert wird um so eher erreicht, je niedriger der Sauerstoff-Grenzwert des brennbaren Staubes ist.

Dies kann bereits bei Propangehalten unterhalb der unteren Explosionsgrenze (Antioxidant, Cellulose) der Fall sein.

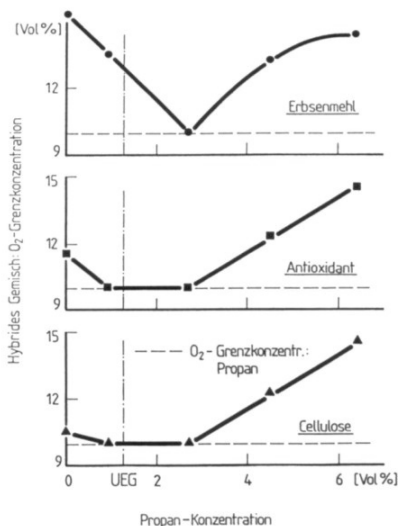


Abb.2.52: Sauerstoff-Grenzkonzentration von hybriden Gemischen in Stickstoff aus brennbaren Stäuben mit Propan in Abhängigkeit von der Propankonzentration

- V = 1 m³, E = 10 kJ -

Obige Feststellung gilt ganz allgemein, und zwar für das gleichzeitige Vorhandensein sowohl von beliebigen brennbaren Stäuben als auch von beliebigen Brenngasen (brennbaren Lösungsmitteldämpfen).

Wiemann bestätigte die bisherigen Erkenntnisse. Er untersuchte ebenfalls im 1m³-Behälter den Einfluss, den die Temperatur auf die

Sauerstoff-Grenzkonzentration von hybriden Gemischen aus Kohle und Methan nimmt (Abb.2.53). Beide Staubarten haben in normaler Verbrennungsluft nahezu den gleichen Sauerstoff-Grenzwert, der, unabhängig von der Temperatur, mit zunehmendem Methangehalt linear abfällt und etwas oberhalb der jeweiligen temperaturbezogenen unteren Explosionsgrenze von Methan dessen Sauerstoff-Grenzkonzentration erreicht.

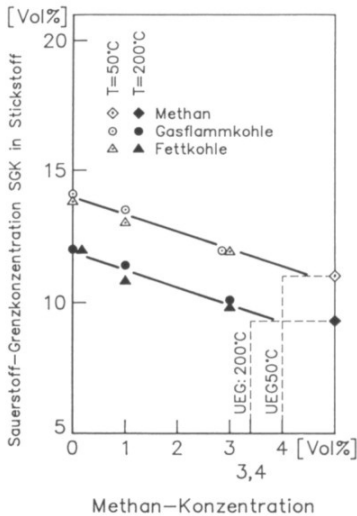


Abb.2.53: Sauerstoff-Grenzkonzentration von hybriden Gemischen in Stickstoff aus Kohle und Methan als Funktion der Methankonzentration und der Temperatur T

- V = 1 m³, E = 10 kJ -

Zusammenfassend ist festzustellen: Bei hybriden Gemischen aus brennbarem Staub mit brennbaren Gasen oder Dämpfen ist die Sauerstoff-Grenzkonzentration bestimmt durch den Brennstoff mit dem niedrigsten Grenzwert. Es ist also für die Praxis nicht notwendig, den Sauerstoff-Grenzwert eines hybriden Gemisches in einem Inertgas zu bestimmen, wenn die Grenzwerte der Einzelkomponenten bekannt sind.

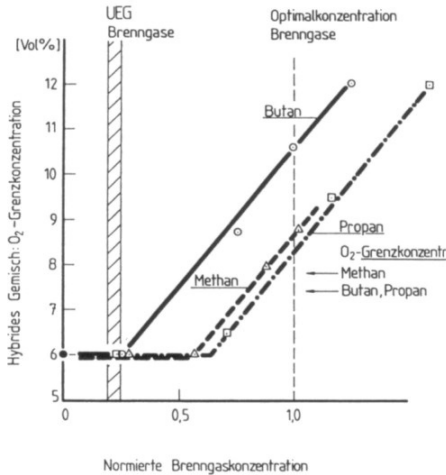


Abb.2.54: Sauerstoff-Grenzkonzentration in Stickstoff von hybriden Gemischen aus Cellulose mit verschiedenen Brenngasen als Funktion der normierten Brenngaskonzentration

- 20 I-Laborapparat, E = 10 kJ -

Die Allgemeinaussagen zu Abb.2.53 (1m³-Behälter, E = 10 kJ) gelten auch für die **20 I-Laborapparat** (Abb.2.54), wobei zu Vergleichszwecken die Brenngas-Konzentrationsangaben auf die Optimalkonzentrationen für die maximalen Explosionskenngrößen normiert wurden.

Bei dieser Darstellung ist allerdings zu beachten, dass in der 20 I-Laborapparat bei der vorgegebenen Zündenergie

- Cellulose mit 6 Vol% O₂ in N₂ eine deutlich niedrigere Sauerstoff-Grenzkonzentration als im 1m³-Behälter hat, nämlich 10.5 Vol% in N₂ und dass
- die Abnahme des Grenzwertes auch für die Brenngase gilt (Tabelle 2.14)

Tabelle 2.14: Einfluss der Zündenergie E auf die Sauerstoff-Grenzkonzentration SGK in N₂ von Brenngasen in der 20 I-Laborapparat

V [m³]	1,0	0,02
Brenngas	SGK [Vol%]	
Propan	11.8	7,6
Butan	12.1	7,6
Methan	12.0	8,0

In der Praxis verwendbare Grenzwerte für hybride Gemische werden daher nur dann in der 20 l-Laborapparatur erhalten, wenn

- die Sauerstoff-Grenzkonzentration des brennbaren Staubes nach Vorschrift (siehe. Abb.2.34) bei zwei Prüfungen $E \leq 250$ J mit anschließender Extrapolation auf $E = 10$ kJ ermittelt wird und wenn
- die Sauerstoff-Grenzkonzentration des zusätzlich vorhandenen brennbaren Gases (Lösungsmitteldampfes) in Gegenwart einer Prüfzündenergie von $E = 10$ J bestimmt wird.

Der Grenzwert der Komponente mit dem Niedrigstwert ist dann die Sauerstoff-Grenzkonzentration des hybriden Gemisches.

Ansonsten gelten die im Abschnitt 2.2.3 für die brennbaren Stäube gemachten Ausführungen für die Überwachung der höchstzulässigen Sauerstoff-Grenzkonzentration in Anlagen, die durch die vorbeugende Schutzmassnahme „Inertisierung“ abgesichert sind, **auch für hybride Gemische.**

2.3 Vermeiden von wirksamen Zündquellen

2.31 Vorbemerkung

Explosionen können nur dann entstehen (Abb.2.3), wenn ein brennbarer Stoff, Luft-Sauerstoff und eine wirksame Zündquelle gleichzeitig auftreten. Sie können daher verhindert werden, wenn es gelingt, Zündquellen zu vermeiden, die aufgrund ihrer Eigenschaften, z.B. Energie, Temperatur und Einwirkdauer, in der Lage sind, Brennstoff/Luft-Gemische zu entzünden. Die Frage nach den in der Praxis möglichen Zündquellen hat schon immer eine wichtige Rolle gespielt und wird in den Fachgremien häufig diskutiert.

Die Anwendung der Schutzmassnahme „Vermeiden von wirksamen Zündquellen“ setzt unter Berufung auf den Inhalt der VDI Richtlinien gute Kenntnisse voraus und muss begründet sein. In diesem Zusammenhang ist zu unterscheiden zwischen:

- **Trivialen Zündquellen** (z.B. unbefugtes Rauchen, Schweißen, Schneiden, Umgang mit offenen Flammen) und
- gegenüber dem normalen Betriebsablauf **bei Betriebsstörungen zu erwartende Zündquellen** (z.B. Fremdkörper oder Stiftbruch in Mühlen, Glimmnester).

Die **trivialen Zündquellen** können in einem modern geführten Betrieb durch organisatorische Massnahmen (z.B. Erlaubnisschein) sicher ausgeschlossen werden. Gelingt dies auch für die betriebsüblich zu erwartenden Zündquellen, z.B. durch explosionsgeschützte bzw. staubexplosionssgeschützte elektrische Anlagen und Betriebsmittel, Einhaltung sicherheitstechnisch vorgegebener Temperaturen, einwandfreie elektrostatische Erdung und durch die Nichtverwendung von mechanischen Antrieben mit hoher Drehzahl bzw. hoher Leistung, so wird dies nach dem Stand der Erkenntnisse als ausreichende Schutzmassnahme gegen das Entstehen von Explosionen angesehen. Für jede Anlage muss daher geprüft werden, mit welchen Zündquellen zu rechnen ist, und ob sie sicher ausgeschaltet werden können. Hierzu zählen die in den Explosionsschutz Richtlinien angegebenen 13 Zündquellenarten. Im folgenden werden die bedeutsamen Zündquellen charakterisiert.

2.32 Mechanisch erzeugte Funken

Während über die Häufigkeit des Auftretens von mechanisch erzeugten Funken als Zündquelle für Brenngas- bzw. Lösungsmitteldampf-Explosionen keine verlässlichen Angaben vorhanden sind, werden sie in der staubverarbeitenden Industrie zu knapp 30 % nach heutigem Wissensstand als Ursache für Staubexplosionen angesehen.

Über den Zündmechanismus bzw. die Zündwirksamkeit von solchen Funken in Brennstoff/Luft-Gemischen gibt es nur einen begrenzten Wissensstand. Daher fällt es schwer zu entscheiden, ob und unter welchen Bedingungen in der Praxis mit einer Gemischentzündung durch mechanisch erzeugte Funken zu rechnen ist. Es war daher zwingend erforderlich für die Beantwortung dieser so wichtigen Frage den experimentellen Weg einzuschlagen.

Wolfgang Bartknecht

- 80 - 2.32 Mechanisch erzeugte Funken

Die Zündversuche, **im allgemeinen bei Raum- aber auch bei überhöhter Temperatur**, erfolgten in einem explosionsfesten 38 l-Behälter mit einem Höhen/Durchmesser-Verhältnis $H/D = 1.2$. Zahlreiche mit Flanschen versehene Durchführungen im Behältermantel dienten der Aufnahme der Messtechnik und der speziellen Halterungen für die Einrichtungen zur Erzeugung von mechanischen Funken im Innern des Behälters. Für **das Arbeiten bei überhöhter**

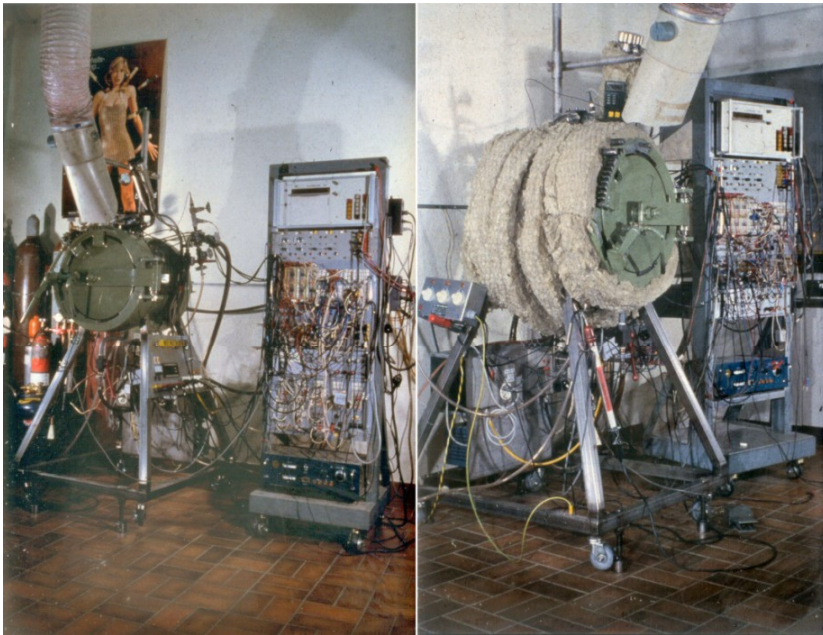


Abb.2.55: Explosionsfeste 38 l-Apparatur für die Untersuchung der Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken in Brennstoff/Luft-Gemischen bei Raum- (links) und bei überhöhter Temperatur (rechts).

Temperatur wurde der Explosionsbehälter mit Ausnahme des beweglichen Verschlussdeckels mit Elektrothermal-Bändern umwickelt und die Temperaturregelung über einen stufenlosen Intervallgeber mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ vorgenommen. Diese Anordnungen ermöglichte das Arbeiten bis zu Innentemperaturen von 100°C (s. Abb.2.55).

Die vollautomatische Steuerung des Versuchsablaufs wurde mittels eines programmierbaren Steuergerätes mit Steckplatte vorgenommen. Das Gerät erlaubt beliebige Steuerprogramme für den

Versuchs- und Messablauf, aber auch einen handgesteuerten Ablauf.

Brenngase wurden über Nadelventile (Abb.2.56) dem Behälterinnern zugeführt. Die Herstellung der Gemische erfolgte nach dem bekannten **Partialdruckverfahren**. Die Zusatzleitungen dienten der Be- und Entlüftung, sowie der Gemischentspannung. Kontrollversuche mit dem leeren Behälter mit den Gemischen mehrerer Brenngase ergaben die erwarteten Werte für die **Explosionsgrenzen** (s.Tab.1.1) und die **maximalen Explosionskenngrossen** (s.Tab.1.5).



Abb.2.56: 38 l-Behälter: Nadelventile für die Brenngaszuführung mit Kabelverbindungen

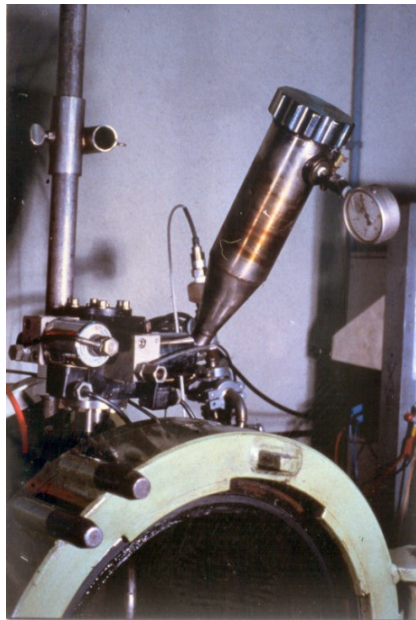


Abb.2.57: 38 l-Behälter: 0.9 l Staubvorratsbehälter mit Schnellöffnungsventil.

Die **Staubuntersuchungen** erfolgten nach dem Normverfahren (s.Abb.1.102 / Abb.1.108): Rasches Ausbringen von Staub aus einem unter 20 bar Luftdruck stehenden **0.9 l Staubvorratsbehälter** (Abb.2.57). Kontrollversuche mit einer Reihe von brennbaren Stäuben ergaben

- Übereinstimmung mit den erwarteten Werten für die maximalen Explosionskenngrossen **homogener Staubwolken** (Tabelle 1.27) wenn die Zündverzögerung zwischen der Staubeingabe

und dem Wirksamwerden der Normzündquelle ($E = 10 \text{ kJ}$) $t_v = 80 \text{ ms}$ und

- Übereinstimmung mit den erwarteten Mindestzündenergiewerten (Tabelle 1.36) wenn die Zündverzögerung zwischen der Staubeingabe und dem Wirksamwerden einer zeitlich gedehnten Kondensatorentladungen $t_v = 150 \text{ ms}$ (niedrige Gemischturbulenz) betrug.
- Die **Berechnung der Staubkonzentration** erfolgt im allgemeinen aus der in einem Explosionsbehälter eingegebenen Staubmenge. Es bleibt also unberücksichtigt, ob der Staubvorratsbehälter beim Wirksamwerden der der Zündquelle entleert ist oder nicht. Die Entleerungszeit hängt jedoch vom Schüttgewicht der Produkte ab, wie Abb.2.58 am Beispiel von Lycopodium ($\gamma = 367 \text{ kg/m}^3$) und Kohlenstaub ($\gamma = 530 \text{ kg/m}^3$) zeigt.
- Die **tatsächliche Staubkonzentration** und ihre Abhängigkeit von der Zündverzögerungszeit wurde unter anderem nach der **Absaugmethode** (Abb.2.59) gemessen: Absaugen von Staub aus dem Zündquellenbereich mittels Tubus zu einem vorgegebenen Zeitpunkt.

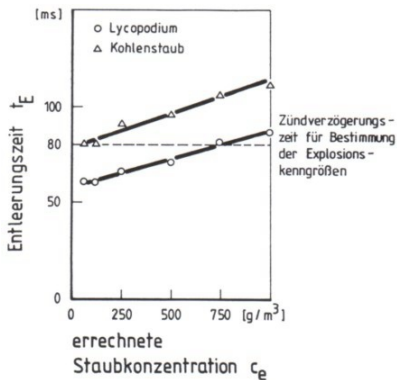


Abb.2.58: 38 l-Behälter: Zusammenhang zwischen errechneter Staubkonzentration c_e und der Entleerungszeit t_e des 0.9 l Staubvorratsbehälters.

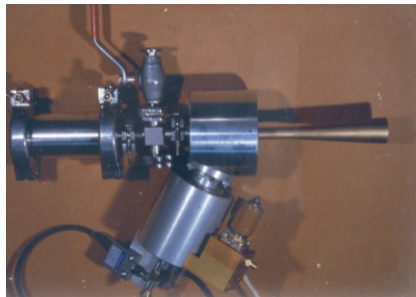


Abb.2.59: Staubkonzentrationsmessgerät „Absaugmethode“

- Abb.2.60 vergleicht für zwei brennbare Stäube die im Zündquellenbereich des 38 l-Behälters nach der Absaugmethode gemessene Staubkonzentration c_g mit der errechneten c_e und der Zündverzögerungszeit t_v als zusätzlichem Parameter. Die Ge-

mischerturbulenz ist in dem interessierenden Bereich von $t_v = 80$ - 150 ms im Rahmen der Messgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung, so dass davon auszugehen ist, dass Mess- und Rechenwerte im Rahmen der Versuchsgenauigkeit übereinstimmen.

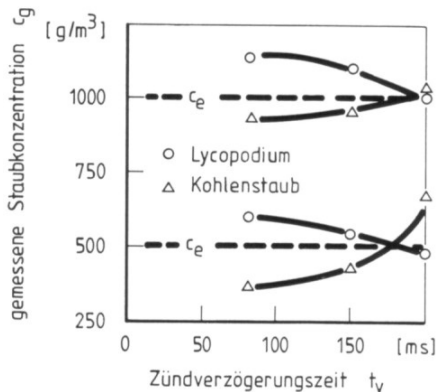


Abb.2.60: 38 I-Behälter: Zusammenhang zwischen gemessener Staubkonzentration c_g und Zündverzögerungszeit t_v einerseits und zwei errechneten Staubkonzentrationen c_e andererseits

Damit ist nachgewiesen, dass die für die Untersuchung der Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Funken in Brennstoff/Luft-Gemischen vorgesehene 38 I-Apparatur (Abb.2.55) für die Lösung der vorgegebenen Aufgabenstellung geeignet ist.

Um die Zündwirksamkeit solcher mechanisch erzeugten Funken in Brennstoff/Luft-Gemischen beurteilen und vergleichen zu können, ordnet man ihnen eine **elektrische Äquivalentenergie E_A** zu, die von der Funkenart und von der Zündtemperatur des Brennstoffes abhängt. Hierunter ist diejenige Energie einer zeitlich gedehnten Kondensatorentladung zu verstehen (s. Teil 1, Kap. 2.2.1.5 und 2.2.2.3.6), die die gleiche Zündwirksamkeit in einem vorgegebenen Brennstoff/Luft-Gemisch hat wie ein bestimmter mechanischer Funken.

Besonders deutlich wird dies bei der Beschreibung der

Zündwirksamkeit von Zündstein-Reibfunken:

Diese Funkenart entsteht bei einmaliger Betätigung eines Mag-

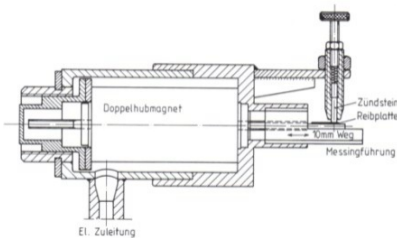


Abb.2.61: Anordnung für die Erzeugung von Zündstein-Reibfunken (schematische Darstellung) neten im Vorwärtshub beim durch Vorbeiziehen der Reibfläche (Schlichtfeile) am festgehaltenen Zündstein (Abb.2.61). Optimale Funkenhelligkeit ergibt sich bei einer Anpresskraft von $p_A = 9 \text{ kp}$ (Abb.2.62).

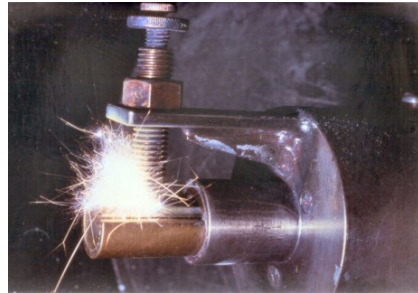


Abb.2.62: Zündstein-Reibfunken optimaler Helligkeit

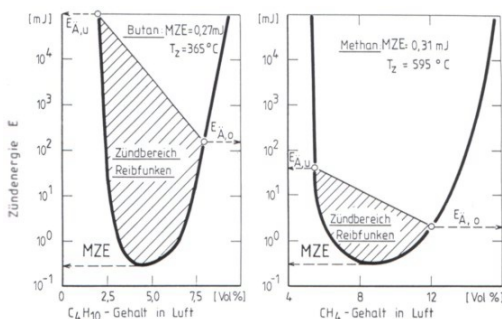


Abb.2.63: Definition der elektrischen Äquivalentenergie $E_{\bar{A}}$ von Zündstein-Reibfunken in Brenngas Luft-Gemischen

Abb.2.63 links zeigt für **Butan** den Zusammenhang zwischen der elektrischen Zündenergie E und dem Brenngasgehalt, in den der Zündbereich des Zündstein-Reibfunken eingezeichnet ist. Man erhält somit für diese Funkenart im unterstöchiometrischen Bereich eine elektrische Äquivalentenergie von $E_{\bar{A},u} = 10^5 \text{ mJ}$ und im oberstöchiometrischen Bereich eine solche von $E_{\bar{A},o} = 2 \times 10^2 \text{ mJ}$.

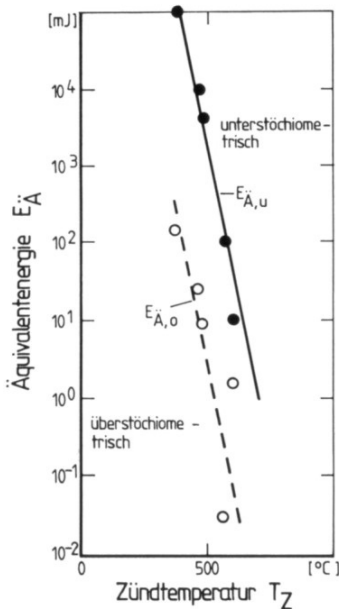


Abb.2.64: Zündstein-Reibfunken in Brenngas/Luft-Gemischen: Elektrische Äquivalentenergie $E_{Ä}$ als Funktion der Zündtemperatur T_Z

- optimale Funkenhelligkeit -

Die Reduzierung der Zündwirksamkeit dieses mechanischen Funkens bei hohem Brenngasanteil ist durch die Verminderung des Sauerstoffanteils im Gemisch zu erklären, die die Funkenverbrennung beeinträchtigt. Weil **Methan** bei annähernd gleicher Mindestzündenergie MZE eine deutlich höhere Zündtemperatur T_Z als Butan hat, sind die elektrischen Äquivalentenergien deutlich niedriger (Abb.2.63, rechts). Dies bedeutet, dass Methan/Luft-Gemische durch Zündstein-Reibfunken schwerer entzündbar sind, als **Butan/Luft-Gemische**. Der Einbezug der Untersuchungsergebnisse mit weiteren Brenngasen führt zu dem in Abb.2.64 dargestellten eindeutigen Zusammenhang zwischen der elektrischen Äquivalentenergie $E_{Ä}$ des Zündstein-Reibfunkens und der Zündtemperatur T_Z der Brenngase.

In halblogarithmischer Darstellung existieren zwei Zündgrenzgeraden, und zwar sowohl für den unterstöchiometrischen, als auch für den überstöchiometrischen Bereich, von denen erstere für die Beurteilung der Zündwirksamkeit des mechanisch erzeugten Funkens von besonderer Bedeutung ist.

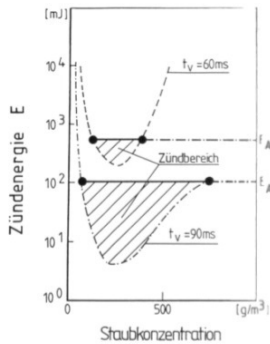


Abb.2.65: Definition der elektrischen Äquivalentenergie E_A von Zündstein-Reibfunken in Lycopodium-Staub/Luft-Gemischen.

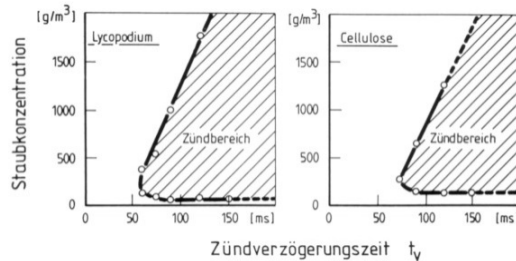


Abb.2.66: Einfluss der Zündverzögerungszeit t_v (Gemischturbulenz) auf den Zündbereich von Zündstein-Reibfunken in Staub/Luft-Gemischen

Bei **Staub/Luft-Gemischen** wird bedingt durch das Versuchsvorgehen das Sauerstoff/Stickstoff-Verhältnis nicht verändert: **Die Zündgrenzgeraden verlaufen horizontal, die elektrische Äquivalentenergie ist damit unabhängig von der Staubkonzentration (Abb.2.65), aber der Zündbereich hängt von der Gemischturbulenz d.h. von der Zündverzögerungszeit t_v ab, der in schwach turbulenten Gemischen ($t_v \geq 150$ ms) besonders breit ist.** Wie zu erwarten sind Staub/Luft-Gemische in diesem Fall besonders entzündungswillig (Abb.2.66).

Abb.2.67 gibt die elektrischen Äquivalentenergien E_A von Zündstein-Reibfunken sowohl für die Brenngase (unterstöchiometrisch) als auch für die brennbaren Stäube in Abhängigkeit von der Zündtemperatur T_Z der Brennstoffe an.

In halblogarithmischer Darstellung ist im Rahmen der Versuchsgenauigkeit unabhängig von der Art des Brennstoffs nur eine Zündgerade existent, die für den Zündstein-Reibfunken den Zusammenhang zwischen elektrischer Äquivalentenergie und Brennstoff-Zündtemperatur beschreibt.