

**Fachhochschule für Technik  
Mannheim**

**Bestimmung der Mindestzündenergie  
von Staub/Luft-Gemischen  
in Abhängigkeit von Klimaparametern**

**Diplomarbeit**

**eingereicht von :** Bernd Drechsler  
Christian-Müller-Str. 14  
6780 Pirmasens 22

**Matrikel - Nr. :** 73201

**Studiengang :** Verfahrenstechnik

**Erstellungszeitraum:** 1.03.1991 - 30.08.1991

**Erstellungsort:** Berufsgenossenschaft für  
Nahrungsmittel und Gaststätten  
in Mannheim

**Betreuung:** Dipl.-Ing. Albrecht Vogl, BGN  
Prof. Dr.-Ing. W. Fritz, FHT

**Einreichungsdatum:** 12.09.91

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit, über die Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit von Klimaparametern, entstand in der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BNG) in Mannheim im Forschungsbereich Explosionsschutz. Die hierzu notwendigen Tätigkeiten wurden im Zeitraum von März bis August 1991 durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich besonders dem Forschungsleiter Herrn Dipl.-Ing. Albrecht Vogl für die Aufgabenstellung und Betreuung seitens der Berufsgenossenschaft danken. Herr Vogl hat durch seine fachkundige Unterstützung maßgeblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenfalls Dank sagen möchte ich allen Mitarbeitern, die im Bereich der Forschung tätig sind, insbesondere Herrn Seithel, Herrn Schreiner, Herrn Triebkorn, Herrn Ott und Herrn Kleinhans, die mir bei auftauchenden Problemen weiterhelfen konnten.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Fritz für die Betreuung seitens der FHT Mannheim und das entgegengebrachte Interesse an dieser Arbeit.

Mannheim, den 12. 09. 1991

Bernd Drechsler

---

**Erklärung**

Hiermit erkläre ich, die vorstehende Arbeit, mit Ausnahme der kenntlich gemachten Stellen, selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt zu haben.

Mannheim, den 12. 09. 1991

*Bernd Drechsler*

Inhaltsangabe	Seite
1. Einleitung .....	1
2. Entwicklung und Aufbau der Versuchsapparatur .....	8
2.1 Vorbemerkung .....	8
2.2 Meß- und Regeltechnik .....	9
2.3 Aufbau der Apparatur.....	12
2.4 Kondensatorentladungsapparatur .....	17
2.5 Induktivität.....	20
3. Voruntersuchungen bei Laborbedingungen .....	21
3.1 Probenvorbereitung .....	21
3.2 Produkte .....	24
3.3 Versuchsablauf.....	28
3.4 Physikalische Kennzeichnung der Staubeigenschaften .....	29
3.4.1 Staub als disperser Stoff .....	29
3.4.2 Verbrennungsvorgänge von Staub/Luft-Gemischen .....	33
3.5 Einfluß der Turbulenz .....	36
3.6 Ermittlung der Zündverzögerungszeit $t_v$ .....	38
4. Hauptuntersuchungen unter definierten Klimabedingungen .....	43
4.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen .....	43
4.1.1 Klimakammer .....	43
4.1.2 Einsatz der Versuchsapparatur in der Klimakammer .....	48
4.2 Produktspezifische Untersuchungen .....	51
4.2.1 Trocknung .....	51
4.2.2 Feuchtigkeitsaufnahme .....	54
4.3 Versuchsergebnisse .....	57
4.3.1 Vorbemerkung .....	57
4.3.2 Einfluß der Luftfeuchte .....	58
4.3.3 Einfluß der Temperatur .....	60
4.3.4 Einfluß der Produktfeuchte .....	63
5. Diskussion der Ergebnisse .....	65
6. Schlußbetrachtung .....	69
7. Zusammenfassung .....	71
8. Formelzeichen .....	72
9. Literaturverzeichnis .....	73
10. Anhang .....	76

## 1. Einleitung

Die Berufsgenossenschaften sind die Träger der gesetzlichen Unfallversicherung. Die Berufsgenossenschaft (BG) ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts und untersteht der Aufsicht des Staates. Jeder Unternehmer ist verpflichtet, Mitglied in einer BG zu sein. Die BG's sind fachlich gegliedert und umfassen Unternehmen gleicher oder verwandter Gewerbebezüge.

Die Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) ist mit 1,5 Mio Versicherten in 285.000 Betrieben in der Bundesrepublik ( ohne die 5 neuen Bundesländer ) eine der größten BG's. Mitgliedsbetriebe sind Bäckereien, Gaststätten, Diskotheken, Hotels, Hersteller von alkoholischen und alkoholfreien Getränken, Mühlen und alle Produzenten von Nahrungsmittel und Genußmittel.

An der BNG werden u.a. auf den Gebieten Gefahrstoffuntersuchung, Lärm, Ergonomie, Biotechnologie und Staubexplosionen verschiedene Forschungsarbeiten durchgeführt.

In Laborexperimenten oder durch Simulationsexperimente im Maßstab 1:1 auf einem Versuchsgelände werden die Ursachen und Bedingungen untersucht, die zu Staubexplosionen führen. Aus diesen Erkenntnissen können dann geeignete Schutzmaßnahmen entwickelt bzw. verbessert werden.

Staubexplosionen sind seit etwa 200 Jahren bekannt, und zwar seit damit begonnen wurde das Getreide in Windmühlen zu mahlen. Mit zunehmender Industrialisierung stieg auch die Zahl der Staubexplosionen, hauptsächlich in Zusammenhang mit organischen Stäuben in Mühlen, Elevatoren, Silos, Stärkefabriken, Zuckerfabriken sowie in Anlagen, in denen z.B. Aluminium, Schokolade, Papier, Gummi oder Gewürze verarbeitet werden. Verheerende Ausmaße können Kohlestaubexplosionen in Bergwerken unter Tage annehmen. Fast ein Drittel aller Staubexplosionen ereignete sich in Zusammenhang mit Holzstäuben und jede Vierte Explosion in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie.[1]

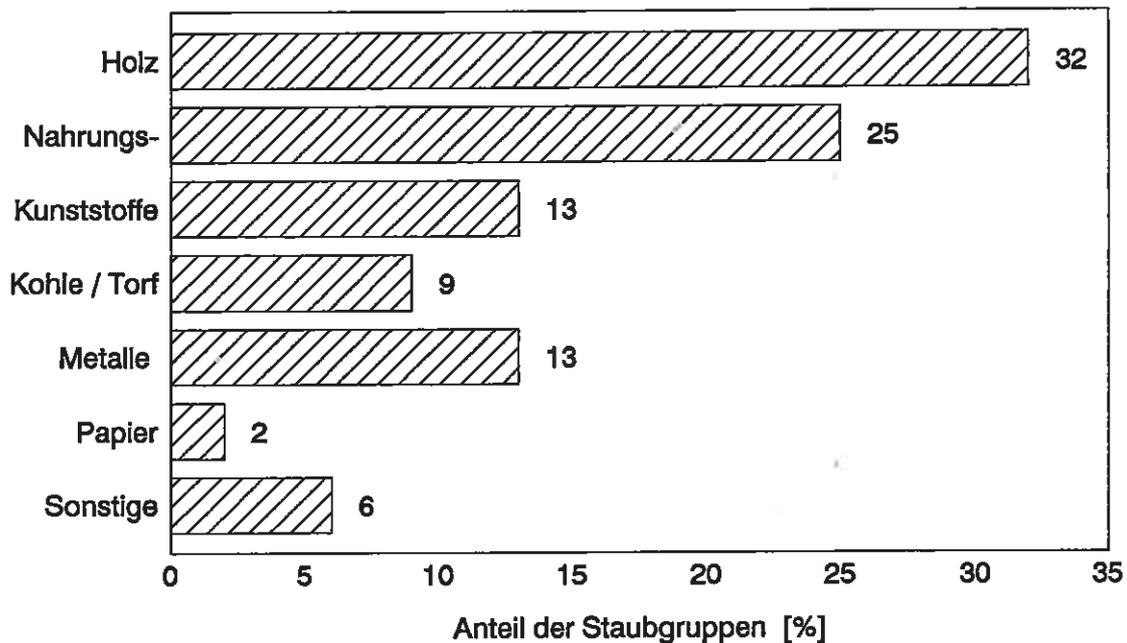


Abb. 1.1: Anteil der Anlagenruppen von Staubexplosionen (1965 - 1980)

Ausgewertet wurden 426 Staubexplosionen vom Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit (BIA). Diese stellten fest, daß Silos und Bunker mit 20 % die am häufigsten betroffene Anlagegruppe, gefolgt von Abscheidern (Entstaubungsanlagen und Filter) und Mahlanlagen mit jeweils 14 % und Förderanlagen (z.B. Elevatoren) mit 10 % beteiligt sind. Bei neu dokumentierten Fällen steigt der Anteil bei den Staubabscheidern auf 32 % an. Dies ist auf den vermehrten Einsatz aus Gründen des Arbeits- und Umweltschutzes zurückzuführen. [25]

Die meisten Staubexplosionen entstehen in der Nähe eines Arbeitsvorganges bei dem viel Staub anfällt, oder sie treten dann ein, wenn plötzlich größere Staubmengen aufgewirbelt werden. Fast jeder brennbare feste Stoff kann eine Staubexplosion hervorrufen, wenn er in feinen Teilchen und in hinreichender Konzentration in der Luft schwebt und gezündet wird. Die Mindestbedingungen für die Entstehung einer Explosion sind:

1. hinreichende Staubkonzentration
2. Sauerstoff, der den Verbrennungsvorgang aufrecht erhält
3. und gleichzeitig eine Zündquelle, die eine bestimmte Energie haben muß.

Staub ist die gefährlichste Form in der ein Feststoff in technischen Prozessen auftreten kann. Staub muß als eigenständige Phase mit sehr spezifischen Eigenschaften betrachtet werden. Man definiert Staub als die disperse Verteilung feinsten Partikel eines Feststoffes in einem Gas.

Bei einer Staubexplosion erfolgt eine spontane Oxidation des Feststoffes. Der hierfür erforderliche Sauerstoff wird mit der "Verbrennungsluft" zugeführt, wobei der Stickstoff als Ballast wirkt. Die Heftigkeit einer Explosion steigt mit zunehmender Feinheit der festen Partikel. Die Oberfläche, die für den Oxidationsprozeß wirksam ist, nimmt mit abnehmender Größe der Partikel immer mehr zu.

Der Ablauf explosiver Oxidationsprozesse ist von rein wissenschaftlicher Seite bislang nur in Ansätzen untersucht. Ein befriedigender Einblick in Staubexplosionen läßt sich daher nur auf der Grundlage umfassender experimenteller Untersuchungen gewinnen. Diese so ermittelten Kennwerte können zur Vermeidung von Explosionen oder zumindest zur Einschränkung ihrer Folgen beitragen.

Bei einer Staubexplosion ist die Flammenausbreitung auch immer mit einer Drucksteigerung verbunden. Diese Druckwelle zerstört häufig Räume und Einrichtungen. In der Abb. 1.2: sind die verheerenden Auswirkungen einer Getreidestaubexplosion zu sehen, die eine ganze Silogruppe zerstörte.

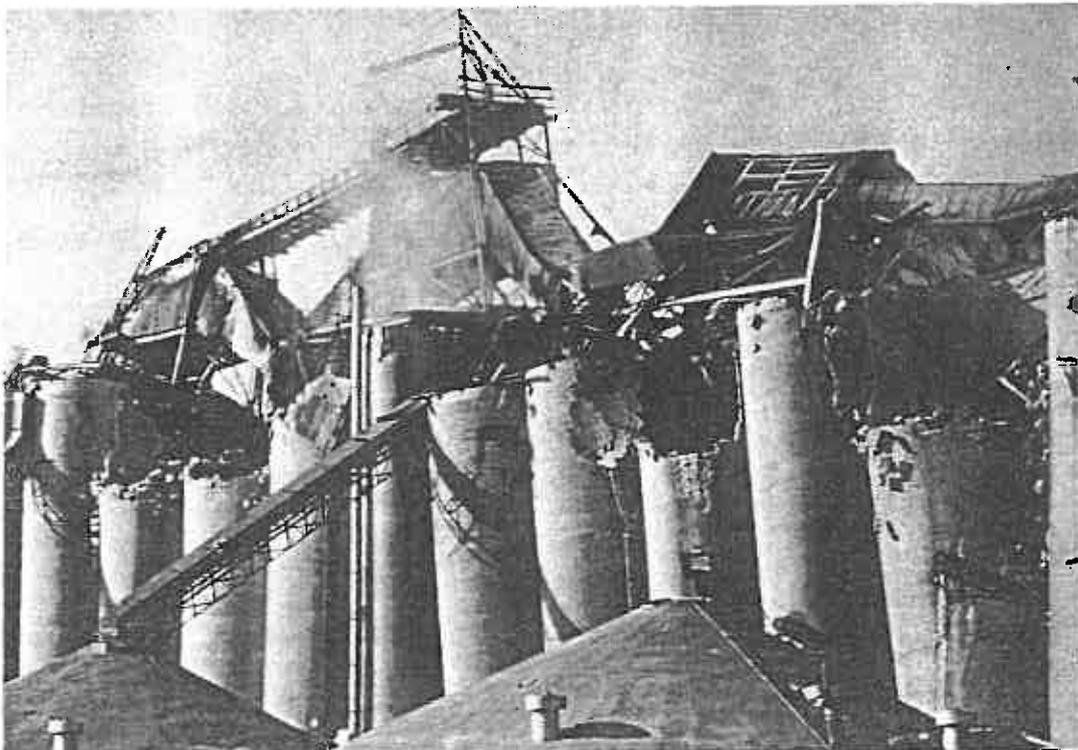


Abb. 1.2: Silogruppe nach einer Getreidestaubexplosion [1]

Eine Staubexplosion kann nur durch eine geeignete Zündquelle ausgelöst werden. Abb. 1.3 zeigt den prozentualen Anteil der Zündquellenarten als Ursache für Staubexplosionen.

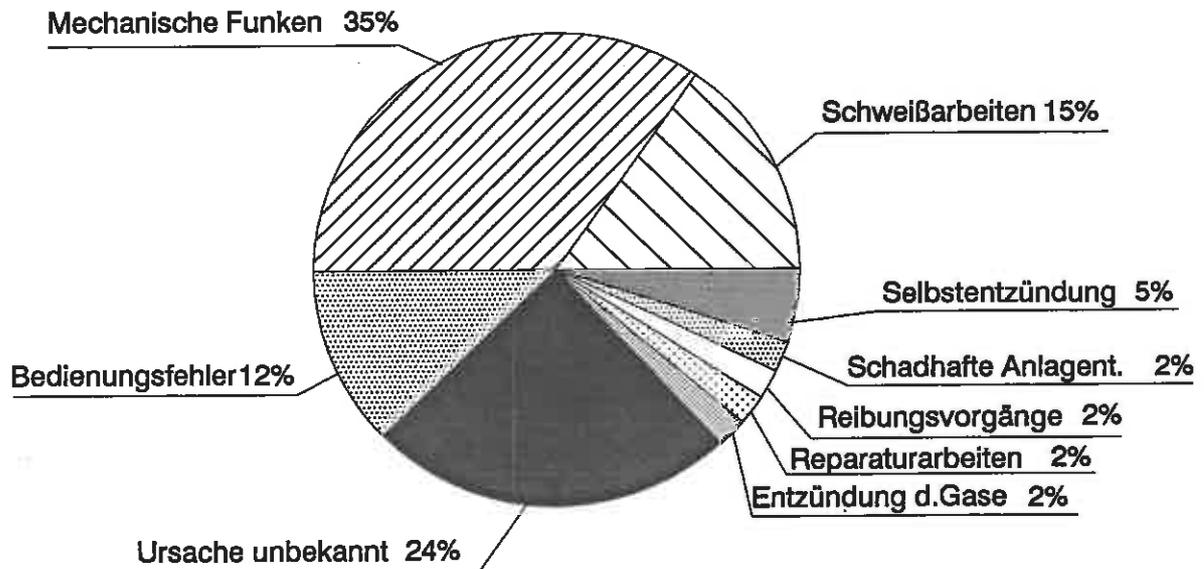


Abb. 1.3: Explosionsauslösende Faktoren [8]

Die tatsächliche Zündursache nach einer erfolgten Staubexplosion zu ermitteln ist meist recht schwierig. In der Industriepraxis sind mechanisch erzeugte Funken mit 35 % als häufigste Zündursache anzusehen. Hierunter fallen Reib-, Schleif- und Schlagfunken durch z.B. Fremdkörper im Fördergut. Viele Staubexplosionen sind aber auf menschliches Versagen - Leichtsin, Fahrlässigkeit, oder Gleichgültigkeit - zurückzuführen. Der relativ hohe Anteil von 24 % an unbekannter Zündursache läßt vermuten, daß die Entzündung von Staub/Luft-Gemischen durch elektrostatische Zündquellen ausgelöst wurde.

Nach den ersten Unglücksfällen, die im Jahre 1785 in Turin durch eine Mehlstaubexplosion ausgelöst wurde, begann man erst relativ spät, nämlich um 1875, mit den wissenschaftlichen Untersuchungen. Im Labormaßstab wollte man die Staubexplosionen künstlich erzeugen, und die dabei sich abspielenden Vorgänge gesetzmäßig erfassen. Schwierigkeiten bereitete das Erzeugen eines einigermaßen gleichmäßigen und reproduzierbaren Staub/Luft-Gemisches. Da diese Forderungen in kleineren Versuchsanordnungen am leichtesten erfüllbar schienen, wurden von den Forschern von der Frühzeit bis hinein in die Neuzeit

die wichtigsten Kenngrößen für die Beurteilung von Explosionsgefahren in solch kleinen Apparaturen von einigen Litern Inhalt gemessen. Diese bestanden meist aus Glas, um auch visuell die Homogenität des Staub/Luft-Gemisches kontrollieren zu können. [1]

Die Kenntniss entsprechender explosionstechnischer Kenngrößen ist für die sachgerechte Auswahl und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen erforderlich. Zum einen gibt es die vorbeugenden Explosionsschutzmaßnahmen, die das Eintreten von Explosionen verhindern sollen (z.B. Inertisierung), und zum anderen gibt es die konstruktiven Schutzmaßnahmen, die die Auswirkungen einer nicht vermeidbaren Explosion begrenzen (Explosionsfeste Bauweise, Druckentlastungen etc.). Die Kenngrößen müssen experimentell bestimmt werden, da eine Berechnung bislang nicht möglich ist. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind an speziell festgelegte Prüfverfahren gebunden, die praxisnah sein müssen oder eine Umsetzung der Prüfergebnisse in die Praxis gestatten. Zu den Zahlenwerten der so bestimmten Kenngrößen gehört deshalb in der Regel die Angabe der Bestimmungsmethode, die möglichst international genormt sein sollte, um bei Gegenüberstellungen vergleichende Betrachtungen anstellen zu können.

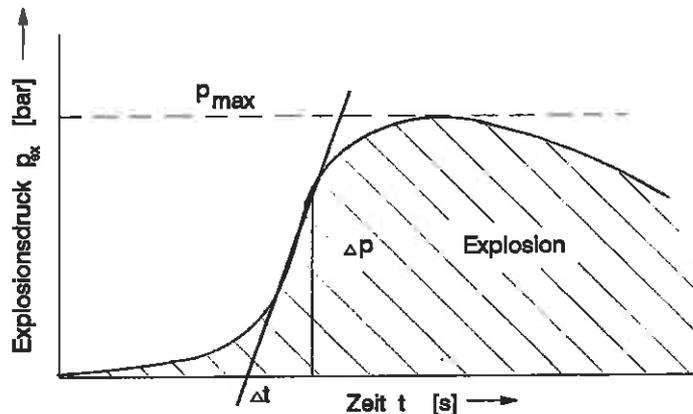
Wichtige Kenngrößen sind:

- Explosionsgrenzen
- Maximaler Explosionsdruck, maximaler zeitlicher Druckanstieg
- $K_{ST}$  - Wert
- Zündgrenzen
- Mindestzündenergie

Die *Explosionsgrenzen (Zündgrenzen)* beschreiben den Konzentrationsbereich von Staub/Luft-Gemischen, innerhalb dessen Explosionen möglich sind. Es existiert eine untere Explosionsgrenze  $Ex_u$  und eine obere Explosionsgrenze  $Ex_o$ . Jenseits der Explosionsgrenzen ist eine selbstständige Explosionsfortpflanzung im Gemisch nicht mehr möglich. Von besonderem Interesse für die Praxis ist die untere Explosionsgrenze  $Ex_u$ , die für viele technische Stäube zwischen 15 und 60 g/m<sup>3</sup> liegt. Die obere Explosionsgrenze  $Ex_o$  liegt im allgemeinen mit 2 bis 6 kg/m<sup>3</sup> sehr hoch.

Der *maximale Explosionsdruck* und der *zeitliche Druckanstieg* können in einem geschlossenen kugelförmigen Behälter von 20 Liter Inhalt ermittelt werden. Die Staubprobe wird aus einem Vorratsbehälter mit Druckluft über ein spezielles

Verteilssystem in die Explosionskammer eingeblasen und nach einer genau definierten Zündverzögerungszeit durch eine in Raummitte angeordnete Zündquelle zur Explosion gebracht. Als Zündquelle werden meist chemische Zünder mit einer Gesamtenergie von 10.000 J verwendet. Der Explosionsablauf wird in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet, und aus der Druck-Zeit-Kurve werden der Explosionsdruck und der zeitliche Druckanstieg ermittelt.



zeitlicher Druckanstieg  $\frac{dp}{dt} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$   
 maximaler Explosionsdruck  $p_{\max}$

Abb. 1.4: Zeit-Druck-Verlauf

Geht man von einem kleinen Behälter ( 20 l Kugel ) zu größeren geschlossenen Behältern über, so ist der maximale Explosionsdruck  $p_{\max}$  von der Volumenveränderung unbeeinflusst. Der maximale zeitliche Druckanstieg vermindert sich dagegen nach dem sogenannten kubischen Gesetz:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max,1} \cdot (V_1)^{1/3} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max,2} \cdot (V_2)^{1/3} = \text{konstant} = K_{St} \quad (1 - 1)$$

Der  $K_{St}$ -Wert ist eine prüf- und verfahrenstechnische, volumenunabhängige Kenngröße mit der Dimension  $[ \text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ]$

[1]

Diese Beziehung hat aber nur eingeschränkte Gültigkeit. Für die sicherheitstechnische Auslegung von Anlagen in der Praxis reicht sie aber meistens aus.

Zur Bestimmung der *Zündtemperatur* wird ein Staub/Luft-Gemisch in einen beheizbaren Rohrofen geblasen. Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur, bei der noch das Staub/Luft-Gemisch unter Flammenercheinung oder Knall entzündet wird. Diese liegt meist zwischen 200 °C und 600 °C.

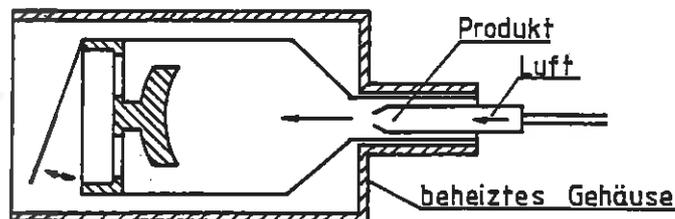


Abb. 1.5: Einrichtung zur Bestimmung der Zündtemperatur

Die *Mindestzündenergie* ist ein Maß für die Zündwilligkeit eines explosionsfähigen Gemisches und stellt somit eine wichtige Kenngröße für die Praxis des Explosionsschutzes dar. Sie wird bestimmt mit Hilfe elektrischer Kondensatorentladungsfunken, deren Energie auf einfache Weise durch Wahl der elektrischen Kapazität und Spannung des Entladestromkreises vorgegeben werden kann. Das Bestimmungsverfahren ist bisher in Europa nicht genormt, so daß unterschiedliche Meßverfahren zur Anwendung kommen. Gemeinsam ist allen Verfahren, daß nach Aufladung einer Kapazität diese über eine Funkenstrecke, die sich in einem Zündgefäß mit dem zu untersuchenden explosionsfähigen Gemisch befindet, entladen wird.

Unabhängig von der speziellen Meßapparatur ist die Mindestzündenergie durch folgende Festlegung definiert: Sie ist als die geringste im Entladestromkreis gespeicherte elektrische Energie zu bestimmen, die bei Entladung über eine Funkenstrecke - bei Variation sämtlicher Parameter des Entladestromkreises - das Gemisch zündwilligster Zusammensetzung gerade noch entzündet.[7]

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, die Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit von Klimaparametern zu bestimmen. Hierfür mußte eine geeignete Versuchsapparatur entwickelt werden.

Der Anlaß der Untersuchungen ist darauf zurückzuführen, daß die Häufigkeit von Staubexplosionen je nach Jahreszeit schwankt. Insbesondere in Zeiten niedriger Luftfeuchte sind häufiger Unglücksfälle zu verzeichnen als bei hoher Luftfeuchte.

## 2. Entwicklung und Aufbau der Apparatur

### 2.1 Vorbemerkung

Die Aufgabenstellung lautete, eine geeignete Versuchsapparatur zu entwickeln, mit der man die Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit von Klimaparametern bestimmen kann. Zurückgegriffen wurde auch auf die Empfehlungen der VDI-Fortschrittsberichte.[ 5 ]

Für die qualitative Vorprüfung von Stäuben auf Explosionsfähigkeit, wird ein Explosionsgefäß, die sogenannte " modifizierte Hartmannapparatur ", eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein vertikal angeordnetes Pyrex - Glasrohr von  $V = 1,2$  Liter Inhalt. Die Staubprobe wird auf dem Boden des Rohres angehäuft und mittels Luftstoß aufgewirbelt. Als Zündquelle dient eine Glühwendel oder eine Dauerfunkenstrecke. Die Befestigung der Glühwendel bzw. der Elektroden erfolgt durch zwei seitlich angebrachte Kunststoffbuchsen. Die Kondensator-entladungsapparatur arbeitet aber mit einer Dreifachfunkenstrecke. Für die drei Elektroden müssen entsprechende Durchführungen vorhanden sein. Für die kommenden Untersuchungen wurde deshalb ein speziell für diesen Zweck angefertigtes Glasrohr eingesetzt.

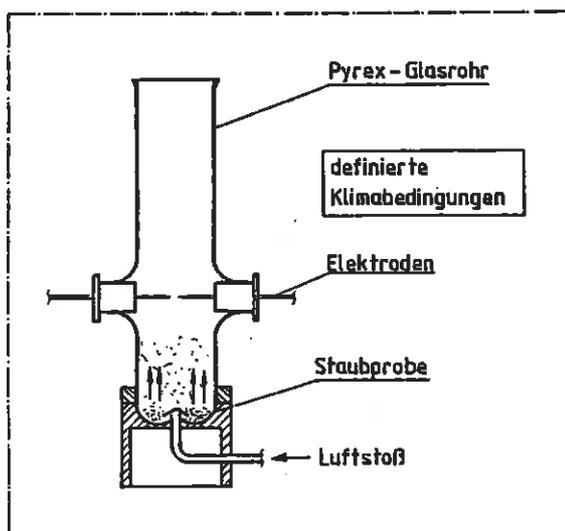


Abb. 2.1: Modifizierte Hartmannapparatur

Um die Abhängigkeit der Mindestzündenergie unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu untersuchen, muß die gesamte Apparatur in eine Klimakammer eingebaut werden. In dieser können, durch Veränderung der Temperatur und Luftfeuchte, definierte atmosphärische Bedingungen geschaffen werden. Um

die Meßergebnisse nicht zu verfälschen, sollte die Luft für die Aufwirbelung des Staubes nicht über die Preßluftleitung zugeführt werden. Eine Lösungsmöglichkeit bietet sich durch den Einsatz eines Druckluftzylinder, der die Luft aus der Klimakammer ansaugt. Wird nun der Zylinder in die Ausgangsposition zurückgefahren, entsteht ein Luftstoß, der so stark sein muß, daß die Staubaufwirbelung genau bis zum Glasrand reicht. Hierdurch kann eine definierte Staubkonzentration erreicht werden.

Weitere Überlegungen bestanden darin, eine möglichst übersichtliche Anordnung der Bauteile zu erhalten. Auch im Hinblick auf den späteren möglichen Dauereinsatz im Labor sollte die Apparatur bedienungsfreundlich gestaltet sein. (Drehhähne, Schalter, Reinigungsmöglichkeiten der Apparatur bzw. des Hartmannrohres). Desweiteren mußten die Abmaße der Klimakammer (s. Anhang 10.8 ) bei der Entwicklung der Apparatur berücksichtigt werden.

## 2.2 Meß- und Regeltechnik

Die Regelung erfolgt elektropneumatisch. Mit Hilfe eines Zeitsteuergerätes können die Pneumatikzylinder über Magnetventile angesteuert werden. Durch eine Verbindung des Zeitsteuergerätes mit der Hochspannungsanlage (s.Kap. 2.4) wird der Zündfunke nach einer genau definierten Zeit ausgelöst. Auf der nächsten Seite ist das Prinzipschaltbild der Versuchsapparatur mit der zugehörigen Steuerung abgebildet.

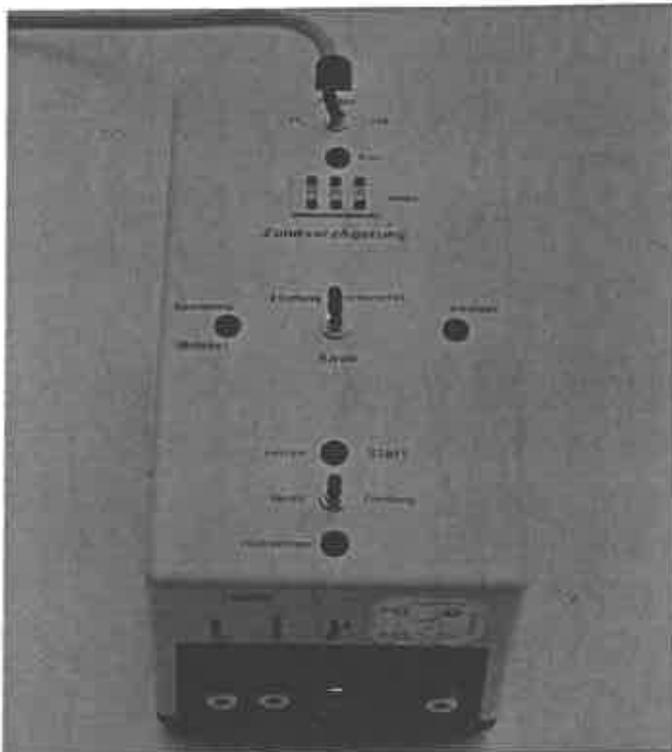


Abb. 2.2 : Zeitsteuergerät

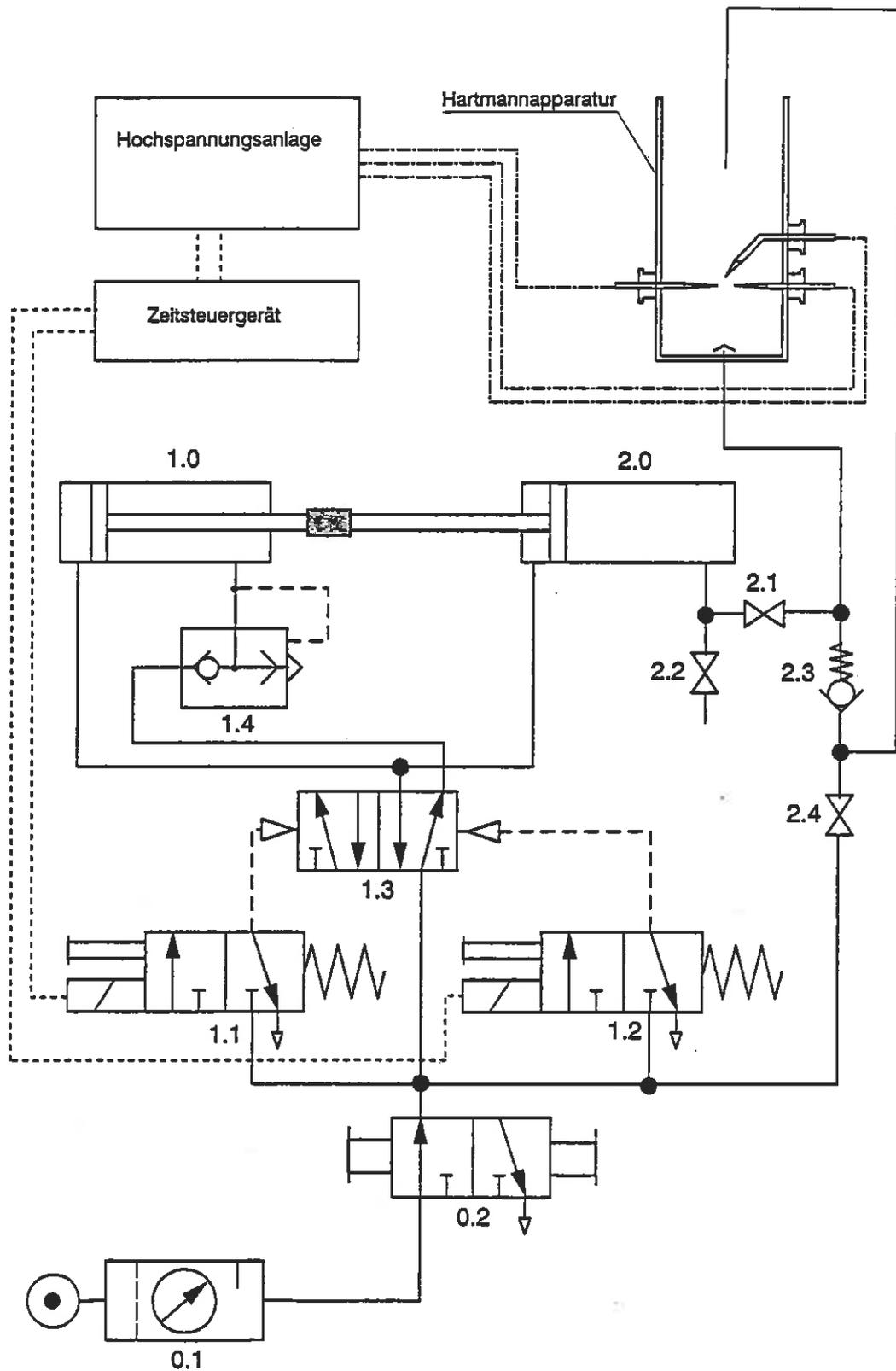


Abb. 2.3 : Prinzipschaltbild der Versuchsapparatur mit Steuerung

Die Funktionsweise der selbst aufgebauten pneumatischen Steuerung ist im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

An der Wartungseinheit 0.1 kann der Luftdruck bis auf  $p = 10$  bar eingestellt werden. Bei Versuchsbeginn wird mit dem Zeitsteuergerät ein elektronischer Impuls auf das Magnetventil 1.1 gegeben. Dies bewirkt, daß das Pneumatik-Impulsventil 1.3 mit Druckluft beaufschlagt wird und sich nach rechts bewegen kann. Hierdurch wird Druckluft in den Zylinder 1.0 und 2.0 gebracht. Die verdrängte Luft aus Zylinder 1.0 wird über ein Schnellentlüftungsventil abgegeben. Gleichzeitig entweicht Luft aus Zylinder 2.0. Hierbei muß das Ventil 2.1 geöffnet, und die Ventile 2.2 und 2.4 geschlossen sein.

Dieser Luftstoß ist ausreichend, um den Staub in dem Hartmannrohr aufzuwirbeln. Die Luftmenge ist so bemessen, daß die Staubaufwirbelung genau bis zum Glasrand reicht. Bei einer vorher abgewogenen Staubmenge kann nun eine immer wieder reproduzierbare Staub /Luft-Konzentration erreicht werden. Die Zündung des Staub/Luft-Gemisches erfolgt zu einem genau definierten Zündzeitpunkt, der durch Vorversuche experimentell ermittelt werden muß (s. Kap. 3.6)

Nach Zündung bzw. Nichtzündung des Staub/Luft-Gemisches müssen die Zylinder wieder in die Ausgangsposition gebracht werden. Zuvor wird aber das Ventil 2.1 geschlossen und das Ventil 2.4 geöffnet. Druckluft kann nun in das Hartmannrohr strömen, wobei die Elektroden von eventuellen Staub- bzw. Verbrennungsrückständen gereinigt werden.

Danach wird das Ventil 2.4 geschlossen. Durch Öffnen des Ventils 2.2 kann nun die Luft beim Zurückfahren des Zylinders 2.0 aus der Klimakammer angesaugt werden. Das Zurückfahren der Zylinder erfolgt wieder über das Zeitsteuergerät. Hierbei wird das Magnetventil 1.2 angesteuert. Das Pneumatik-Impulsventil wird in die Ausgangsstellung zurückgefahren. Druckluft strömt in den Zylinder 1.0 . Da der Zylinder 2.0 mit dem Zylinder 1.0 verbunden ist, wird auch dieser zurückgefahren.

Nach erfolgtem Öffnen des Ventils 2.1 und Schließen des Ventils 2.2 ist die Apparatur für den nächsten Versuch bereit.

Die genaue Bezeichnung der Steuerelemente und Antriebsglieder ist in Anhang10.1 zu finden.

### 2.3 Aufbau der Apparatur

Fertig geliefert wurden folgende Teile für die Versuchsapparatur:

- modifiziertes Hartmannrohr aus Glas
- Kunststoffbuchsen für Elektrodenhalterung
- Wolframelektroden
- Unterbau für Hartmannrohr mit Zerstäuberpils und Druckluftanschluß

Nach erfolgten Vorüberlegungen wurde mit dem Aufbau der Apparatur begonnen. Die benötigten Teile für die elektropneumatische Steuerung konnten leicht besorgt werden. Für eine Funktionsprobe wurden die Elemente nach dem Schaltplan zusammengebaut und an das Hartmannrohr angeschlossen. Danach wurde die Staubaufwirbelung im Hartmannrohr überprüft. Hierzu wird die Staubprobe um den Zerstäuberpils herum aufgeschüttet. Durch den Luftstoß wird der Staub aufgewirbelt. Dies erfolgte aber nicht zufriedenstellend, da die Staubwolke nur bis zur Hälfte des Glasrohres gelangte. Zurückzuführen war dies auf ein zu kleines Volumen des Zylinders 2.0, der für den Druckluftstoß zuständig ist. Dieser betreffende Zylinder mußte durch einen größeren ausgetauscht werden. Das Volumen des neuen Zylinders betrug  $V = 389 \text{ cm}^3$ . Bei den nachfolgenden Prüfungen konnte eine erfolgreiche Staubaufwirbelung verzeichnet werden.

Die Staubaufwirbelung wird zum Teil auch durch den Luftdruck, der für die pneumatische Steuerung zuständig ist, mitbestimmt. Bei einem zu geringen Druck werden die Zylinder nicht schnell genug bewegt, so daß der Luftstoß aus dem Zylinder 2.0 nicht ausreichend stark ist. Die besten Ergebnisse wurden bei einem Luftdruck von  $p_{\text{opt}} = 9 \text{ bar}$  erzielt.

Um reproduzierbare Staub/Luft-Gemische erhalten zu können, darf die Staubaufwirbelung bei verschiedenen Konzentrationen [ $c \approx (50-2000) \text{ g/m}^3$ ] immer nur bis zum Glasrand erfolgen. Durch das vorgegebene Volumen des Hartmannrohres kann nun durch entsprechendes Abwiegen der Staubprobe jede gewünschte Konzentration erhalten werden.

$$c = \frac{m}{V} \quad (2 - 1)$$

$c =$  Staubkonzentration [  $\text{g/m}^3$  ]

$m =$  Masse der Staubprobe [  $\text{g}$  ]

$V =$  Volumen des Hartmannrohres  $V = 1,2 \text{ l} = 1200 \text{ cm}^3 = 0,0012 \text{ m}^3$

Die Einzelteile der Steuerung und das Hartmannrohr wurden auf eine Preßspannplatte aufgeschraubt. Dadurch ergeben sich folgende Vorteile wie z.B. übersichtliche Anordnung, Bedienungsfreundlichkeit, gute Reinigungs- und Austauschmöglichkeit der Teile, etc. .

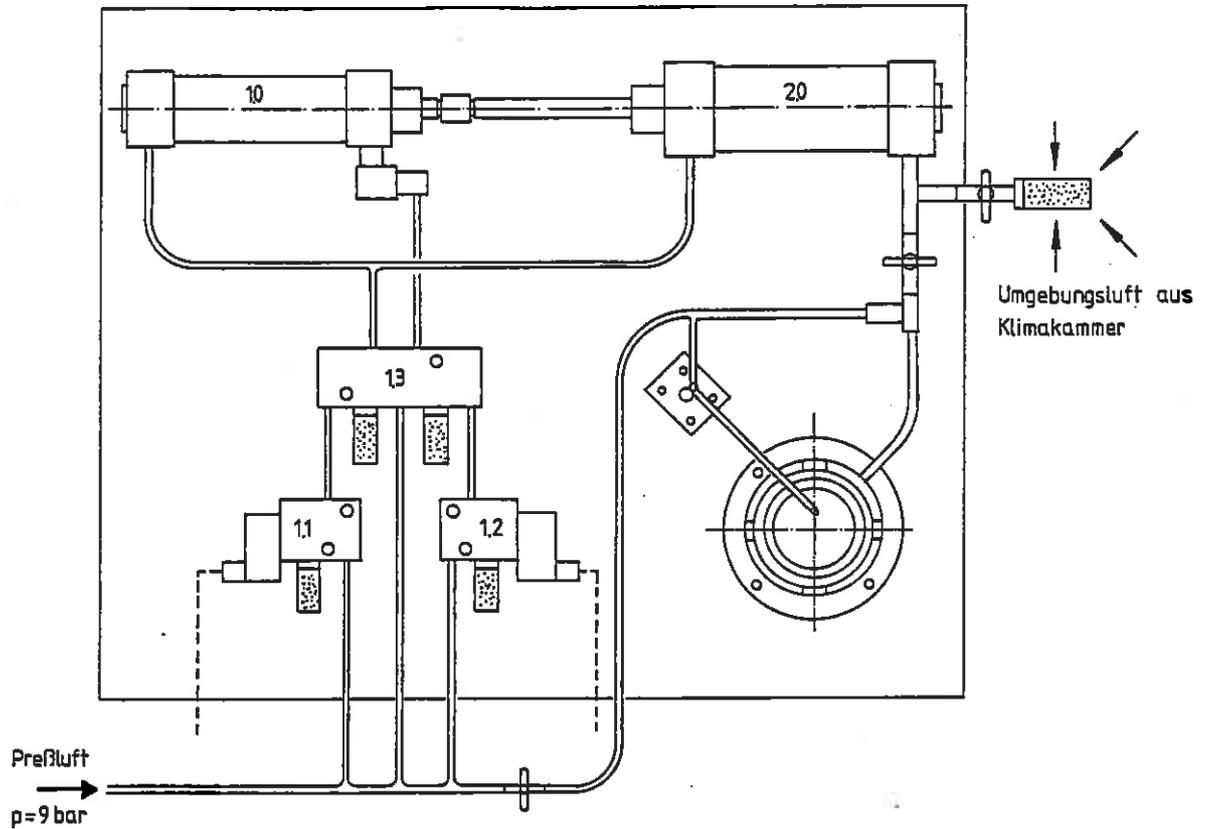


Abb. 2.4: Aufbau der Versuchsapparatur

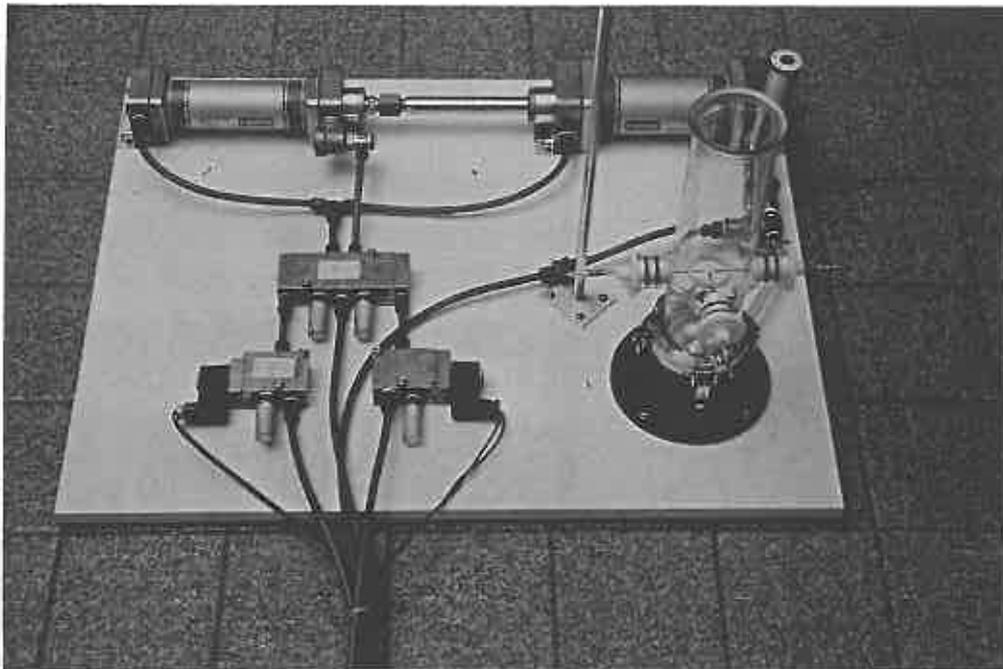


Abb. 2.5: Praktische Realisierung

Innerhalb des Glasrohres befinden sich die zueinander ausgerichteten Elektroden. Dadurch erhält man eine Dreifachfunkenstrecke, die aus einer Hilfsfunkenstrecke und einer Hauptfunkenstrecke mit einer gemeinsamen Elektrode besteht. Der *Elektrodenabstand* für den Hauptfunken ist auf 6 mm festgelegt. Die Hilfselektrode hat einen Abstand von der gemeinsamen Elektrode von 2 mm. Der *Elektroden Durchmesser* beträgt 2 mm. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, daß das *Elektrodenmaterial* nicht von nennenswertem Einfluß auf die Mindestzündenergie brennbarer Stäube ist. Für die Prüfapparatur wurden Wolframelektroden verwendet. Die niedrigsten Werte für die Mindestzündenergie erhält man mit spitzen Elektroden. Von Nachteil ist aber, daß sich die Elektrodenspitzen durch die Funkenwirkung (Oxidation, Abbrennen) schnell mit einer störenden Schicht überziehen. Dadurch werden die Meßergebnisse schlechter reproduzierbar. Es muß also darauf geachtet werden, daß die Oberfläche sauber, d.h. aktiv bleibt. Dies kann durch Reinigung oder durch Entfernen der inaktiven Oberfläche geschehen. [5]

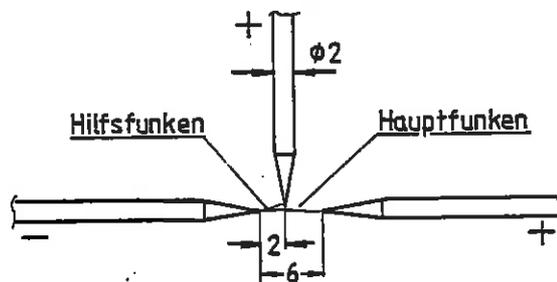


Abb.2.6: Anordnung der Elektroden

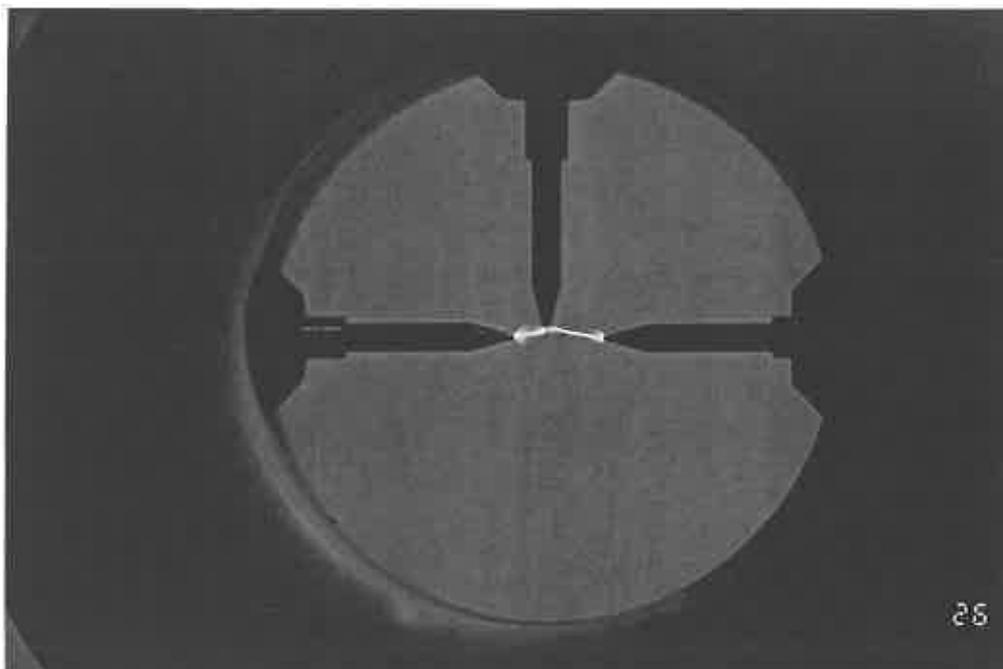


Abb. 2.7: Dreifach - Funkenstrecke; E = 10 mJ

Probleme gab es bei der Anordnung der Elektroden. Die Wolframelektroden werden in Kunststoffbuchsen, die in den Öffnungen des Hartmannrohres sitzen, mit Kunststoffschrauben befestigt. Durch die Maßtoleranzen die bei der Herstellung des Glasrohres unvermeidbar sind, waren die Elektroden nicht mehr parallel zueinander ausgerichtet.

Abhilfe schaffte hier die Konstruktion eines Führungsringes aus Teflon. Dieses Material besaß aber nicht die gewünschte Festigkeit. Deswegen hat man den Ring aus einem härteren Kunststoff hergestellt, was den nötigen Erfolg brachte.

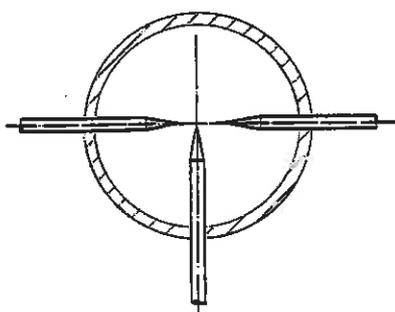


Abb. 2.8: Führungsring aus Kunststoff (s. Anhang 10.2)

Schwierigkeiten bereitete das Einstellen der Elektrodenabstände. Als eine gute Lösung stellte sich die Konstruktion einer Lehre aus Aluminium heraus. Somit kann man recht schnell den exakten Abstand der Elektroden einstellen. Je nach Stoffzusammensetzung der Staubprobe sind die Elektrodenspitzen mit einer störenden Oxidschicht durch Verbrennungsrückstände überzogen. Bei hohen Zündenergien werden die Elektrodenspitzen je nach Energieinhalt des Funkens unterschiedlich schnell abgebrannt. Um repräsentative Ergebnisse erhalten zu können, müssen die Elektroden möglichst sauber sein und die Abstände zwischen den Spitzen eingehalten werden. Für die Nachbearbeitung müssen diese meist ausgebaut werden.

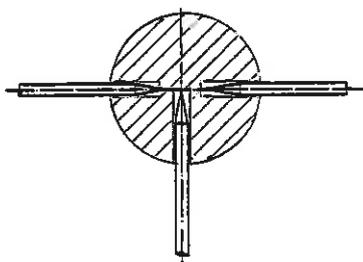


Abb. 2.9: Lehre aus Aluminium (s. Anhang 10.3)

Für die Befestigung des Hartmannrohres auf der Platte mußte eine Halterung aus Kunststoff konstruiert werden. (s. Anhang 10.5)

Weiterhin war es erforderlich eine Verbindung zwischen den Hochspannungsleitungen und den Elektroden herzustellen. Hierzu wurde einfach eine Steckverbindung entwickelt. (s. Anhang 10.6) Die dazugehörigen Griffe, der Führungsring für die Elektroden, die Halterung aus Kunststoff und die Lehre aus Aluminium wurden nach Erstellung der technischen Zeichnungen bei einer Maschinenbaufirma gefertigt.

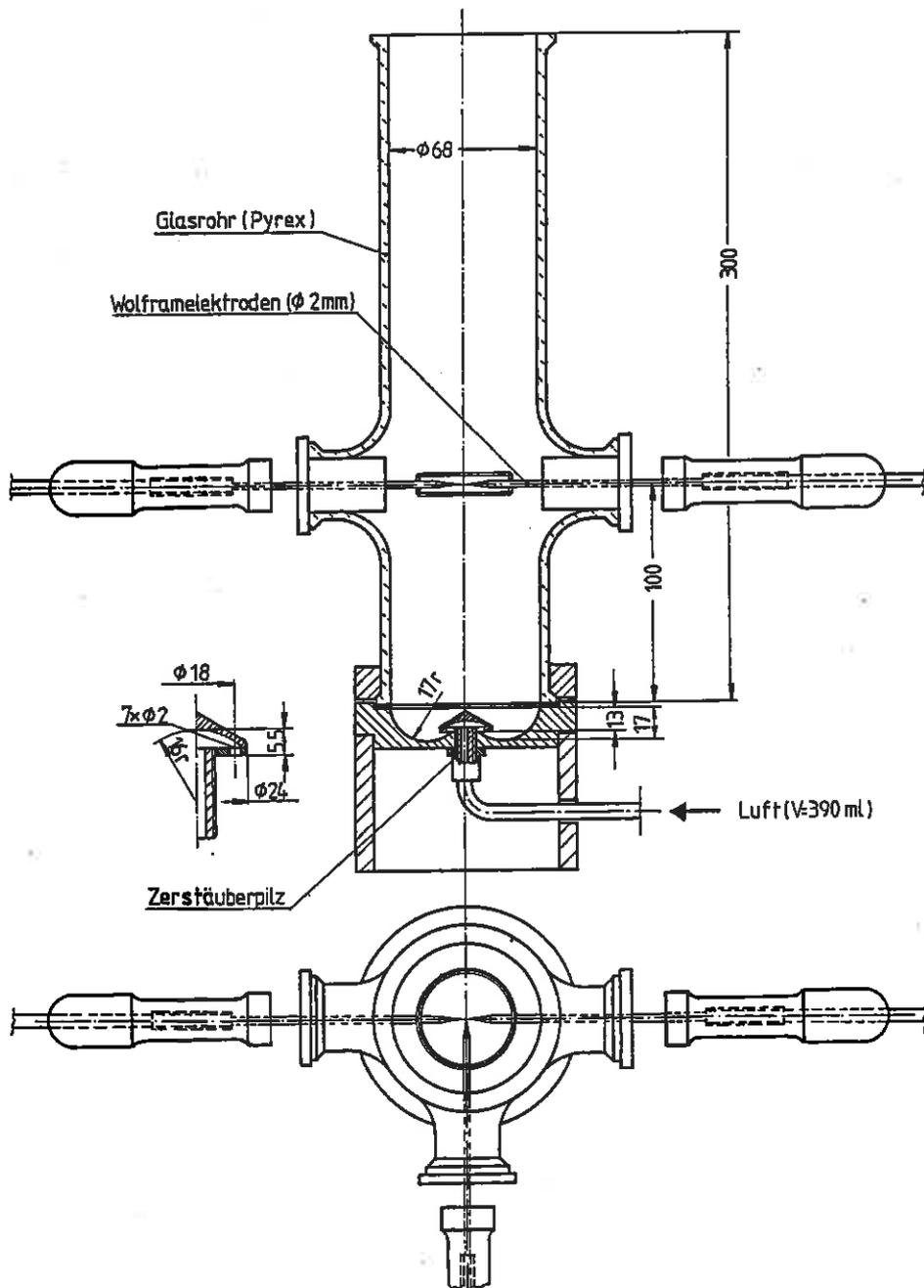


Abb. 2.10: Fertig aufgebaute Hartmannapparatur

## 2.4 Kondensatorentladungsapparatur

Für die Erzeugung definierter Entladungsfunken wird eine Anlage von Ciba-Geigy verwendet, die Funkenüberschläge innerhalb eines Energiebereiches von  $E = (0,001 - 10) \text{ J}$  ermöglicht. Die Anlage ist für eine maximale Spannung von  $U = 10 \text{ KV}$  ausgelegt.

Die Kapazität und damit die Energie kann durch die entsprechende Wahl von Kondensatoren verändert werden. Die potentielle Energie  $E$  eines auf die Hochspannung  $U_1$  aufgeladenen Kondensators mit der Kapazität  $C$  beträgt

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_1^2 \quad [\text{J}] \quad (2-2)$$

$C$  = Kapazität [F]

$U$  = Spannung [V]

Die Energiewerte von (10 / 1 / 0,5 / 0,1 / 0,05 / 0,01 / 0,005) J werden bei einer konstanten Spannung von 8 KV erreicht. Zwischenwerte erhält man durch Veränderung der Spannung  $U_1$  (s. Anhang 10.9).

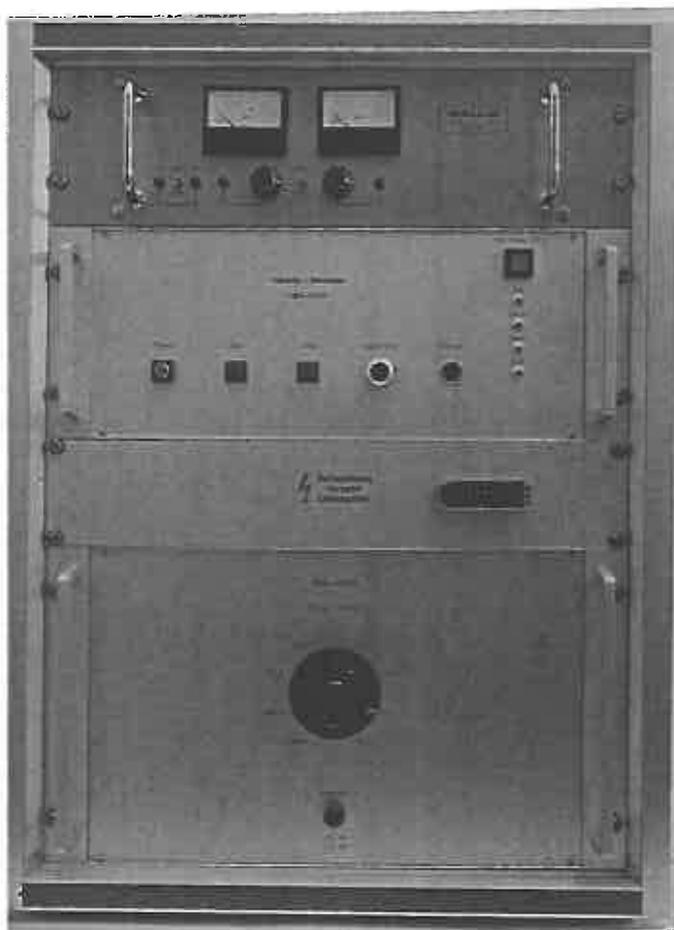


Abb. 2.11: Kondensatorentladungsapparatur



Zunächst wird durch Schließen der Kontakte des Relais  $D_1$  der gewünschte Kondensator  $C$  über den Ladewiderstand  $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$  auf eine Hochspannung  $U_1$  aufgeladen.

Ein Funkenüberschlag über die Hauptfunkenstrecke kann jedoch noch nicht stattfinden, da ihr Elektrodenabstand mit 6 mm oberhalb der entsprechenden Funkenschlagweite liegt. Um dennoch eine Entladung zu erzwingen, muß die Luft ionisiert werden. Dies geschieht durch einen 2 mm langen Hilfsfunken. Durch Betätigen des Schalters  $S_4$  wird unmittelbar vor dem Funkenüberschlag das Relais  $D_1$  geöffnet, so daß der aufgeladene Kondensator von der Hochspannungsquelle abgetrennt wird. Gleichzeitig wird durch Schließen der Kontakte des Relais  $D_2$  ein Transformator (Zündspule) aktiviert, der die Energie zur Erzeugung des Hilfsfunkens liefert.

Die ionisierten Gasmoleküle heben die Isolation zwischen den Hauptelektroden auf, d.h. der ohmsche Widerstand sinkt und die aufgeladene Kapazität  $C$  kann sich entladen. Die Energie des Hilfsfunkens ist so gering, daß eine Verfälschung der Energieabgabe für den Überschlagsfunken unwesentlich ist. Die Aktivierung des Hauptfunkens erfolgt synchron mit der Bildung der zu zündenden Staubwolke.

Für den Hilfsenergiefunken ist eine separate Spannungsversorgung vorgesehen. Die Hochspannung für den Hilfsfunken wird durch eine Zündspule (SZ) erzeugt. Durch das Regeln der Spannung  $U_2$  verändert sich auch die Hilfsenergie. Diese muß so eingestellt werden, daß auch bei geringster Energie ( $E = 1 \text{ mJ}$ ) ein sicherer Funkenüberschlag möglich ist.

Beim Lade- bzw. Entladevorgang werden zusätzlich Kapazitäten aufgeladen. Diese entstehen vor allem durch die Verkabelung, die Zuleitungen zu den Elektroden und die Elektrodenanordnung selbst. Die Mindestzündenergieanlage ist jedoch so optimiert, daß dieser Fehlereinfluß bis zur Energie von 1mJ vernachlässigt werden kann.

## 2.5 Induktivität

In der Kondensatorentladungsapparatur befindet sich im Entladekreis eine Spule, die bei Bedarf zugeschaltet werden kann. Diese besitzt eine Induktivität von  $L = 1,5 \text{ mH}$ . Wird die Spule an eine Spannungsquelle angeschlossen, so fließt durch ihre Drahtwindungen ein elektrischer Strom. Die Folge ist, daß sich ein magnetisches Feld aufbaut, daß nicht nur den Raum um die Spule erfüllt, sondern auch die Spule selbst durchdringt. Dadurch wird an den Spulenenden eine Spannung induziert, die der Eingangsspannung entgegengerichtet ist. Man erhält somit einen verzögerten Stromanstieg, der eine zeitlich gedehnte Funkenentladung ermöglicht. Durch die Abschwächung der Stosswelle des Entladefunkens werden nicht mehr so viele Staubpartikel aus dem Zündbereich weggeschleudert. Es können nun mehr Staubteilchen an der Energieumsetzung beteiligt werden. Unter diesen Bedingungen ist eine Verringerung der Mindestzündenergie möglich (S. Abb. 2.13)

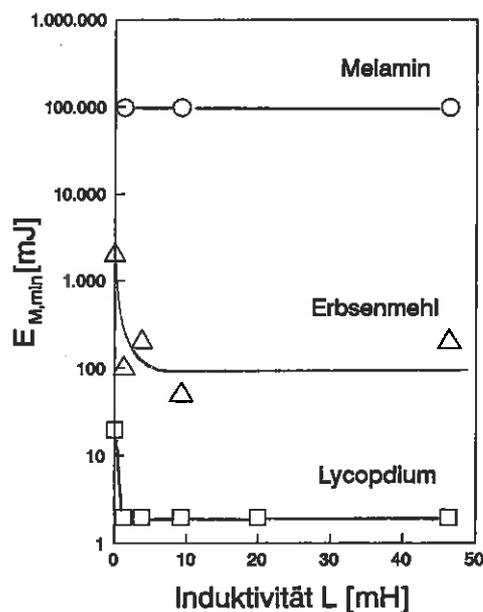


Abb 2.13: Einfluß der Induktivität auf die minimale Mindestzündenergie[2]

Die Untersuchungen bei Gefahr durch elektrostatische Aufladung der Anlagen bzw. der Produkte werden immer ohne Induktivität im Entladekreis durchgeführt, da die Funkenentladung relativ kurzzeitig erfolgt. Es wird aber auch angenommen, daß durch statische Aufladung bei schnell laufenden Folien, strömenden Flüssigkeiten, Staubströme usw, laufend Energie nachgeliefert wird, so daß Entladevorgänge längere Zeit andauern können. Diese können u.U. eine Entzündung von Staub/Luft-Gemischen auslösen. Die nachfolgenden Untersuchungen werden deshalb immer mit und ohne Induktivität durchgeführt.

### 3. Voruntersuchungen bei Laborbedingungen

#### 3.1 Probenvorbereitung

Die Kenngrößen - in diesem Fall die Mindestzündenergie - sollten grundsätzlich mit Feinstäuben ermittelt werden. Die Untersuchungen erfolgen im allgemeinen mit Feingutanteil dessen Teilchengröße  $< 63 \mu\text{m}$  beträgt. Hierzu kann es erforderlich sein, das Produkt durch eine Siebung mittels Luftstrahlsieb ( s. Abb 3.2 ) oder Planschwingsieb ( s. Abb. 3.3 ) entsprechend aufzubereiten. Die Maschenweite der Drahtsiebe beträgt daher 0,063 mm. ( ISO 565 ). Falls nicht genügend Feingutanteil anfällt, kann das Produkt auch gemahlen werden. In bestimmten Fällen kann es ausreichend sein, das vorliegende Produkt ohne besondere Aufbereitung zu untersuchen. Wenn es im Produktionsprozeß zu einer Änderung des Feinheitsgrades oder zur Anreicherung von Feinanteilen kommt (z.B. durch Mahlen, Abrieb, Absaugen oder durch Sedimentieren ), ist jedoch der feinere Staub zur Beurteilung der entsprechenden Anlagenteile zu untersuchen. Mit gröberem Produkt gewonnene Kenngrößen dürfen nicht verallgemeinert werden, da sie gegebenenfalls zu Fehleinschätzungen führen können.

Für die Feuchtebestimmung des Feingutes gibt es 2 Methoden.

Bei der einen Methode wird etwas Produkt ( $m \approx 4 \text{ g}$ ) in ein Aluminiumschälchen gegeben und dann bei einer Temperatur von  $105^\circ\text{C}$  über eine Zeitdauer von 75 min getrocknet. Durch das vorhergehende Abwiegen der Probe und dem nach der Trocknung erhaltenen Gewicht kann der Gewichtsverlust berechnet werden. Damit erhält man dann die Restfeuchte in dem Produkt. Diese Methode wird häufig nur noch zu Kontrollzwecken durchgeführt. Wesentlich schneller und einfacher kann die Produktfeuchte mittels eines Feuchteanalytators (s. Abb. 3.1) bestimmt werden. Hierbei wird das Produkt mit einer Infrarotlampe erwärmt. Der Gewichtsverlust wird jede Minute registriert. Ändert sich das Produktgewicht nicht mehr wesentlich, wird der Endwert nach ca. 10 bis 30 Minuten angezeigt. Die Endresultate sind mit dem im Trockenschrank erzielten Ergebniss vergleichbar.

Bei zu hohen Produktfeuchten wird der Staub getrocknet. Dies erfolgt bei  $105^\circ\text{C}$  in einem Trockenschrank. ( s. Abb. 3.3 ) Die Aufenthaltsdauer beträgt ca. 75 min. Nach erfolgter Abkühlung steht das Produkt für die Versuche bereit. Mit dieser so hergestellten "Normprobe" wurden bislang alle Kennzahlen an der BGN ermittelt. Eine exakte Beschreibung der Probenaufbereitung ist auch

in den VDI - Richtlinien nicht zu finden. Unter Vorwegnahme der kommenden Versuchsergebnisse wird sich zeigen, daß die Art und Weise der Probenherstellung einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Mindestzündenergie von brennbaren Stäuben besitzt. Hierzu werden dann in Kapitel 4.2 genauere Untersuchungen in Bezug auf die Trocknung und die Feuchtaufnahme von verschiedenen Produkten erläutert.



Abb. 3.1: Feuchteanalysator



Abb. 3.2: Luftstrahlsieb

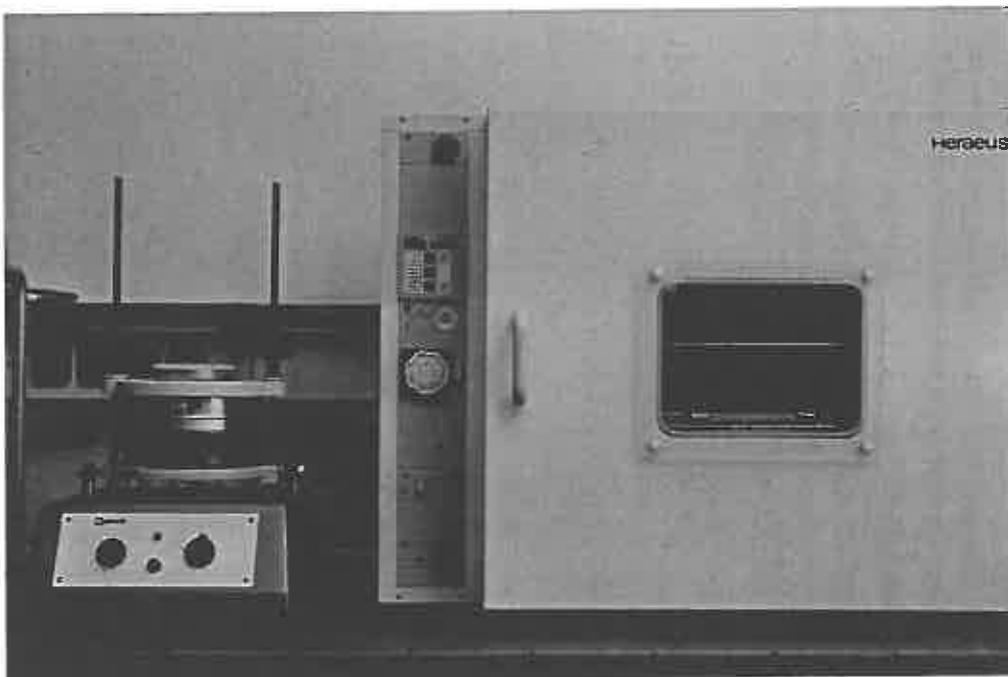


Abb. 3.3: Planschwingsieb und Trockenschrank

## 3.2 Produkte

Für die kommenden Untersuchungen wurden 4 verschiedene Produkte verwendet. Nachfolgend werden zu den einzelnen Produkten einige wichtige physikalische und chemische Eigenschaften genannt.

### Maisstärke

Stärke gehört zu den wichtigsten Substanzen innerhalb der organisch-chemischen Stoffgruppe der Kohlenhydrate und kommt weit verbreitet in der Natur vor. Als nachwachsender Rohstoff gewinnt ihre Weiterverarbeitung zunehmende Bedeutung. In der Bundesrepublik wurden 63% der Stärke aus Mais erzeugt. In der Pflanze findet sich die Stärke in Form weißer, mikroskopisch kleiner charakteristisch geformter Teilchen, den sogenannten "Stärkekörnern", vor allem in Früchten, Wurzeln, Knollen oder Samenkörnern. Die Stärkeköerner sind in kaltem Wasser unlöslich, und können durch wiederholtes Auswaschen, Dekantieren und Schleudervorgängen aus den zerkleinerten Pflanzenmaterial von Begleitstoffen abgetrennt und isoliert werden.

Maiskörner enthalten ca. 60% Stärke, 15% Wasser, 10% Protein und 4% Fett. Die Stärkeköerner zeichnen sich durch große Härte aus, unterscheiden sich aber je nach Maissorte in Größe, Form und Härte. Der Durchmesser der Maisstärkeköerner liegt bei 10 bis 25  $\mu\text{m}$ .

Der Wassergehalt der Maisstärke schwankt zwischen 10 und 20% und kann sich während der Lagerung unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen verändern. Maßgeblich hierfür sind Temperatur und relative Luftfeuchte. Das Wasser ist beim Aufbau der kristallinen Struktur beteiligt. Ca. 10% sind festgebunden, der Rest ist adsorptiv gebunden. Bei drastischer Trocknung verliert die Stärke ihren kristallinen Charakter. Wird Stärke aus einer trockenen in eine feuchte Atmosphäre gebracht, so vergrößern sich die Korndurchmesser um bis zu 20%. Das spezifische Gewicht der Stärkeköerner liegt bei ca. 1,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Chemisch gesehen gehört die Maisstärke zu den makromolekularen Kohlehydrate oder Polysaccharide. Sie ist aus D-Glucose-Einheiten aufgebaut. Die relative Molekülmasse beträgt 200.000 bis 1.000.000 oder höher. Hauptbestandteil der Stärke ist das Amylopektin, daß in buschartig verzweigten Ketten angeordnet ist.[4],[10],[11]

Die Summenformel lautet  $(C_6 H_{10} O_5)_n$  ( $n \approx 1000$  oder mehr)

Strukturformel:

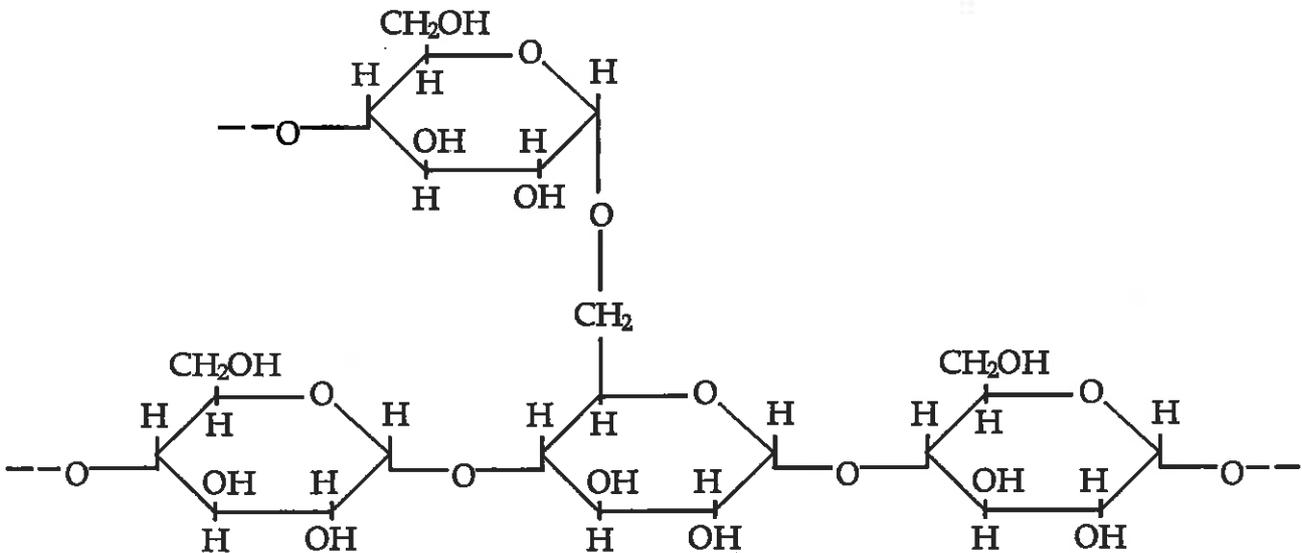


Abb. 3.4: Strukturformel von Maltodextrin

### Maltodextrin

Maltodextrin ist eine firmenspezifische Bezeichnung und gehört chemisch gesehen zu der Gruppe der Dextrine.

Die Summenformel lautet  $(C_6 H_{10} O_5)_n \cdot H_2O$

Dextrin ist ein durch unvollständige Hydrolyse mit verdünnten Säuren oder unter Einwirkung von Enzymen bzw. Hitze entstehendes Abbauprodukt der Stärke, das aus einer wechselnden Anzahl von Glucose-Einheiten besteht.

Dextrin bildet ein farbloses, amorphes Pulver, das in Wasser sehr leicht löslich ist. Je nach Herstellungsverfahren liegt die relative Molekülmasse zwischen 2.000 und 30.000.

Außerdem haben Dextrine je nach Herstellungsverfahren Gaseinschlüsse. Nach der Produktion liegt der Feuchtigkeitsgehalt zwischen 1 und 7%. Durch die hygroskopischen Eigenschaften steigt dieser, je nach Höhe der Luftfeuchte, auf 10 - 14% an. [10],[11]

Lycopodium

Lycopodium, auch Bärlappsporen genannt, ist ein sehr leichtes blaßgelbes geruchloses und geschmackfreies Pulver, das aus den 25 - 40  $\mu\text{m}$  großen Sporen verschiedener Bärlappsarten besteht. Es zerfließt sehr leicht und schwimmt auf dem Wasser. Es enthält bis zu 50% eines leicht brennenden fetten Öls.[10]

Dieses aus einer Farnpflanze gewonnene Naturprodukt wird gern als Referenzstaub für die Explosionskenngrößenermittlung verwendet. Durch die annähernde Kugelform der Teilchen ist je nach Lieferung eine gleichmäßige Korngrößenverteilung zu erwarten. Somit können auch die ermittelten Kennwerte gut verglichen werden. Diese Kugelform kann bei synthetisch hergestellten Produkten fast nie erreicht werden.

Ähnlich gute Eigenschaften hat allerdings auch die Maisstärke, die neben Lycopodium hauptsächlich für die Staubexplosionsversuche zum Einsatz kommt. Hier liegen die Gründe aber auch zum Teil daran, daß die Maisstärke leicht und billig zu erwerben ist.

Weizenmehl

Weizenmehl ist das weltweit wichtigste Mehl zur Brotherstellung und besteht je nach Sorte aus 14% Wasser, 70% Stärke und Zucker, 8-12% Rohprotein, 1-5% Fett, 2% Mineralstoffe und 2-3% Rohfaser.

Die Korngröße schwankt je nach Mahlung. Die Mehlsorten werden verschiedene Typklassen zugeordnet.

	Asche mg / 100 g Mehl	Ausmahlungsgrad (Ausbeute)
405	0,38 - 0,44	bis 55%
1050	1,00 - 1,15	bis 85%

Für die Staubexplosionsversuche wurde ein Weizenmehl der Typklasse 550 verwendet. Hierfür lagen allerdings keine Werte vor.

Mit Sieben und Windsichtern werden die Mahlprodukte nach jedem Mahlvorgang separiert und einer neuen Vermahlung zugeführt. Je nach Ausbeute spricht man vom Ausmahlungsgraden. Zur Mehltypisierung verwendet man den Aschegehalt in mg je 100 g wasserfreiem Mehl, der analytisch leicht zu erfassen ist.[12]

In den folgenden Photographien sind die 4 Produkte abgebildet. Bezeichnung immer von links nach rechts.

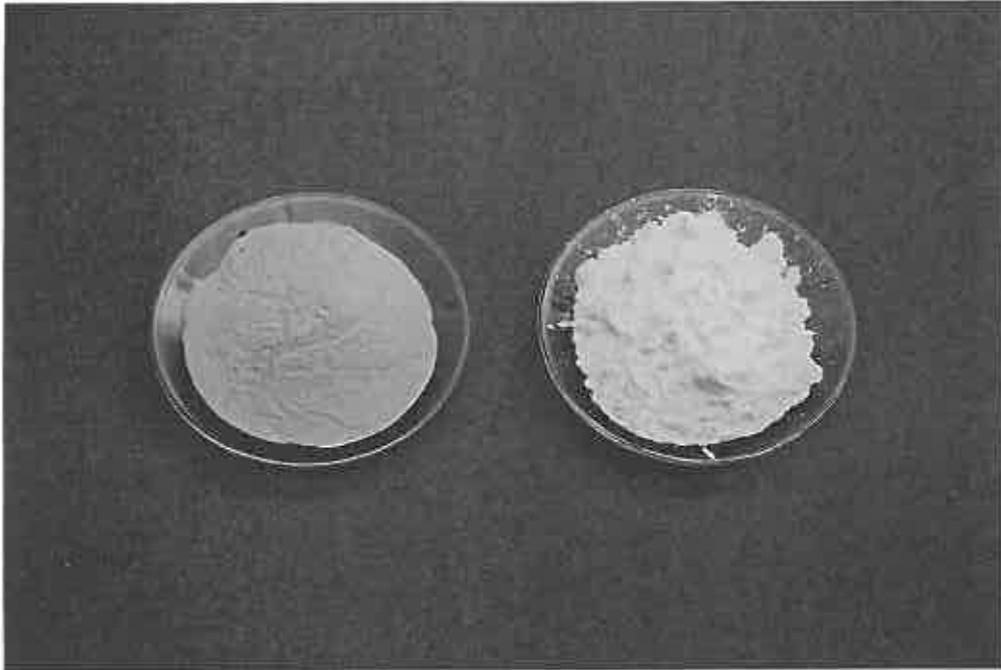


Abb. 3.5: Lycopodium und Maisstärke



Abb. 3.6: Weizenmehl und Maltodextrin

### 3.3 Versuchsablauf

Die Bestimmung der Mindestzündenergie beruht auf den Empfehlungen der VDI - Fortschrittsberichte. Das Verfahren ist in Europa noch nicht genormt. Es existiert bisher nur ein Entwurf einer VDI - Richtlinie!

Die grundsätzliche Funktionsweise der Apparatur wurde bereits in den Kapiteln 2.1 und 2.2 beschrieben.

Ausgehend von einer Kondensatorentladungsenergie mit einer hundertprozentigen Zündwahrscheinlichkeit wurde für eine konstante Staub/Luft-Konzentration die Energie soweit verringert, bis bei 10 aufeinanderfolgenden Versuchen keine Staubexplosion mehr eintrat. Der niedrigste Energiewert, bei dem noch eine Zündung erfolgt, ist die Mindestzündenergie. Aus entsprechenden Messungen über einen breiten Konzentrationsbereich wurde auf diese Weise die zündfreudigste Staubkonzentration mit der minimalen Mindestzündenergie eines brennbaren Staubes bestimmt. In Abb. 3.7 sieht man den Zusammenhang zwischen der Staubkonzentration und der Mindestzündenergie. Ein Produkt ist als staubexplosionsfähig anzusehen, wenn eine selbstständige Flammenausbreitung nach der Zündung beobachtet werden kann.

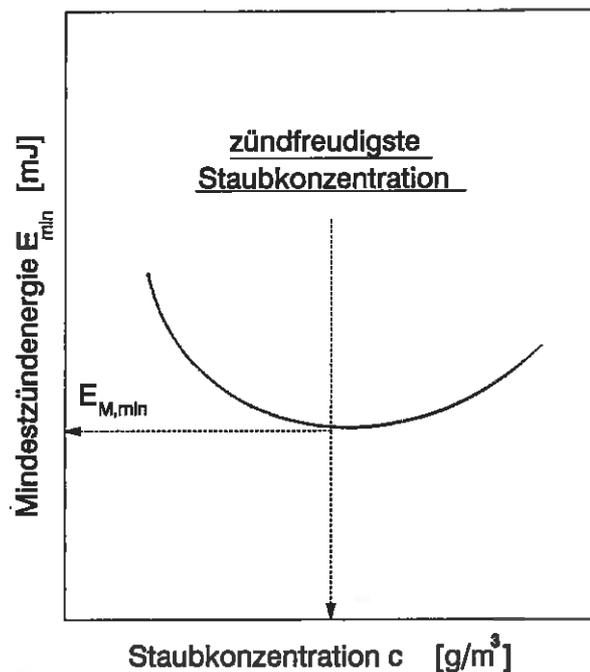


Abb. 3.7: Bestimmung der minimalen Mindestzündenergie

Der in dem modifizierten Hartmannrohr angebrachten Zündanordnung muß besondere Beachtung geschenkt werden. Vor dem Beginn einer Versuchsreihe wurden die Elektroden sorgfältig gesäubert. Gegebenenfalls erfolgte eine Nachbearbeitung der Elektroden. Die Elektrodenabstände konnten mit der Lehre eingestellt werden.

Weiterhin sind nach jedem Versuch die Elektroden mittels einer Draht bzw. Nylonbürste von eventuellen Rückständen zu reinigen. Durch den Abbrand der Elektrodenspitzen, besonders bei hohen Energien ( $E > 1J$ ), sollte eine häufigere Kontrolle der Elektrodenabstände erfolgen. Die Verschmutzung der Elektrodenoberfläche und ein zu großer Abstand der Elektrodenspitzen führt insbesondere bei kleinen Energien ( $E < 10mJ$ ) zu Meßwertverfälschungen, da der Hilfsfunke nicht mehr einwandfrei überspringen kann. Der Hauptfunke kann dann durch die fehlende Ionisierung der Luft nicht mehr fehlerfrei zünden.

### 3.4 Physikalische Kennzeichnung von Staub/Luft-Gemischen

#### 3.4.1 Staub als disperser Stoff

Staub fällt bei vielen technischen Prozessen an, z.B. durch Zerkleinerungsvorgänge, Filtrieren, Abrieb usw. Die Form der einzelnen Teilchen ist außerordentlich vielfältig. Auf den Seiten 32 und 33 sieht man Aufnahmen von Stäuben, die mit einem Rasterelektronenmikroskop gemacht wurden. Bei 500-facher Vergrößerung entspricht  $1\text{ cm} = 20\mu\text{m}$ . Die Außengestalt der Partikel kann annähernd kugelförmig (s. Abb. 3.10) oder auch spitz, eckig und gezackt (s. Abb. 3.9) sein. Im Falle von Maltodextrin sind deutlich Hohlräume innerhalb der einzelnen Körner zu erkennen. Diese können unter Umständen Gase enthalten. Die Größe der Staubteilchen ist in ein- und demselben Gemisch im allgemeinen sehr verschieden. Für die Charakterisierung eines Staubes läßt sich die Anzahl der Staubteilchen je Rauminhalt nicht festlegen. Ein hinsichtlich seiner Feinstoffteilchenabmessungen homogener Staub existiert praktisch nicht, und es ist auch äußerst schwierig, diesen künstlich herzustellen. In der Praxis ist es üblich, von Staub zu sprechen, wenn die Korngröße eines Feststoffgemisches  $100 - 500\mu\text{m}$  beträgt. Als Feinstaub werden Gemische mit einer Korngröße bis zu  $100\mu\text{m}$  bezeichnet. Für die Ermittlung explosionstechnischer Kenngrößen wird ein Staub verwendet, bei dem die Teilchengrößen  $< 63\mu\text{m}$  sind.

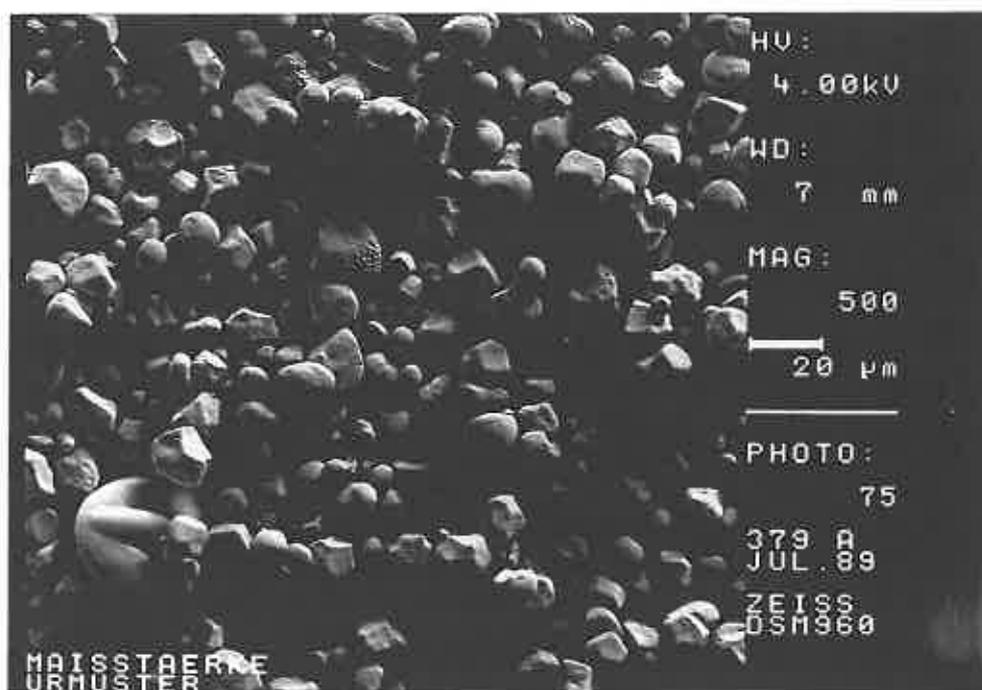


Abb. 3.8: Maistärke

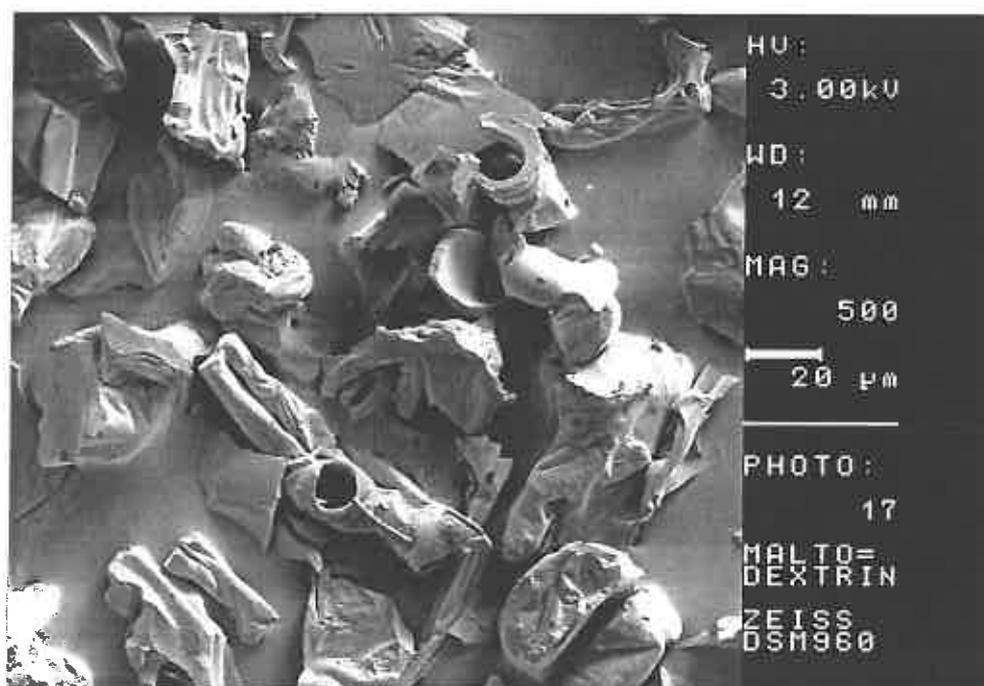


Abb. 3.9: Maltodextrin

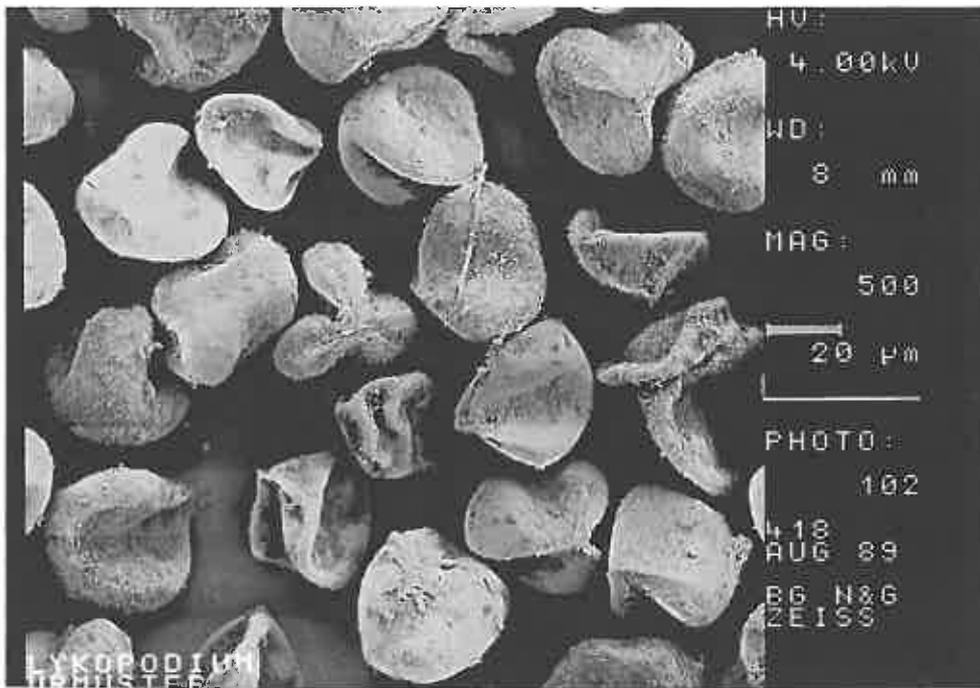


Abb. 3.10: Lycopodium

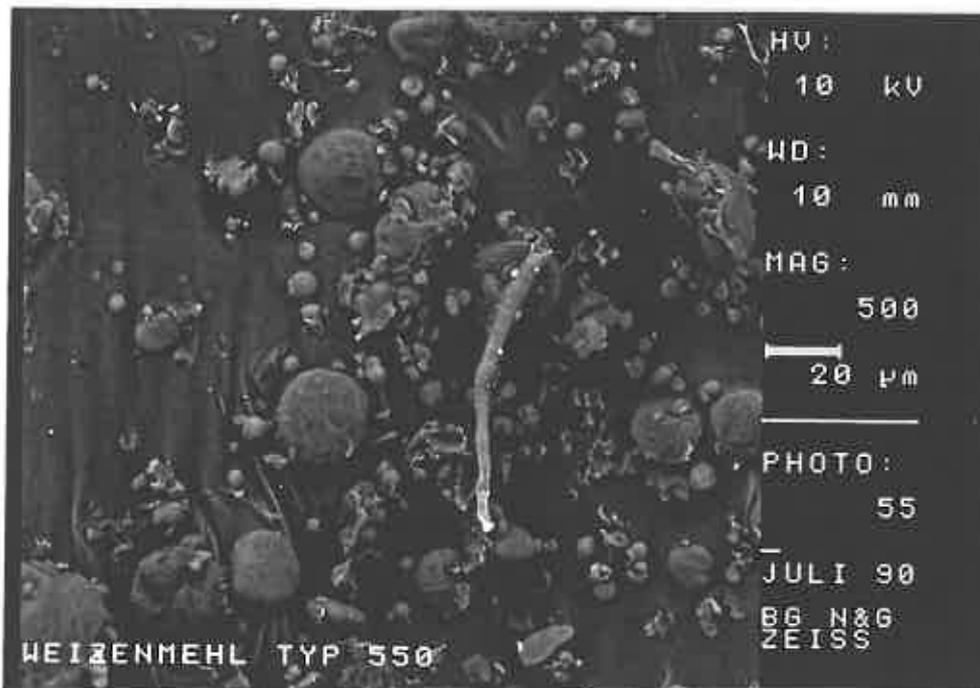


Abb. 3.11: Weizenmehl Typ 550

Die Eigenbewegung von aufgewirbeltem Staub bedingt örtliche und zeitliche Konzentrationsänderungen. Die Entmischungen werden durch Teilchen verursacht, die je nach Gewicht, Größe und der Form verschieden schnell sedimentieren. Die wichtigste Einflußgröße ist hier die Schwerkraft. Wegen des Reibungswiderstandes unterliegt das freifallende Staubteilchen nicht einer ständigen Beschleunigung, sondern erreicht relativ schnell eine konstante Endgeschwindigkeit. Sie läßt sich annähernd nach dem Stokesschen Gesetz berechnen. [23]

$$x_{St} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta_F \cdot w}{g \cdot (\rho_P - \rho_F)}} \quad (3 - 1)$$

$x_{St}$	[m]	Stoke - Durchmesser
$\eta_F$	[kg/ms]	dynamische Viskosität (bei 20 °C = $18 \cdot 10^{-6}$ )
w	[m/s]	Sinkgeschwindigkeit
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\rho_P$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Partikeldichte
$\rho_F$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Luft (bei 20 °C $\approx$ 1)

$$x_{pm} = x_{St} \cdot \psi^{-\frac{3}{4}} \quad (3 - 2)$$

$x_{pm}$	[m]	mittlerer Partikeldurchmesser
$\psi$		Formfaktor (Sphärizität)
$\psi \approx 0,8$		abgerundetes Korn
$\psi \approx 0,3 - 0,6$		faserige und kantige Kornoberfläche

Die Sinkgeschwindigkeit ist am Beispiel des Partikeldurchmessers von 100  $\mu$ m (T = 20 °C) durchgerechnet.

$$x_{St} = \frac{0,1 \text{ mm}}{0,8^{-\frac{3}{4}}} = 0,085 \text{ mm} = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$w = \frac{x_{St}^2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F)}{18 \cdot \eta_F}$$

$$w = \frac{(8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m})^2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{18 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m s}} = 0,22 \text{ m/s} = \underline{\underline{22 \text{ cm/s}}}$$

Die übrigen berechneten Werte sind in Anhang 10.10 zu finden. Die Abbildung zeigt für aufgewirbelten Staub bei 20 °C den Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit und der Teilchengröße für unterschiedliche Dichte des Feststoffes.

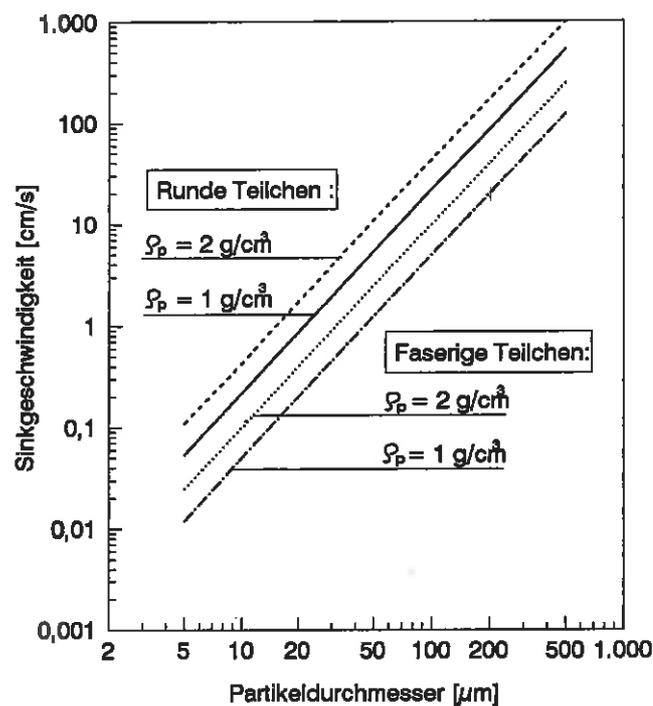


Abb. 3.12: Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit und Teilchengröße

### 3.4.2 Verbrennungsvorgänge von Staub/Luft-Gemischen

Eine Staubexplosion ist ein nach erfolgter Zündung selbständiges Fortschreiten der Verbrennungsreaktion durch ein Staub/Luft-Gemisch, das im geschlossenen Gefäß durch einen Druckaufbau gekennzeichnet ist.[20]

Der Verbrennungsvorgang ist eine exotherme Reaktion, bei der die Endprodukte durch unmittelbare Einwirkung der Reaktionspartner oder in komplizierten Zwischenreaktionen gebildet werden. Für die explosive Verbrennung eines festen Stoffes in Luft von Atmosphärendruck ist also die Suspendierung des

Staubes in der Luft erforderlich. Da jedoch die Stoffe in festem Aggregatzustand eine um etwa 3 Zehnerpotenzen höhere Dichte als Luft besitzen, fehlt einer solchen Suspension die Beständigkeit, und der feste Stoff sedimentiert verschieden schnell. Mit zunehmendem Feinheitsgrad der Teilchen vermindert sich die Sinkgeschwindigkeit und vergrößert sich zugleich die reaktionsfähige Oberfläche, damit auch die Entzündlichkeit und Verbrennungsgeschwindigkeit des Gemisches. Je kleiner die Teilchengröße ist, desto mehr wird die Verbrennung des Staub/Luft-Gemisches der eines Gas/Luft-Gemisches ähnlich, und desto eher sind die Voraussetzungen für die explosive Verbrennung gegeben.

Feinstäube neigen oft zur Agglomeration. Hierbei ballen sich feine Staubteilchen zu kleinen Klümpchen zusammen. Sie täuschen dann nicht nur größere Teilchenabmessungen vor, sondern bieten auch der Flammenfortpflanzung eine verringerte Angriffsfläche.[20]

Den Verbrennungsvorgang stellt man sich wie folgt vor. Partikel organischer Stäube verschwelen bei der Annäherung an die eigentliche Reaktionszone. Die hierfür erforderliche Energie wird z.T. durch Wärmeleitung, zu einem großen Teil aber auch direkt durch Strahlung übertragen. In der Reaktionszone findet dann eine homogene Gasreaktion der Schwelgase mit dem Sauerstoff der Luft statt. Die festen Schwelrückstände - vornehmlich Ruß - reagieren anschließend in heterogener Reaktion ab. Staubflammen organischer Stäube sind meist rot bis grellgelb gefärbt. Eine Ausnahme von dem geschilderten Verfahren bilden manche Metallstäube, bei denen an der Kornoberfläche von Anfang an eine Heterogenreaktion abläuft. [17]

Die hohe Verbrennungstemperatur, die bei energiereichen Gemischen von z.B. Magnesium- oder Aluminiumstaub auftritt, wirkt sich positiv auf die Verbrennungsgeschwindigkeit aus. Diese Gemische verbrennen mit einer hellen Leuchterscheinung.

Bei all diesen Vorgängen wirken sich die feinsten Anteile des Staubes und insbesondere Verdampfungs- und Verschwelungsprodukte so reaktionsfördernd aus, daß auch die größten Anteile des Staubes weitgehend von der Reaktion erfaßt werden. Bei der explosiven Verbrennung eines Staub/Luft-Gemisches ist in langgestreckten druckfesten Räumen das Entstehen detonationsähnlicher Abläufe möglich, bei der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von mehr als 1000 m/s erreicht werden.

Ein hoher Aschegehalt, Produktfeuchte und der Stickstoffanteil in der Luft wirken sich nachteilig auf den Verbrennungsvorgang aus. Die überschüssigen

Komponenten wirken als Wärmeballast dem Temperaturanstieg entgegen. Ein genügend hoher Temperaturanstieg und dessen Einwirkung auf das noch unverbrannte Gemisch bis zur Zündung und dem Freiwerden neuer Verbrennungsenergie ist die Voraussetzung für die Flammenfortpflanzung. Nach einer Faustformel muß die Flammentemperatur mehr als 1000 °C betragen, damit sich im Gemisch noch eine selbstständige Flamme ausbreiten kann. [20] Der Aschegehalt ist wichtig bei Stoffen, wo neben festen Verbrennungsprodukten ein großer Anteil flüchtiger Verbindungen als Ergebnis einer restlosen Verbrennung auftritt. Insbesondere ist dies bei organisch- chemischen Stoffen der Fall, deren Hauptbestandteile die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel sind, aus denen ausschließlich gasförmige oder leicht verdampfbare Verbrennungsprodukte entstehen. Ein hoher Aschegehalt vermindert in einer gegebenen Stoffmenge den Gehalt an brennbaren Bestandteilen und damit die bei der Verbrennung freiwerdende Energie.

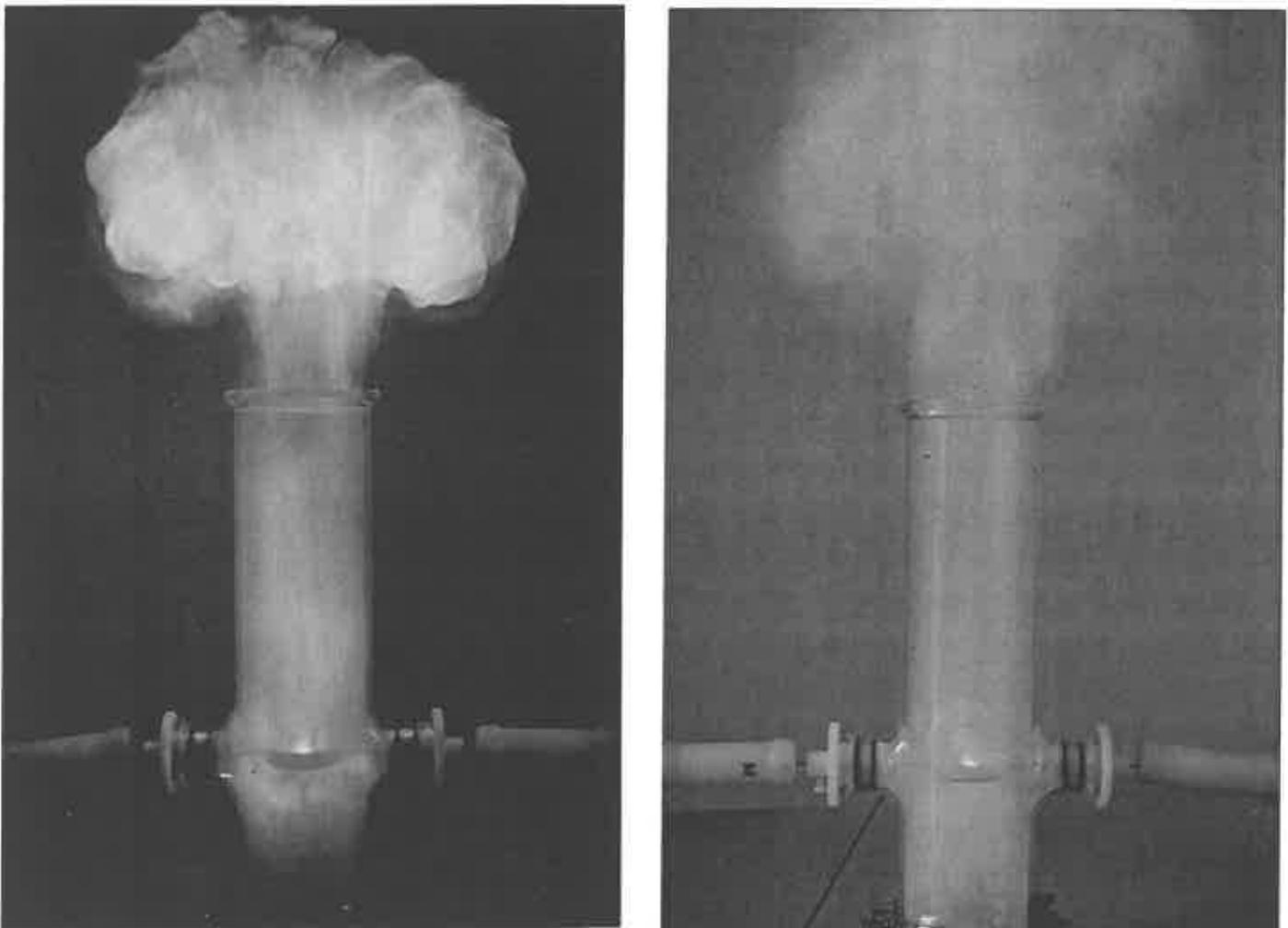


Abb. 3.13: Staubexplosion von Lycopodium und Weizenmehl (v.links n. rechts)

### 3.5 Einfluß der Turbulenz

Bei den nachfolgenden Untersuchungen wird der Zustand gesucht, bei dem die erforderliche Mindestzündenergie den niedrigsten Betrag annimmt. Durch Prüfungen mit Gas/Luft-Gemischen hat man festgestellt, daß der Betrag der Mindestzündenergie vom Turbulenzzustand abhängig ist. Staub- und Gasexplosionen haben in bezug auf die chemischen Vorgänge und die damit verbundenen Wirkungen gewisse Gemeinsamkeiten. Es können deshalb manche Vorstellungen von den sich bei Gasexplosionen abspielenden Vorgängen auf Staubexplosionen übertragen werden. Gas/Luft-Gemische sind molekulardispers, d.h. wir haben es mit einem Nebeneinander von Molekülen zu tun, die sich in ihrer Größe und Gewicht wenig voneinander unterscheiden. Bei Gas/Luft-Gemischen können die Untersuchungen bei ruhendem, aber auch bei turbulentem Strömungszustand durchgeführt werden. Bei Staub/Luft-Gemischen ist dies nicht möglich, da das Gewicht der festen Teilchen das der Gasmoleküle um Größenordnungen übertrifft. Durch den Einfluß der Schwerkraft beginnt direkt nach der Herstellung des Gemisches die Entmischung. Bei den Untersuchungen mit Gas/Luft-Gemischen wurde der höchste Wert für den zeitlichen Druckanstieg  $dp/dt$  bei turbulentem Zustand gefunden und die Mindestzündenergie hatte den niedrigsten Wert bei möglichst schwach turbulentem Gemisch. [1]

Infolge der verbesserten Wärme- und Stofftransportvorgänge bei turbulenten Strömungszuständen wird auch die Reaktionsgeschwindigkeit innerhalb der Flammenfront erhöht. Dies ist auch der Grund, weshalb in geschlossenen Behältern und Räumen die Druckanstiegsgeschwindigkeit bei hoher Turbulenz ungleich größere Werte annimmt als bei niedriger Turbulenz. Mittlerweile gibt es zwar Meßgeräte, die die Staubkonzentration sofort anzeigen können, aber es gibt noch keine Möglichkeit die Turbulenz von Gemischen meßtechnisch zu erfassen.

Turbulenz ist ein durch Wirbelbildung und Zerfall dieser Wirbel sowie durch unregelmäßige Schwankungen des Strömungsverlaufs gekennzeichneter Zustand. Während bei laminarer Strömung jedem Flüssigkeitsteilchen eine ganz bestimmte Bahn zugeschrieben werden kann, bewegen sich die Teilchen bei Turbulenz völlig regellos und sind im einzelnen nicht verfolgbar. Eine genaue Berechnung der Turbulenz ist zur Zeit noch nicht möglich. [21]

Durch die fehlende Möglichkeit, den Turbulenzzustand von Staub/Luft-Gemischen meßtechnisch zu erfassen, muß man für jede neue Versuchapparatur

umfangreiche Voruntersuchungen durchführen. Um reproduzierbare Kennwerte zu erhalten, muß die Zündquelle stets bei gleicher Turbulenz des Staub/Luft-Gemisches wirksam werden. Mit dem an der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten hergestellten Zeitsteuergerät (s. Abb. 2.2) kann eine Kondensatorentladung zu einem genau definierten Zeitpunkt ausgelöst werden. Die Zeit, die zwischen dem Einblasen der Luft für die Staubaufwirbelung und der Zündung liegt, nennt man die Zündverzögerungszeit  $t_v$ . In der Hartmannapparatur kann man direkt nach dem Luftstoß eine hohe Turbulenz im Staub/Luft-Gemisch beobachten, die bei längerer Wartezeit immer geringer wird. Bei entsprechend langen Wartezeiten beginnt dann die Sedimentation der Staubpartikel. Durch Veränderung der Zündverzögerungszeiten erhält man indirekt einen Hinweis auf den Turbulenzzustand im Staub/Luft-Gemisch. Gesucht wird die Zündverzögerungszeit, bei der möglichst keine starken Turbulenzen mehr im Gemisch vorhanden sind. Mit dieser Zeit kann dann die minimale Mindestzündenergie bestimmt werden. Um den Versuchsaufwand auf ein Mindestmaß zu beschränken, wurde der Explosionsablauf bei verschiedenen Zündzeitpunkten beobachtet. Als Maß für die Heftigkeit der Explosion wurde die Flammenhöhe oberhalb des Glasrandes notiert.(s.Abb. 3.14)

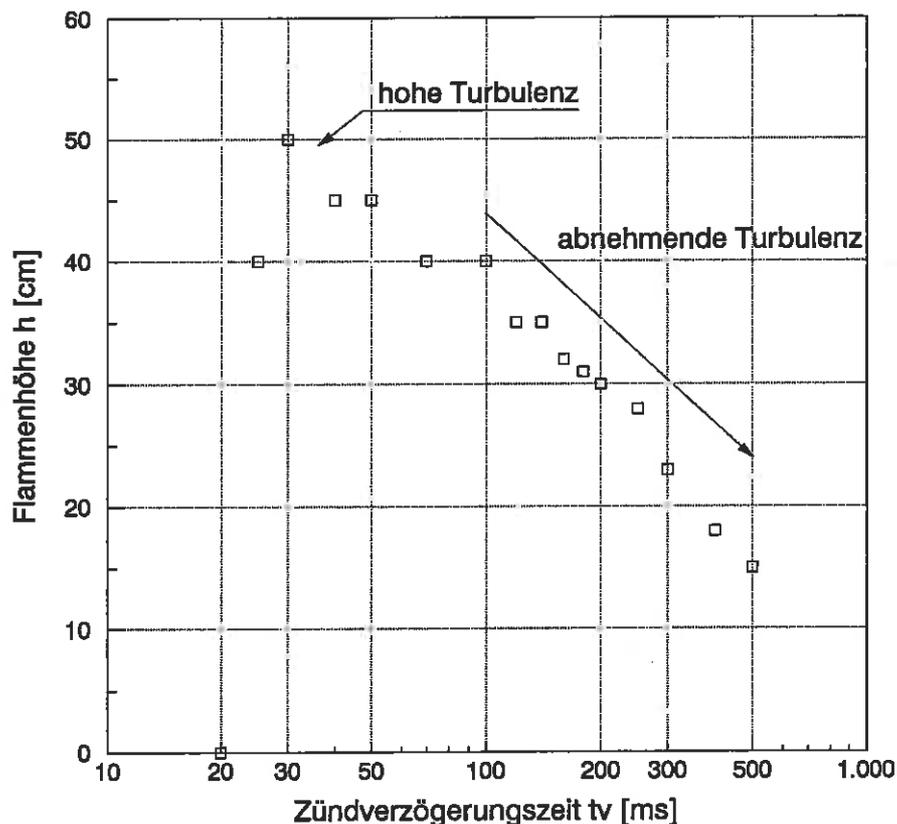


Abb. 3.14: Flammenhöhe in Abhängigkeit der Zündverzögerungszeit  $t_v$   
 Produkt: Maisstärke; Staubkonzentration:  $c = 750 \text{ g/m}^3$ ;  $E = 0,5 \text{ J}$

Unterhalb von  $t_v = 20$  ms kann noch keine Zündung erfolgen, da noch nicht genügend Staub aufgewirbelt wurde. Bei Vergrößerung der Zündverzögerungszeiten wird auch die Stichflamme immer höher, bis zu einem Zeitpunkt, bei dem sie dann wieder abnimmt. Dieses Maximum liegt bei ca.  $t_v = 30$  ms. Direkt nach dem erfolgten Druckluftstoß existiert in dem Staub/Luft-Gemisch eine hohe Turbulenz. Dadurch kommt es bei der Zündung zu einer heftigeren Explosion. Diese ist darauf zurückzuführen, daß die Flammenfortschreitung durch die Verwirbelung schneller vonstatten geht und das einzelne Staubteilchen kann bei der Verbrennung mit dem Luftsauerstoff besser reagieren. Durch die schnelle Expansion der Verbrennungsgase kommt es zu einem Knall.

Ab  $t_v > 30$  ms ist die Reaktion nicht mehr so heftig, da die Turbulenz im Staub/Luft-Gemisch wieder langsam abnimmt. Bei entsprechend langer Zeit beginnt dann schon das Absinken der schwereren Teilchen. Für weitergehende Untersuchungen ist deshalb der Bereich von  $t_v = (30 \text{ bis } 140 \text{ ms})$  interessant.

### 3.6 Ermittlung der Zündverzögerungszeit $t_v$

Durch die visuelle Beobachtung kann der Bereich der Zündverzögerungszeit  $t_v$  abgeschätzt werden. Für die exakte Bestimmung werden, nach dem im Abschnitt

für verschiedene Zündverzögerungszeiten ( $t_v = 30, 60, 100, 140$  ms) ermittelt. Mit den Produkten Maisstärke, Lycopodium und Weizenmehl wurden die Untersuchungen - mit und ohne Induktivität im Entladekreis - durchgeführt. (s. Abb. 3.15, 3.16, 3.17) Die dazugehörigen Messwerte sind in Anhang 10.11 bis 10.13 zu finden.

Besonders deutlich wird Zusammenhang zwischen der Zündverzögerungszeit und der Mindestzündenergie am Beispiel des Produkts Weizenmehl. (Abb. 3.15)

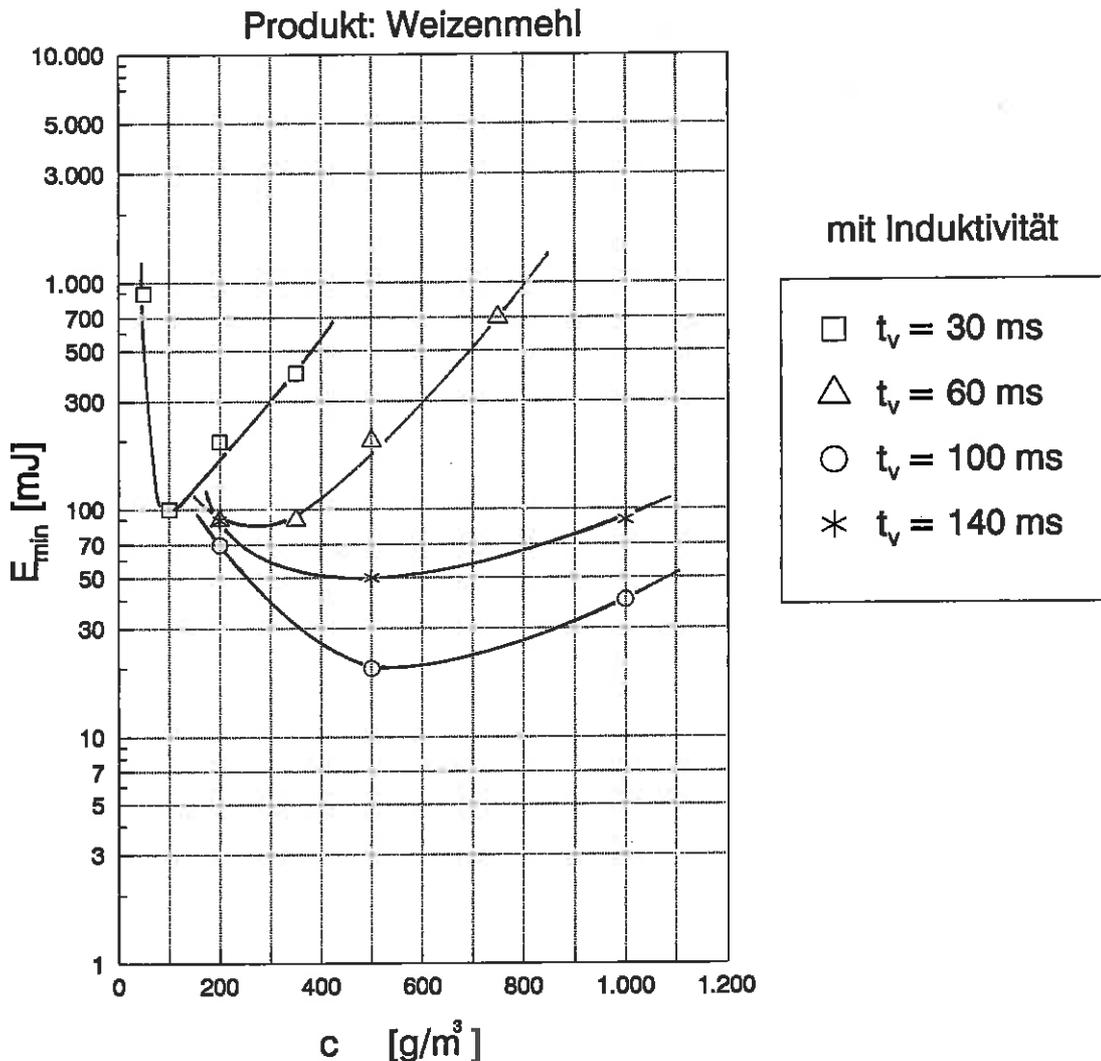
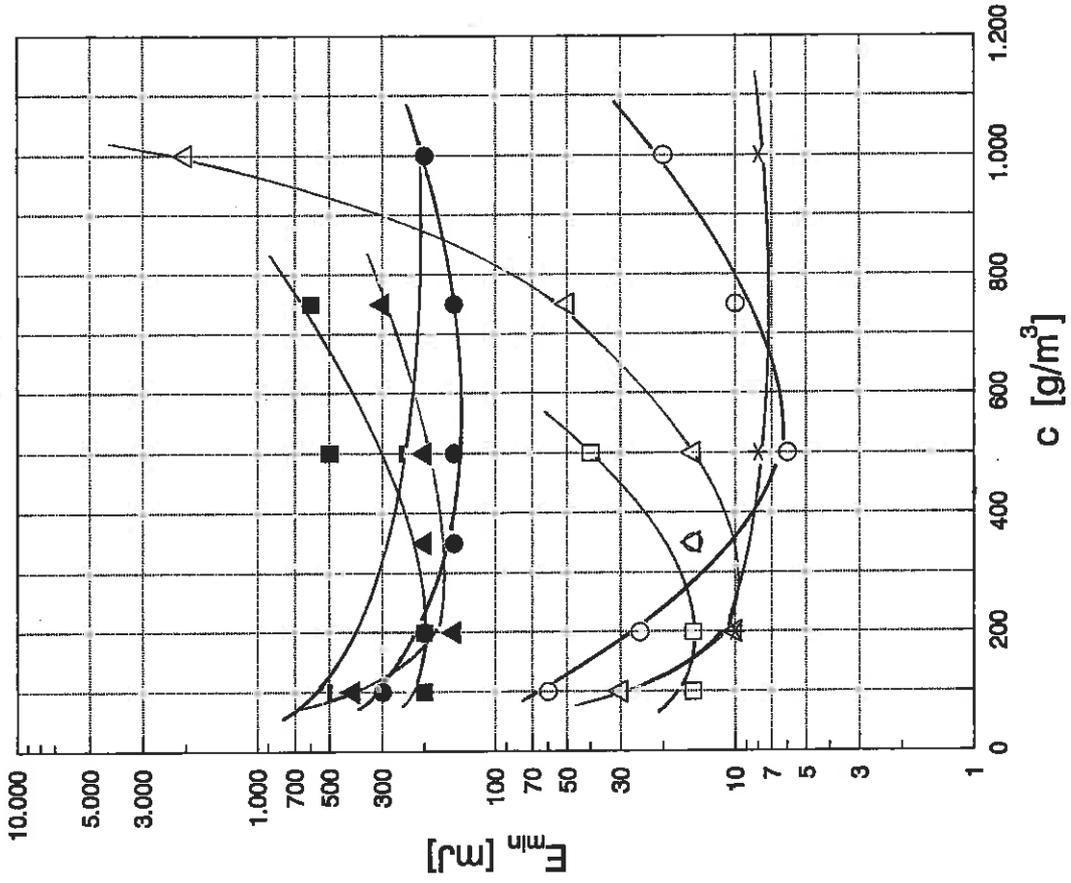


Abb. 3.15: Einfluß der Zündverzögerungszeit  $t_v$  auf die Mindestzündenergie

Bei den untersuchten Stäuben entsteht durch die Verbindung der Messpunkte ein parabelförmiger Verlauf. Das Minimum einer Kurve entspricht der Mindestzündenergie. Diese vermindert sich mit zunehmender Zündverzögerungszeit und erreicht bei  $t_v = 100 \text{ ms}$  ihren kleinsten Wert, der als minimale Mindestzündenergie bezeichnet wird. Bei höheren Zündverzögerungszeiten steigen die Werte für die Mindestzündenergie wieder an. Das Minimum einer ermittelten Kurve stellt die zündfreudigste Gemischkonzentration für die entsprechende Zündverzögerungszeit dar. Die erhaltenen Mindestzündenergien für jede Zündverzögerungszeit sind in Abb. 3.18, 3.19 und 3.20 dargestellt.

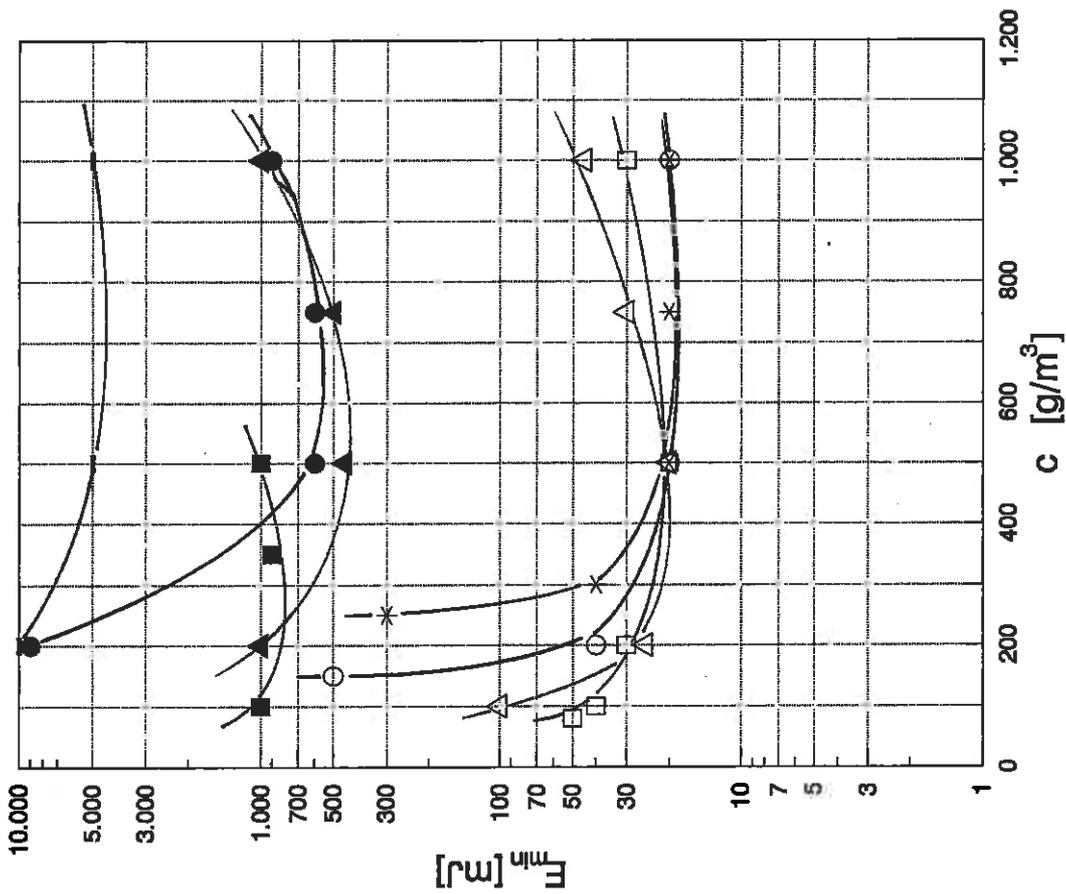
Einfluß der Zündverzögerungszeit  
Produkt: Lycopodium



mit Induktivität □ 30 ms △ 60 ms ○ 100 ms \* 140 ms  
ohne Induktivität ■ 30 ms ▲ 60 ms ● 100 ms - 140 ms

Abb. 3.17:

Einfluß der Zündverzögerungszeit  
Produkt: Maisstärke



mit Induktivität □ 30 ms △ 60 ms ○ 100 ms \* 140 ms  
ohne Induktivität ■ 30 ms ▲ 60 ms ● 100 ms - 140 ms

Abb. 3.16:

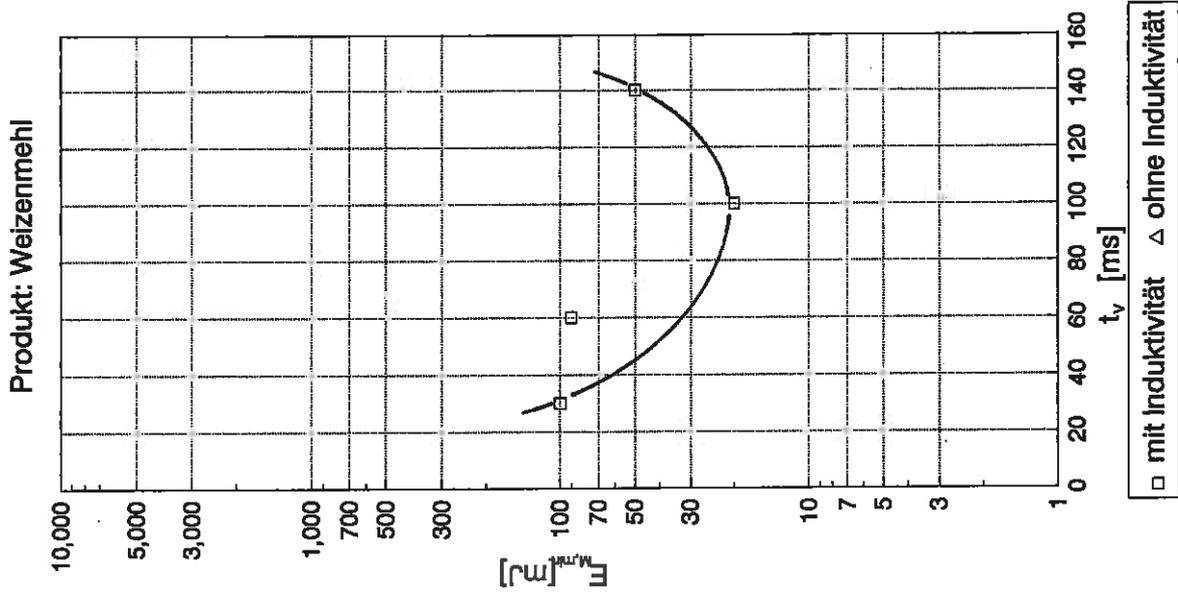


Abb. 3.20:

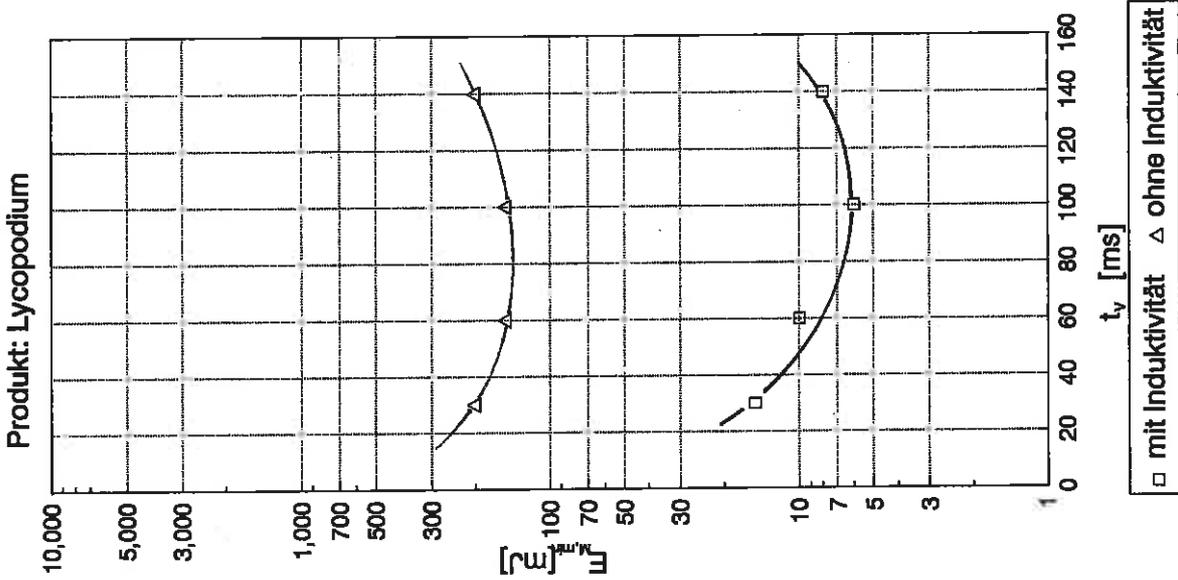


Abb. 3.19:

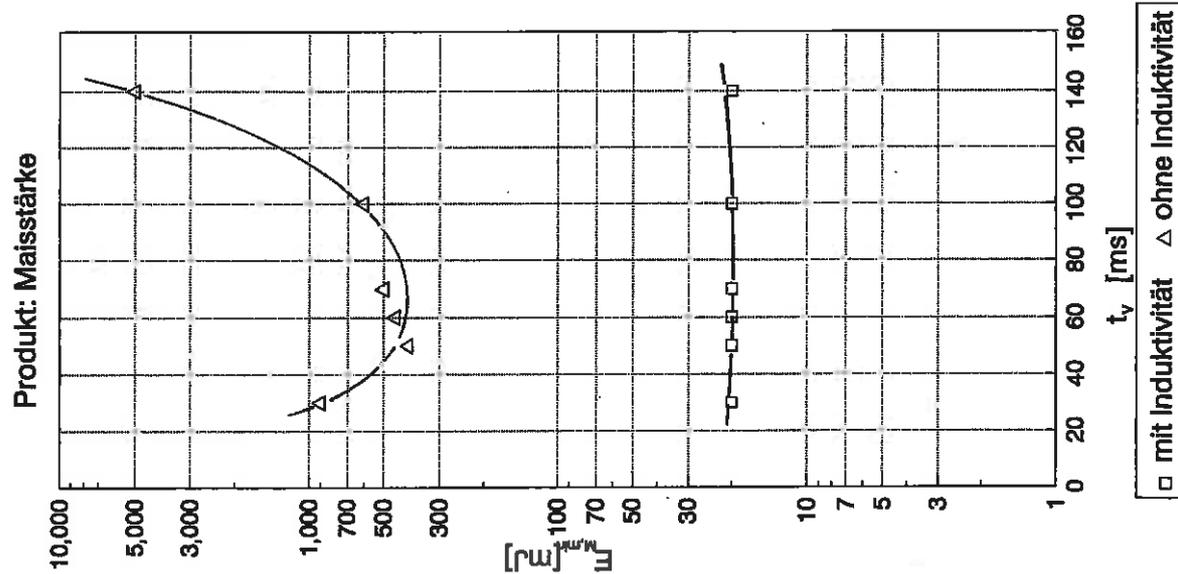


Abb. 3.18:

Aus den Ergebnissen der 3 Teststäube wird die Zündverzögerungszeit mit 100 ms festgelegt. Mit dieser ermittelten Zeit werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt. Diese Zündverzögerungszeit gilt allerdings nur für organische Stäube. Bei den schwereren Metallstäuben wird wahrscheinlich eine andere Zeit gültig sein. Für die Ermittlung der Mindestzündenergie müßte somit für jeden Staub zuerst die optimale Zündverzögerungszeit ermittelt werden. Da dies aber ein zu hoher Versuchsaufwand ist, beschränkt man sich im allgemeinen mit einer aus mehreren Stäuben mit ähnlichen Eigenschaften erhaltenen Zeit. Bei dem Produkt Maisstärke war eine Verringerung der Mindestzündenergiewerte auch bei Veränderung der Zündverzögerungszeit auf 70 bzw. 120 ms nicht möglich.

Die Mindestzündenergie konnte bisher nur in einem kugelförmigen Behälter von  $V = 20$  Liter Inhalt gemessen werden. Für Vergleichsmessungen wurde mit dem Produkt Maltodextrin die minimale Mindestzündenergie zuerst in der modifizierten Hartmannapparatur und dann in der 20 Liter Kugel ermittelt. Von beiden Apparaturen erhielt man fast identische Versuchsergebnisse. Dies bestätigt die Richtigkeit der gewählten Zündverzögerungszeit von 100 ms.

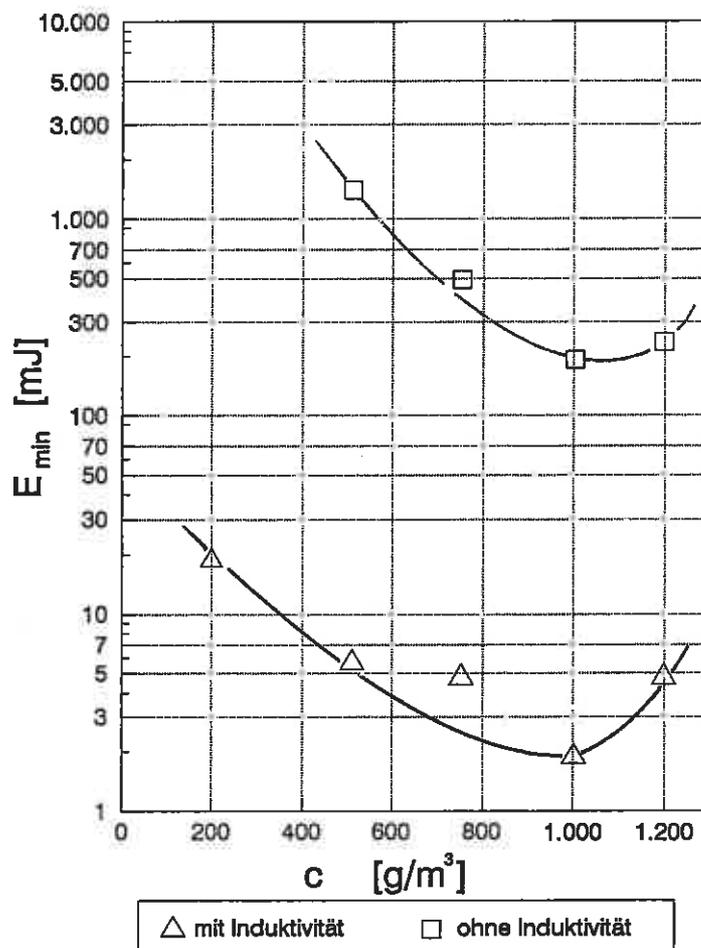


Abb. 3.21: Bestimmung der minimalen Mindestzündenergie von Maltodextrin

## 4. Hauptuntersuchungen unter definierten Klimabedingungen

### 4.1 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

#### 4.1.1 Klimakammer

Die nachfolgenden Untersuchungen zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Stäuben in Abhängigkeit der Klimaparameter wurden in einem Klimaschrank durchgeführt, in dem die Temperatur und die Luftfeuchte verändert werden kann. Der Hauptvorteil einer Klimakammer liegt darin, daß hier die Herstellung eines definierten von den Umgebungsbedingungen des Labors unabhängigen reproduzierbaren Prüfklimas erreicht wird. Die Klimakammer besteht im Prinzip aus einem isolierten, abgeschlossenen Raum, in dessen Innerem sich eine Heiz-Kühleinrichtung sowie eine Be- und Entfeuchtungseinrichtung befindet. Zur Vermeidung starker räumlicher Temperaturunterschiede sowie zur schnellen Temperaturanpassung des Prüfgutes wird die Luft umgewälzt. Spezielle Maßnahmen, wie große Wärmetauscher, Luftmantel und gute Wärmeisolation verhindern das Auftreten von Kondensat in der Prüfkammer.

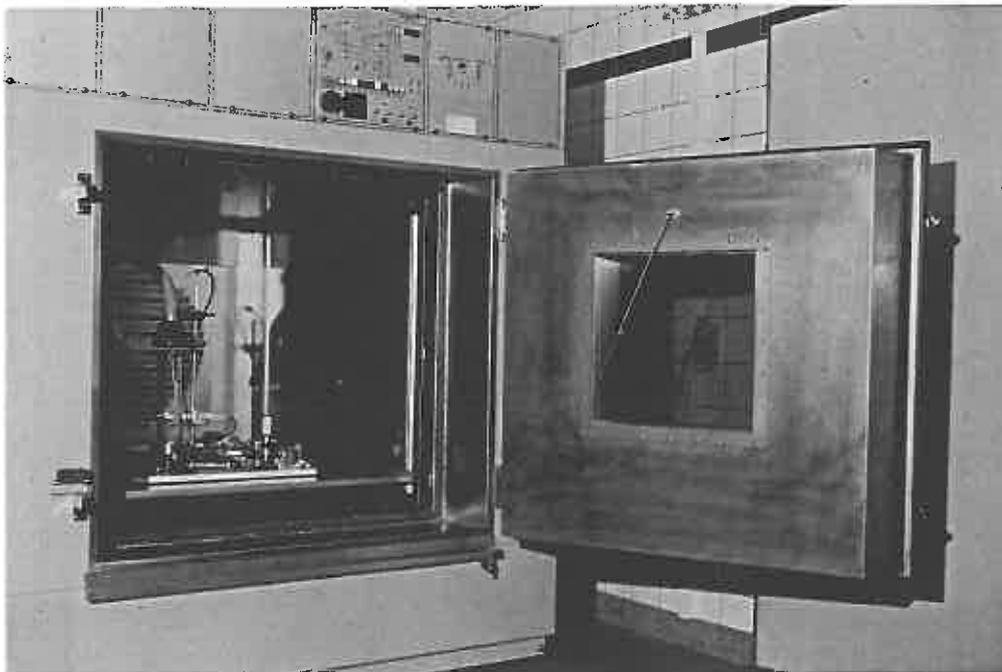


Abb. 4.1: Klimakammer mit geöffneter Tür

In der Klimakammer kann man Temperaturen von  $-40\text{ °C}$  bis  $+180\text{ °C}$  erreichen. Die Luftfeuchte kann allerdings nur innerhalb des Temperaturbereichs von  $+8\text{ °C}$  bis  $+90\text{ °C}$  verändert werden, wobei der Feuchtebereich zwischen 10 % und 100 % Luftfeuchte ( $\varphi = 0,1$  bis 1) liegt.

Eine anschauliche Darstellung der Zustandsänderungen der feuchten Luft bietet das nach Mollier benannte Diagramm (s. Abb. 4.2). In diesem Diagramm sieht man deutlich den Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Luftfeuchte. Auf der Abszisse ist zusätzlich noch der Feuchtegehalt  $x$  der Luft angegeben. Unterhalb der Sättigungslinie befindet sich das Nebelgebiet. Dieser Zustand entsteht dadurch, daß Satttdampf in eine kältere Umgebung gelangt. Durch Kondensation bilden sich winzige Flüssigkeitströpfchen, der vom Beobachter als Nebel wahrgenommen werden. Dieser Zustand kann allerdings nicht in der Klimakammer erreicht werden. Der nutzbare Bereich ist im Mollier - Diagramm farbig schattiert dargestellt.

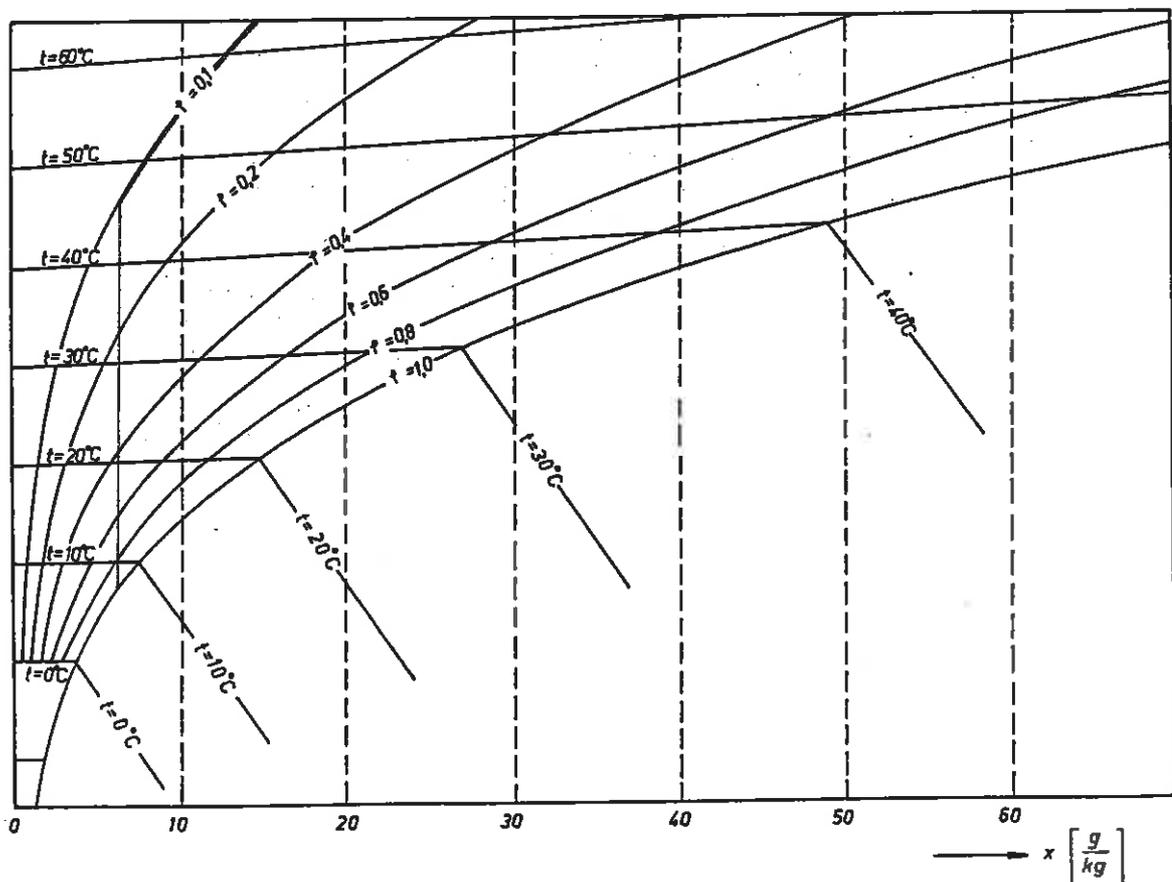


Abb. 4.2: Mollier - Diagramm für feuchte Luft

Bei einer Temperatur von  $8^{\circ}\text{C}$  ist der Sättigungszustand erreicht. ( $\varphi = 1$ ). Dieser Grenzwert entspricht der Taupunkttemperatur des Wassers. Die Klimakammer arbeitet mit einem System, bei dem die gesamte Prüfraumlufte großflächig mit Wasser in Berührung gebracht wird. Hierbei nimmt die Luft die Taupunkttemperatur an, die der Temperatur des Wassers entspricht. Die niedrigste erreichbare Taupunkttemperatur liegt bei  $8^{\circ}\text{C}$ . Die Taupunkttemperatur ist am besten anhand des Mollier - Diagramms zu erklären. (s. Abb. 4.3 )

Kühlt man feuchte ungesättigte Luft vom Zustand 1 ( $t_1; x_1$ ) ab, so ändert sich der Wassergehalt  $x_1$  nicht, d.h. man erreicht im Punkt 2 ( $x_2=x_1$ ) die Sättigungslinie. Punkt 2 wird der Taupunkt und  $t_2$  die Tautemperatur der Luft genannt. [13],[16] Sinngemäß kann man auch für andere Zustände die Taupunkttemperatur bestimmen.

Früher verwendete man vielfach die Dampfbefeuchtung. Hierbei besteht aber die Gefahr der Aerosolbildung. Bei Anwesenheit von Wassertropfchen lässt sich aber ein eindeutiger Klimazustand nicht definieren.

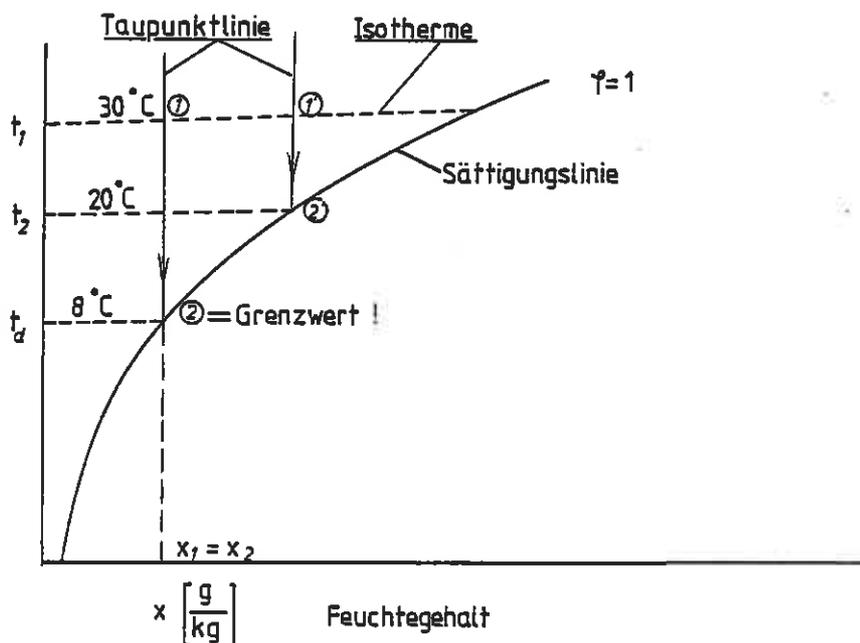


Abb. 4.3: Erklärung der Taupunkttemperatur anhand des Mollier - Diagramms

Elektronische Regler übernehmen die Steuerung der Klimagrößen Temperatur und Luftfeuchte. Für die psychrometrische Feuchtemessung benutzt man zwei Thermometer, ein trockenes und ein solches, dessen Fühler in einen feuchten

Docht eingehüllt ist. Wird das Psychrometer mit der zu untersuchenden Luft angeblasen, so sinkt infolge der Verdunstung die Temperatur des feuchten Thermometers. Man erhält somit die Temperatur  $t_f$ . Das andere Thermometer soll adiabatisch, also vom Wärmeaustausch mit der Umgebung geschützt sein. Dieses zeigt die wahre Lufttemperatur  $t$  an. Mit Hilfe des Mollier - Diagramms für feuchte Luft kann die Feuchtemessung am besten erklärt werden (Abb. 4.4). In dieses Diagramm zeichnet man die Isothermen bis zur Sättigungslinie ( $\varphi=1$ ) ein. Die hierzu gehörige Nebelisotherme verlängert man nun, bis man einen Schnittpunkt mit der bekannten Isotherme  $t$  des trockenen Thermometers erhält. Dies ist dann der gesuchte Luftzustand L mit dem dazugehörigen Feuchtegehalt  $x$ . [13],[14]

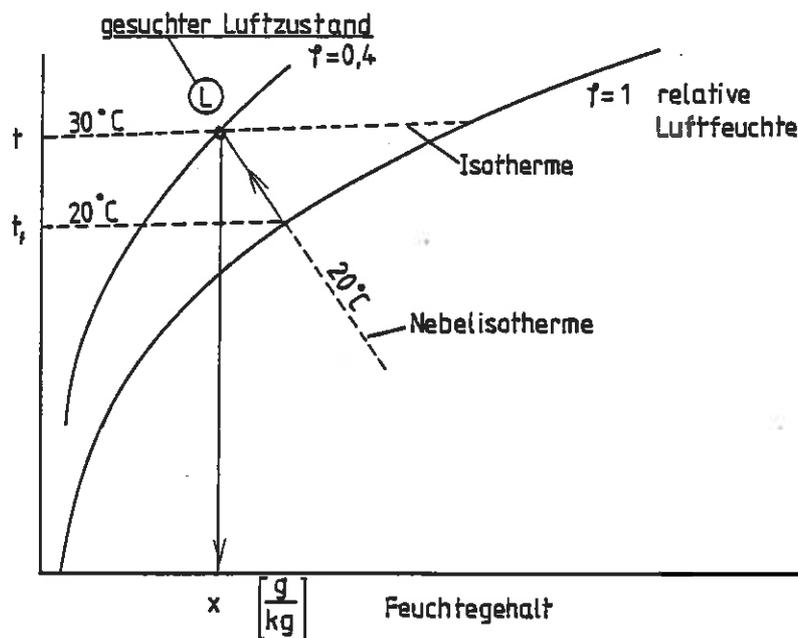


Abb. 4.4: Bestimmung der Luftfeuchte mittels Psychrometer

Eine bessere Übersicht über den nutzbaren Bereich in der Klimakammer bietet die nachfolgende Abbildung, bei der der Zusammenhang zwischen der Luftfeuchte und der Temperatur dargestellt ist. Die Grenzkurve entspricht den aus dem Mollier - Diagramm entnommenen Werten für eine Taupunkttemperatur von 8 °C. Die Luftfeuchte und die Temperatur können nur innerhalb des farblich markierten Bereichs geändert werden.

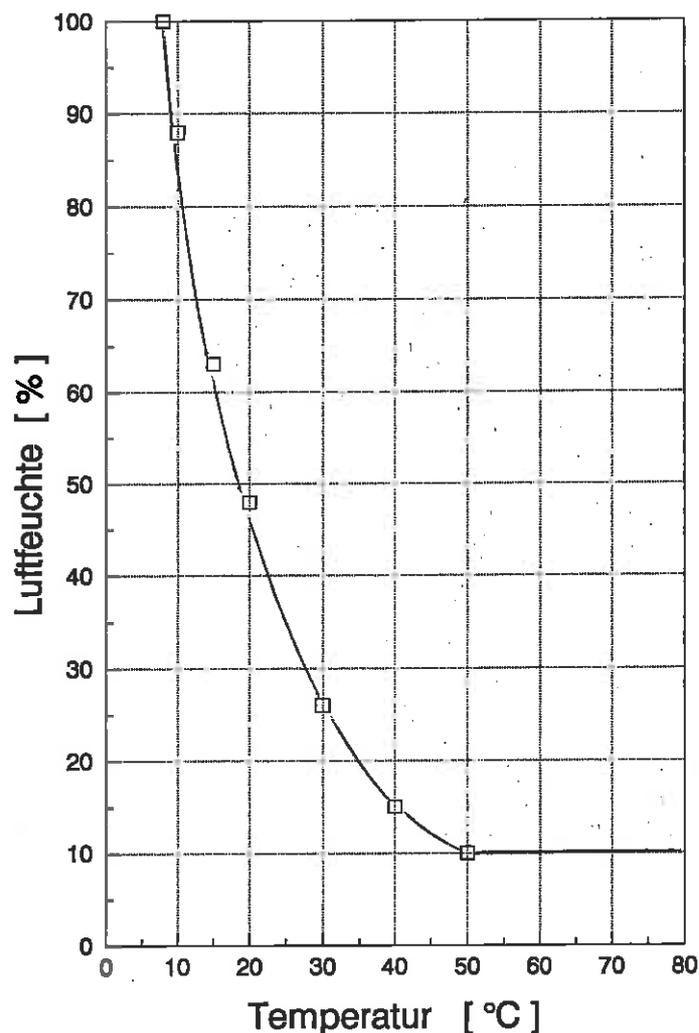


Abb. 4.5: Zusammenhang zwischen der Temperatur und relativen Luftfeuchte

Die folgenden Untersuchungen sollen den Einfluß der Luftfeuchte und der Temperatur auf die Mindestzündenergie aufzeigen. Zum einen muß die relative Luftfeuchte variiert und die Temperatur konstant sein und zum anderen muß bei der Änderung der Temperatur die Luftfeuchte konstant gehalten werden. Die Luftfeuchte kann bei konstanter Temperatur (s. Abb 4.6 ) von Punkt 1' nur bis zum Punkt 2' auf der Grenzkurve verringert werden. Unterhalb der Grenzkurve ist kein Zustandspunkt erreichbar. Bei einer Verringerung der Temperatur kann die Luftfeuchte nur von Punkt 1'' bis zum Punkt 2'' konstant gehalten werden. Eine weitere Absenkung der Temperatur führt dazu, daß die Luftfeuchte Werte entlang der Grenzkurve annimmt. Bei Erreichen von Punkt 3'' ist der Sättigungszustand erreicht. Bis zu einer Temperatur von 0 °C (Punkt 4'') bleibt die Luftfeuchte bei  $\varphi = 1$ .

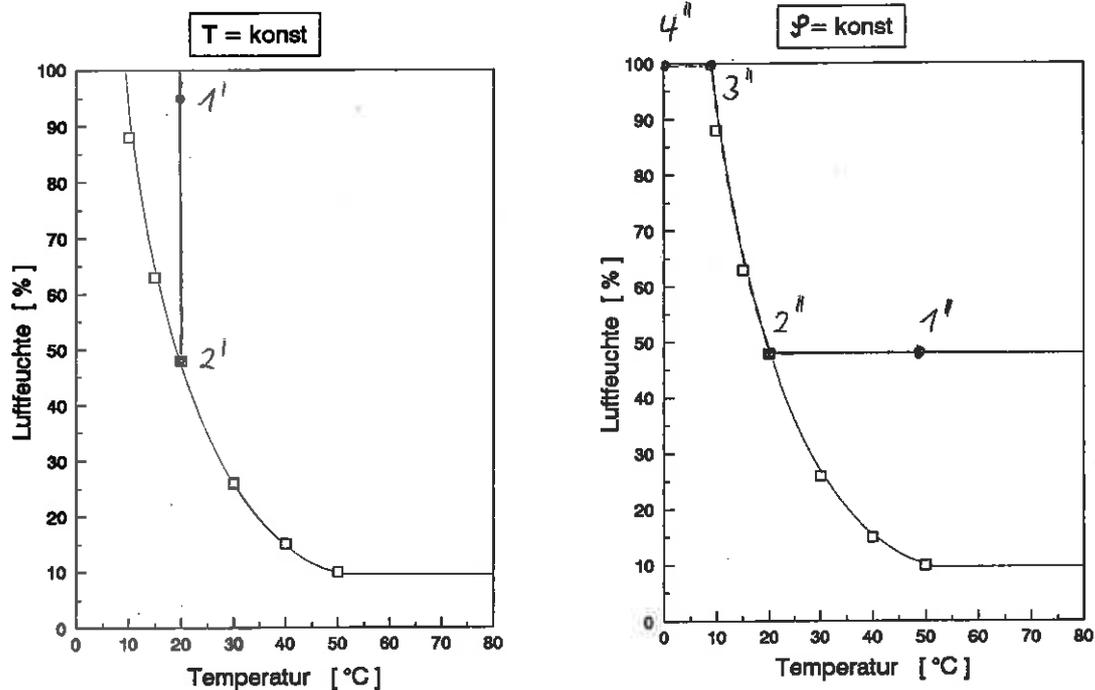


Abb. 4.6: Veränderung der Luftfeuchte und der Temperatur

#### 4.1.2 Einsatz der Versuchsanlage in der Klimakammer

Nachdem die Voruntersuchungen abgeschlossen waren, wurde die Versuchsanlage in die Klimakammer gebracht. Bei den Versuchen im Labor konnten die Abgase durch einen Abzug abgesaugt werden. Diese Möglichkeit fehlte in der Klimakammer. Abhilfe schaffte hier ein Staubsauger. Das Absaugrohr wurde einfach über dem Hartmannrohr befestigt. Der unverbrannte Staub bzw. die Verbrennungsrückstände konnten nun im Staubsauger aufgefangen werden. (s. Abb. 4.7 und 4.8) Eingeschaltet wurde der Staubsauger direkt nach jedem erfolgten Versuch. Ein durchgehendes Absaugen der Luft oberhalb des Hartmannrohres hätte zu einer Änderung der Staubkonzentration geführt. Dies könnte Meßwertverfälschungen zur Folge haben.

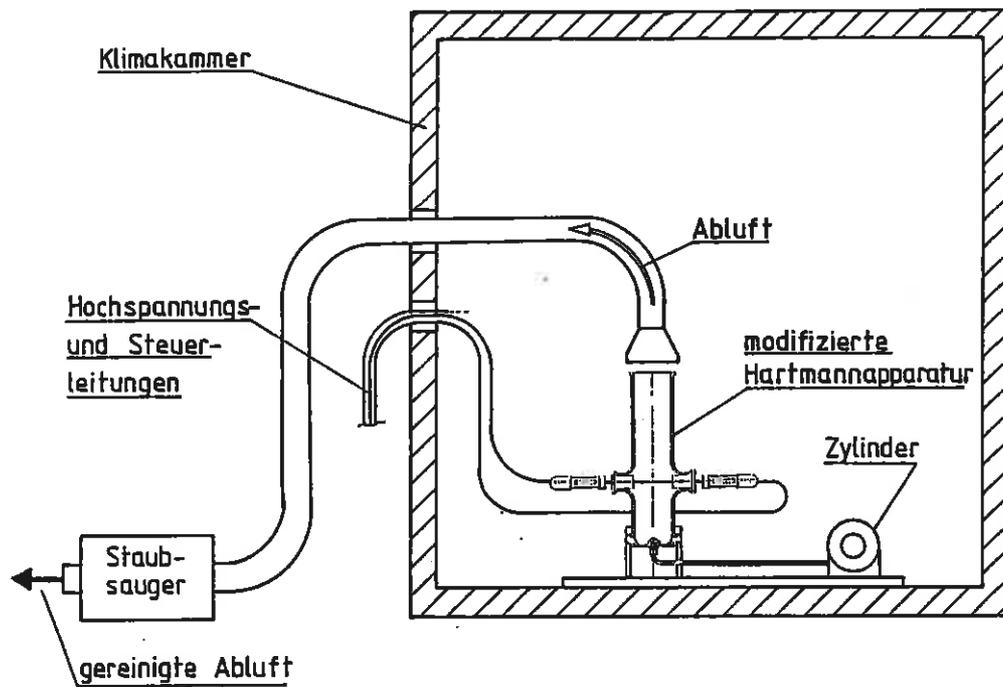


Abb. 4.7: Einbau der Versuchsanlage in der Klimakammer

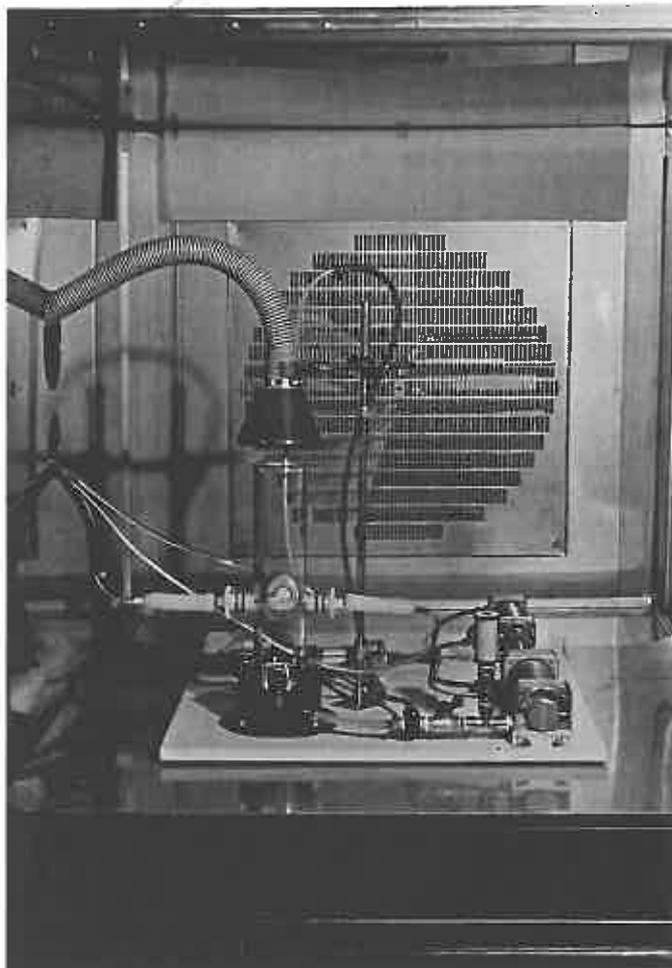


Abb. 4.8: Praktische Realisierung

Die Zuleitungen (Druckluftschläuche, Steuerleitungen) zur Apparatur wie auch der Absaugschlauch konnten durch die Einbauöffnungen geführt werden. Nach erfolgtem Abdichten der verbliebenen Zwischenräume in den Einbauöffnungen konnte mit den ersten Versuchen begonnen werden.

Bei jedem neuen Versuch muß die Staubprobe manuell in das Hartmannrohr eingebracht werden. Durch das Öffnen der Tür des Klimaschranks fällt die Temperatur und die Luftfeuchte immer etwas ab, was sich am stärksten in der Abweichung der Luftfeuchte bemerkbar machte. Hier fiel die Feuchte, bei z.B. eingestellter Luftfeuchte von 95%, um bis zu 20% ab. Die Temperatur blieb relativ konstant. Um die dazu nötigen Wartezeiten bis zum Erreichen der Sollwerte zu verringern, wurde eine Kunststoffolie an die Tür des Klimaschranks angebracht. Dadurch konnte die klimatisierte Luft nicht mehr so schnell nach außen hin entweichen. Die Abweichung der Sollwerte beim Öffnen der Tür lag nun in vertretbaren Grenzen. Die maximale Wartezeit betrug nur noch 2 Minuten.

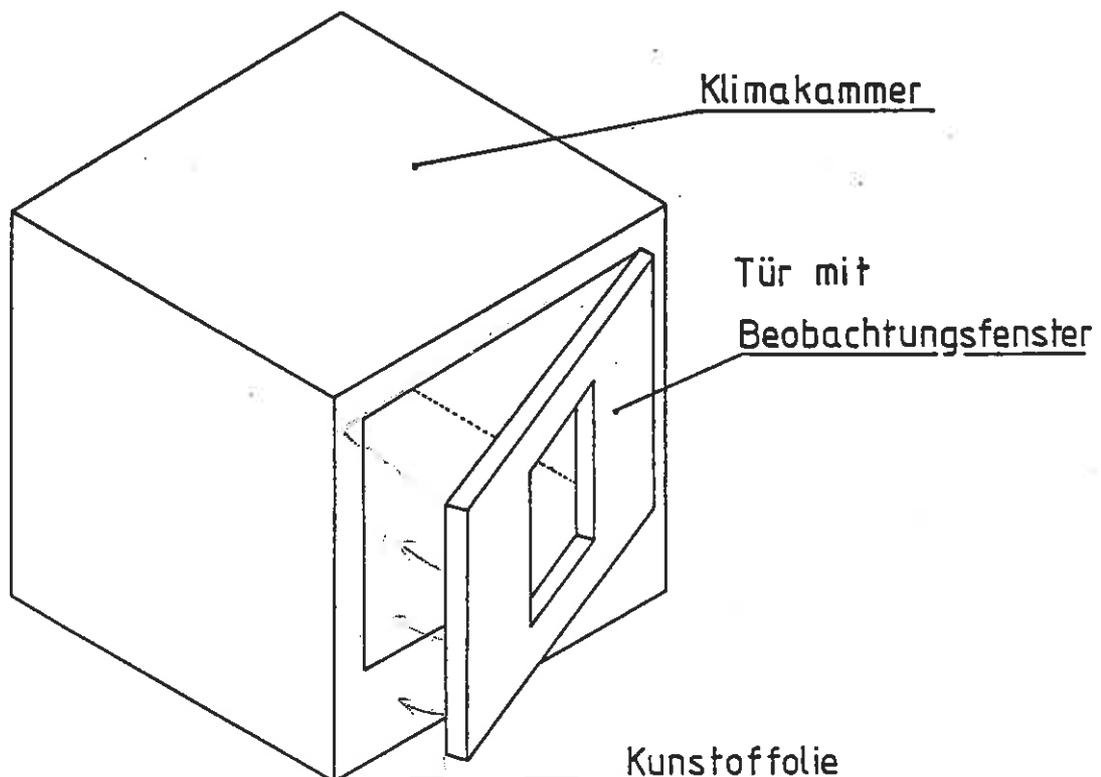


Abb. 4.9: Befestigung einer Kunststoffolie an der Tür der Klimakammer

## 4.2 Produktspezifische Untersuchungen

### 4.2.1 Trocknung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Probenaufbereitung besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Das Produkt wurde bisher nach dem im Kap 3.1 beschriebenen Verfahren aufbereitet. In der Literatur sind keine eindeutigen Angaben über die Probenaufbereitung zu finden. Aus diesem Grunde wurden hierzu systematische Untersuchungen durchgeführt.

Zur Bestimmung der explosionstechnischen Kenngrößen von Stäuben, werden von Firmen Produktproben zur Verfügung gestellt. Diese Proben besitzen je nach Produktionsprozeß oder Lagerung unter feuchter Atmosphäre verschieden hohe Produktfeuchten. Die Produktfeuchte hat aber einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Mindestzündenergie (siehe Kap. 4.3.4) Um reproduzierbare Meßergebnisse zu erhalten, muß das Produkt nach einem genau festgelegten Verfahren getrocknet werden. Dazu wird das Produkt nach erfolgter Siebung mit dem Luftstrahlsieb bzw. Planschwingsieb (Siebmaschenweite =  $63 \mu\text{m}$ ) in Glasbehälter umgefüllt. Um den Einfluß der Schütthöhe auf die Trocknung zu untersuchen, wurden verschieden hohe Behälter randvoll mit Produkt gefüllt. Die Schütthöhen wurden bei 10, 15, 40 und 80 mm festgelegt.

Die Trocknung erfolgt in einem Trockenschrank, wobei die Temperatur von  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Aufenthaltsdauer von 75 min beibehalten wurde. Durch die thermische Trocknung wird Produktfeuchte - meistens Wasser - in den dampfförmigen Zustand übergeführt und somit dem Produkt entzogen. Nach erfolgter Abkühlung wird das getrocknete Produkt gut durchmischt. Aus dieser Mischung entnimmt man dann eine geringe Staubprobenmenge ( $m \approx 4\text{g}$ ) und bestimmt anschließend die Restfeuchte mit dem Feuchteanalysator.

Die Versuchsergebnisse für Maisstärke, Weizenmehl und Maltodextrin sind im Anhang in der Tab. 10.14 zusammengefaßt. Der Zusammenhang zwischen der Produktfeuchte und der Schütthöhe ist in Abb. 4.10, 4.11 und 4.12 graphisch dargestellt.

Trocknung

Produkt: Maltodextrin

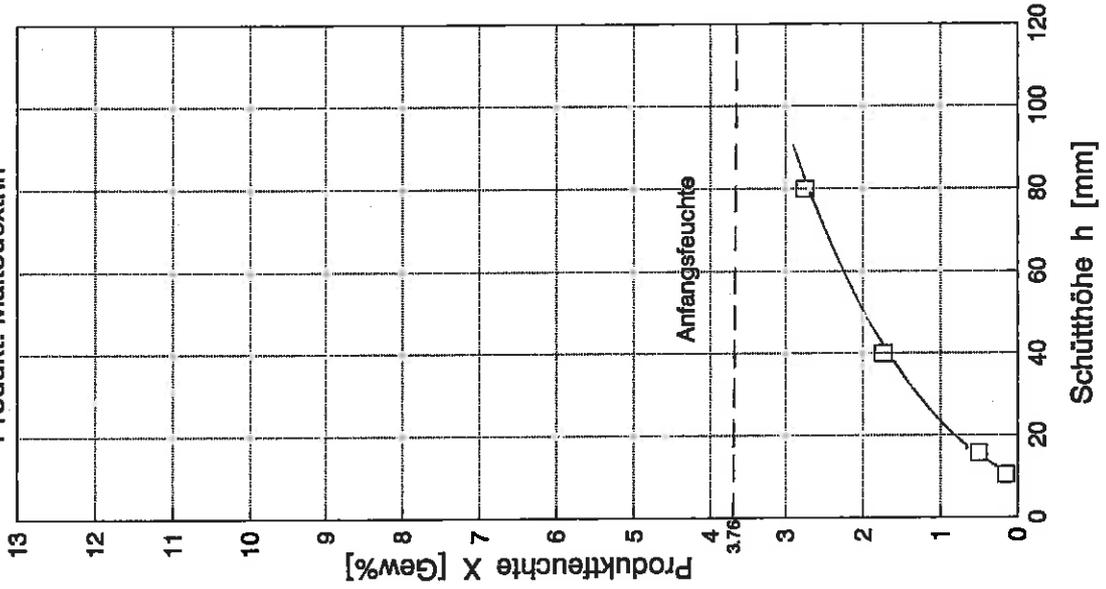


Abb. 4.12:

Trocknung

Produkt: Weizenmehl

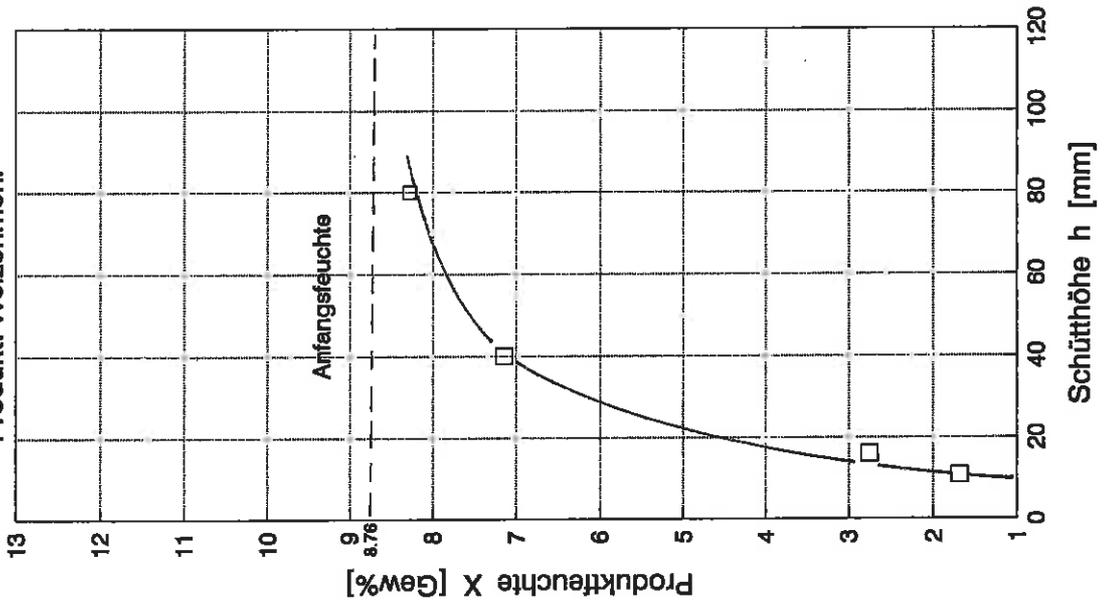


Abb. 4.11:

Trocknung

Produkt: Maistärke

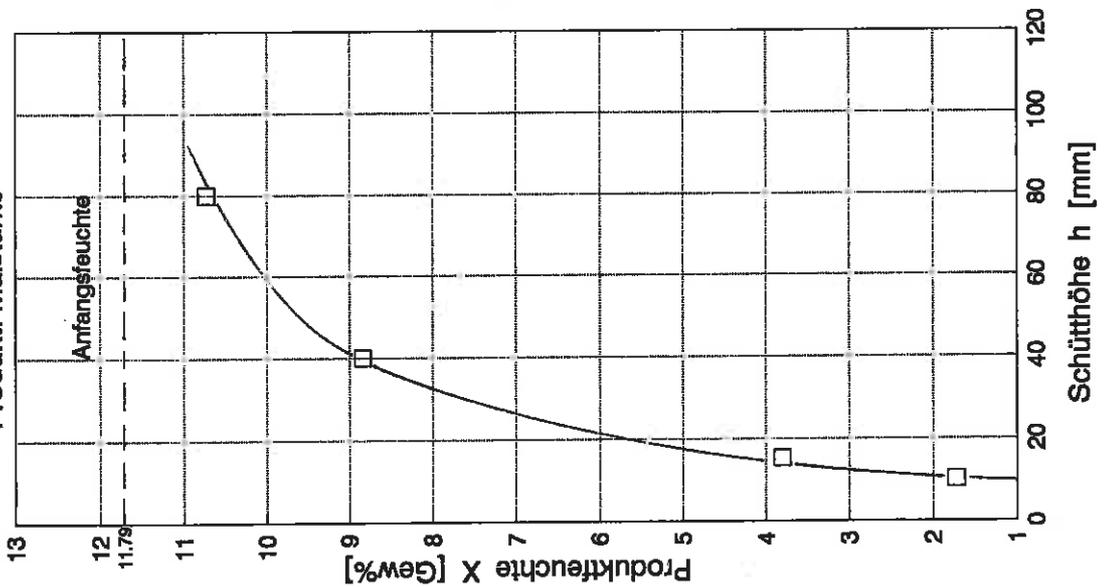


Abb. 4.10:

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß die Schütthöhe einen wichtigen Einfluß auf die Trocknung ausübt. Hierbei sieht man ganz deutlich, daß mit zunehmender Schütthöhe die Produktfeuchte sich asymptotisch den Werten der Anfangsfeuchte nähert. Die Trocknung ist umso wirksamer, je geringer die Schütthöhe ist. Für alle nachfolgenden Untersuchungen wurden daher die Produkte mit einer Schütthöhe von 10 mm getrocknet und anschließend in Gläsern mit Schraubdeckel luftdicht verschlossen.

Bei der Trocknung können zwei Teilvorgänge unterschieden werden. An der Oberfläche des feuchten Gutes findet eine Verdunstung statt. Dies hat eine Auftrocknung der Oberflächenschicht zur Folge. Dieser Teilvorgang löst einen zweiten aus, indem im Innern des Gutes ein Feuchtigkeitsgefälle entsteht, welches eine Wanderung der Feuchtigkeit zur Oberfläche hervorruft. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist dann durch die Diffusionsgeschwindigkeit des Dampfes im Gut, dem hygroskopischen Verhalten, der Porenstruktur und der Wärmeleitfähigkeit des Produktes bestimmt.

Die Feuchte kann als Kapillarflüssigkeit, Quellflüssigkeit oder als gebundene Flüssigkeit enthalten sein. Bei der *Kapillarflüssigkeit* wird die innere Porenoberfläche poröser Festkörper benetzt. Die *Quellflüssigkeit* benetzt nicht nur die zugängliche Oberfläche des Guts, sondern ist Gutsbestandteil. Sie ist meist kolloidal an das Gut gebunden. Ihre Entfernung bei der Trocknung hat ein Schrumpfen des Guts zur Folge. Die Feuchte kann auch als *Kristallwasser* fester formbildender Gutsbestandteil sein. Diese kann nur mit einer drastischen Trocknung entfernt werden. Hierdurch wird allerdings auch die Kristallstruktur unwiderbringlich zerstört, was möglicherweise zu Veränderungen der Produkteigenschaften führt.[22]

Bei der Trocknung muß deshalb auch immer auf thermisch empfindliche Produkte geachtet werden. Bei unbekanntem Produkten sollte deshalb immer eine Vorprüfung mit einer geringen Probemenge durchgeführt werden. Bei der Feststellung, daß sich das betreffende Produkt verändert hat (z.B. Verfärbung), sollte die Trocknung unter Vakuum bei verringerter Temperatur stattfinden.

#### 4.2.2 Feuchtigkeitsaufnahme

Wird ein getrocknetes Produkt einer feuchten Atmosphäre ausgesetzt, nimmt es unterschiedlich schnell Feuchtigkeit aus der Luft auf. Um nun festzustellen, wie schnell die Feuchtigkeitsaufnahme vonstatten geht, wurde getrocknetes Feingut ( $m \approx 4g$ ) in Aluminiumschalen von ca. 10 cm Durchmesser gegeben. Die Schütthöhe betrug maximal 2 - 3mm. Mehrere dieser mit Staubproben gefüllter Schalen wurden nun definierten Klimabedingungen ausgesetzt. In Zeitabständen von maximal 1 Stunde wurde eine Schale herausgenommen, und die Restfeuchte mit dem Feuchteanalysator bestimmt. Die Messwerte sind in Anhang 10.15 zu finden. Die Feuchteaufnahme in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer ist der Abb. 4.14 bis 4.16 zu entnehmen.

Bei allen Produkten ist ein sprunghafter Anstieg der Produktfeuchte innerhalb einer halben Stunde festzustellen. Nach ca. 2 Stunden ist fast der Restfeuchteendwert erreicht. Danach stellt sich eine Art Sättigungszustand ein. Mit Maltodextrin konnten allerdings diese Messungen nicht zu Ende geführt werden, da es sich bei hoher Luftfeuchte bereits verflüssigt. Dies läßt auf ein stark hygroskopisches Verhalten schließen.

Wird ein Produkt in eine feuchte Atmosphäre gebracht, so adsorbiert es Feuchte bis zum Eintreten des Adsorptionsgleichgewichts. Dies dauert so lange, bis der Dampfdruck in der Umgebung dem im Gutsinnern herrschenden Feuchtedampfdruck entspricht. [24]

Die relative Luftfeuchte  $\varphi$  ist das Verhältnis des in der feuchten Luft vorhandenen Wasserdampfdruck  $p_D$  zu dem bei gleicher Temperatur bei Sättigung vorhandenen Sattedampfdruck  $p_s$ .

$$\varphi = \frac{p_D}{p_s} \quad (4 - 1)$$

$\varphi$	= Feuchte	[%]
$p_D$	= Dampfdruck	[bar]
$p_s$	= Sattedampfdruck	[bar]

Dieses Gleichgewicht wird durch *Sorptionsisothermen* beschrieben (Abb. 4.13), deren Verlauf von der Art des Guts als auch von der Feuchtebindung an das Gut abhängen. Die Sorptionsisotherme müssen experimentell bestimmt werden. Sie geben bei einer bestimmten Temperatur den Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt  $X$ , bezogen auf das Trockengewicht des Gutes, und der relativen Feuchte  $\varphi$  in der direkten Umgebung der Probe wieder. Der Verlauf der meisten Sorptionsisothermen ist S - förmig. [24]

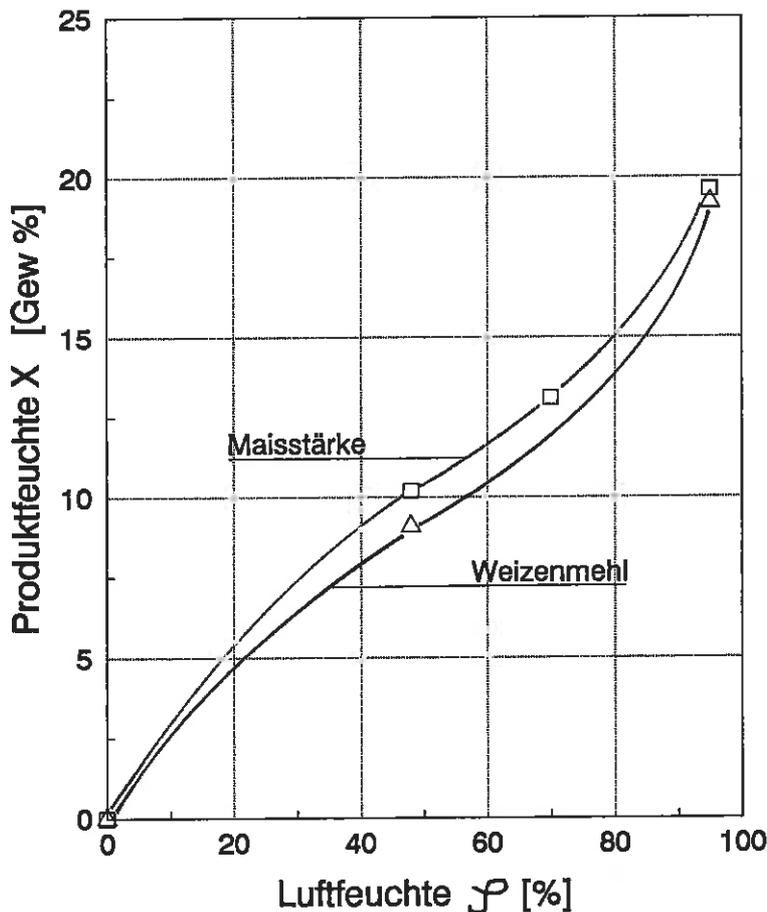


Abb. 4.13: Sorptionsisotherme von Maisstärke und Weizenmehl

Für Maistärke und Weizenmehl wurden die Werte der Produktfeuchte bei Erreichen des Gleichgewichts in Abhängigkeit der Luftfeuchte aufgetragen. Die so erhaltenen Sorptionsisothermen besitzen näherungsweise den in Abb. 4.13 gezeigten Verlauf. Eine exakte Darstellung ist aufgrund der geringen Anzahl von Meßwerte nicht möglich. Die eingezeichneten Werte sind den Abb. 4.14 und 4.15 entnommen

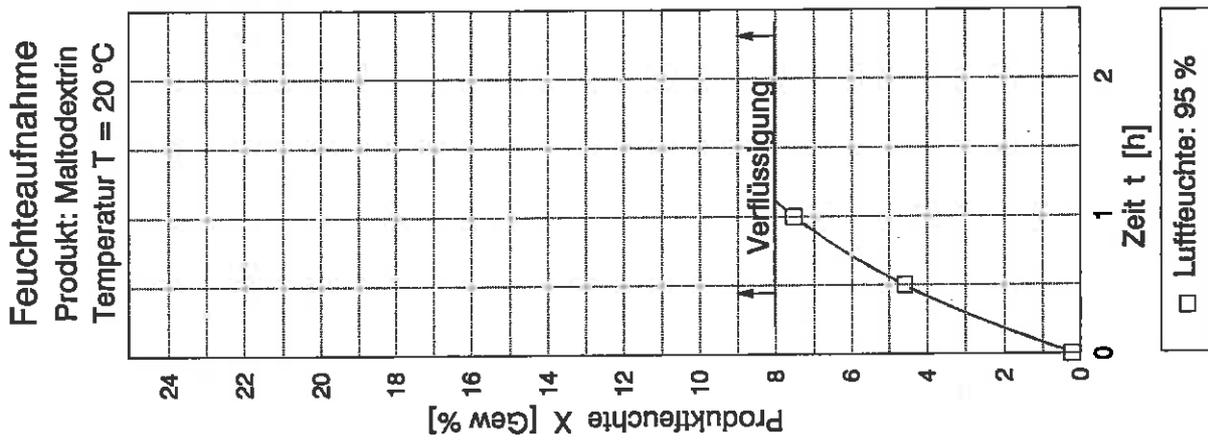


Abb. 4.16:

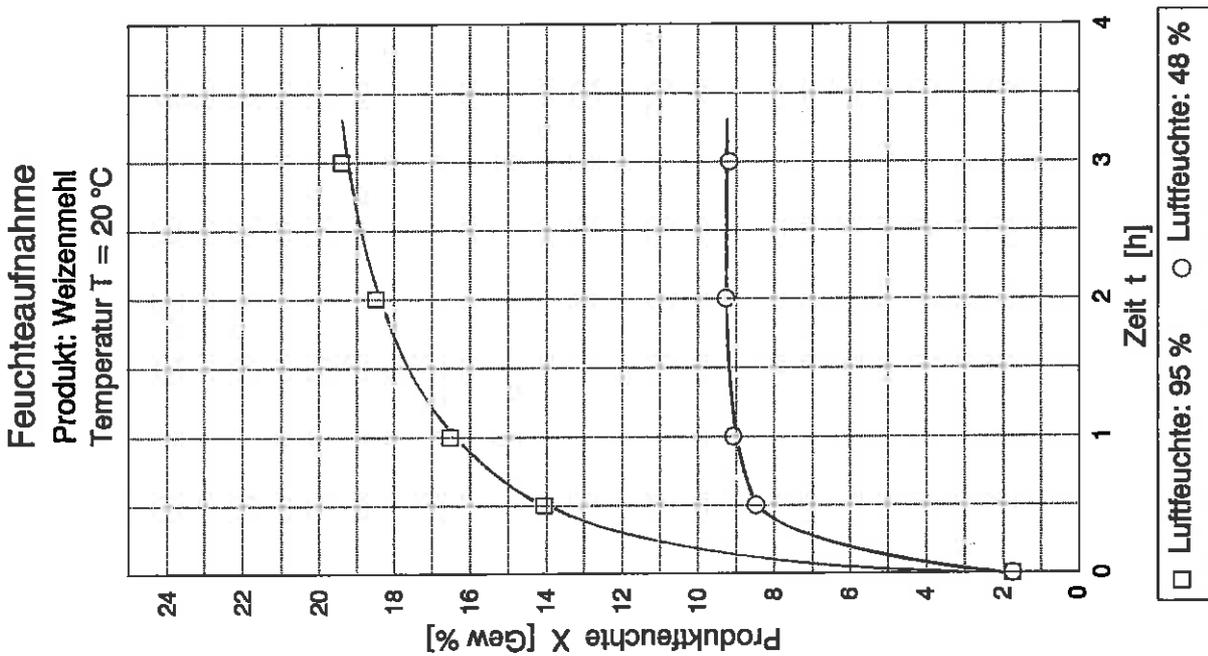


Abb. 4.15:

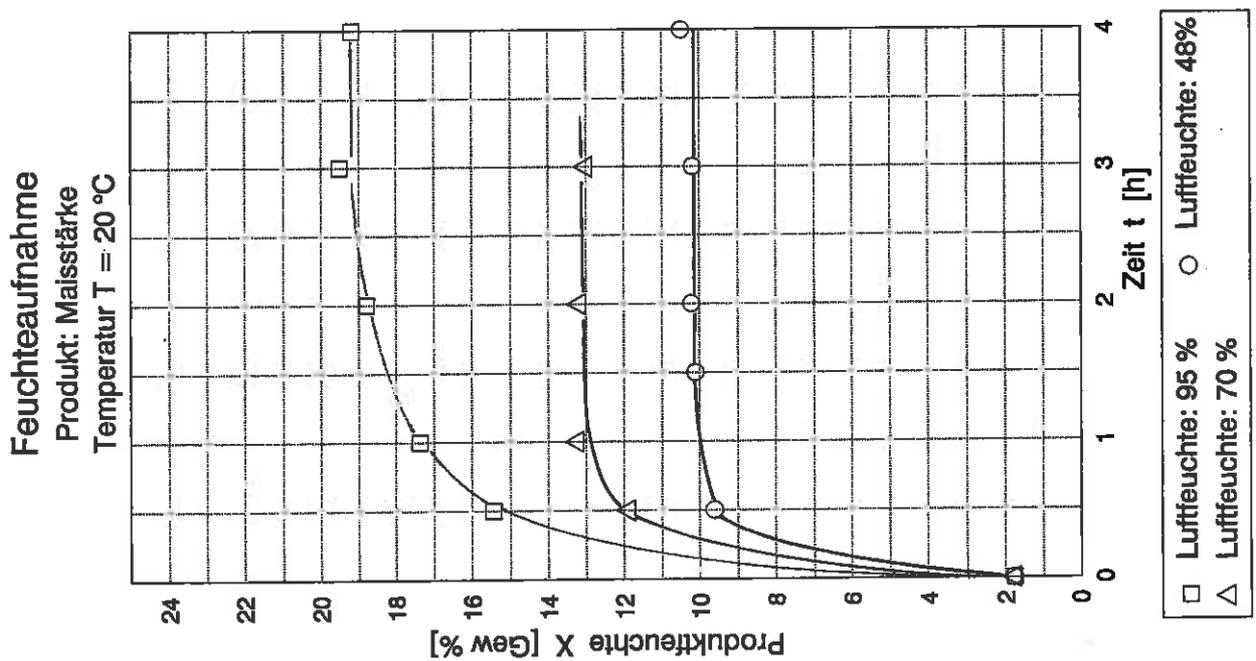


Abb. 4.14:

### 4.3 Versuchsergebnisse

#### 4.3.1 Vorbemerkung

Für die Ermittlung der Mindestzündenergie bei einer bestimmten Staubkonzentration können bis zu 30 Versuche notwendig sein. Diese Untersuchungen werden dann noch über einen breiten Konzentrationsbereich durchgeführt. Um die dazu notwendige Zeit zu verkürzen, werden schon vor Versuchsbeginn die Staubproben abgewogen. Hierzu wird das Produkt in kleine Aluminiumbecher gefüllt und anschließend luftdicht verschlossen. Dadurch wird verhindert, daß das Produkt auch während der Versuchsdauer keine Feuchtigkeit aufnimmt.

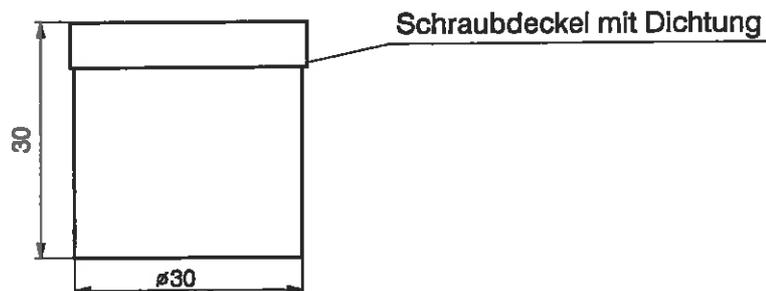


Abb. 4.17: Aluminiumbecher mit Schraubdeckel

Vor dem Beginn der Versuchsreihen werden die gewünschten Feuchte- und Temperaturwerte entsprechend Abb. 4.6 eingestellt. Danach werden die vorbereiteten Proben in den Klimaschrank gebracht. Die Staubprobe muß für jeden Versuch manuell in das Hartmannrohr gegeben werden. Hierzu ist es allerdings notwendig, die Tür des Klimaschranks zu öffnen. Dieser Vorgang darf nicht zu lange dauern, da sich sonst die Feuchte- und Temperaturwerte ändern. Nach dem Schließen der Tür kann durch ein Beobachtungsfenster der Versuchsablauf verfolgt werden. In der Dunkelheit der Klimakammer kann leicht festgestellt werden, ob eine Zündung des Staub/Luft-Gemisches erfolgt. Anzumerken ist hier noch, daß sich alle ermittelten Meßwerte bei den folgenden Untersuchungen auf eine Zündverzögerungszeit von  $t_v = 100$  ms beziehen.

### 4.3.2 Einfluß der Luftfeuchte

Ein Hauptziel dieser Arbeit ist es, den Einfluß der Luftfeuchte auf die Mindestzündenergie zu untersuchen. Bei einer Temperatur von 20 °C ergibt sich aus Abbildung 4.5 ein maximaler Bereich der relativen Luftfeuchte von 48% bis 100%. Die Mindestzündenergie wurde bei 48% bzw 95% relativer Luftfeuchte - unter Einfluß einer Induktivität im Entladekreis - über einen breiten Staubkonzentrationsbereich bestimmt. Für die Untersuchungen wurde zuvor getrocknetes Produkt verwendet. Die Produktfeuchte lag bei Maisstärke und Weizenmehl bei jeweils 1,7 Gewichtsprozent. Die erhaltenen Messergebnisse sind der Tabelle 10.16 (Anhang) zu entnehmen. Der Zusammenhang zwischen der Luftfeuchte  $\varphi$  und der Mindestzündenergie  $E_{\min}$  ist in der Abbildung 4.18 und 4.19 dargestellt.

Einfluß der Luftfeuchte

Produkt: Weizenmehl  
Temperatur T = 20 °C

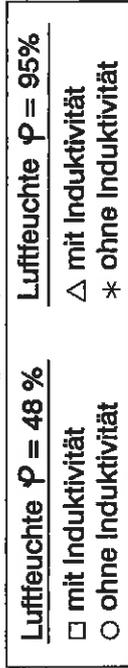
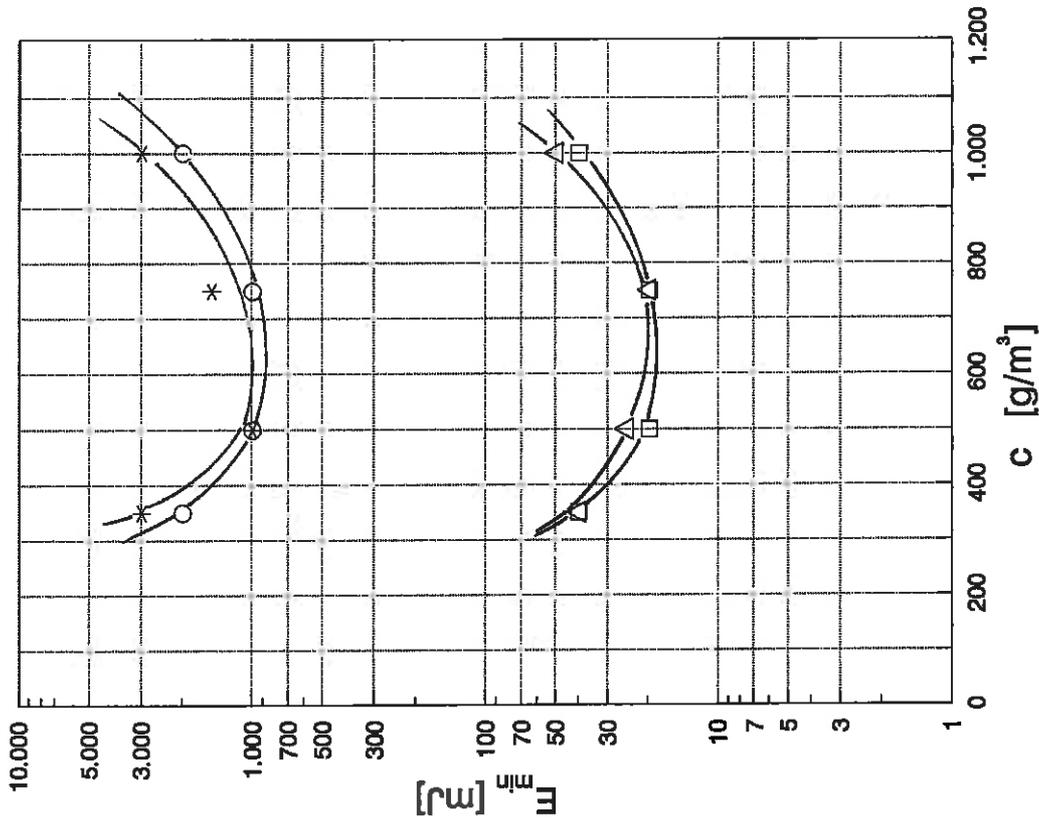


Abb. 4.19:

Einfluß der Luftfeuchte

Produkt: Maisstärke  
Temperatur T = 20 °C

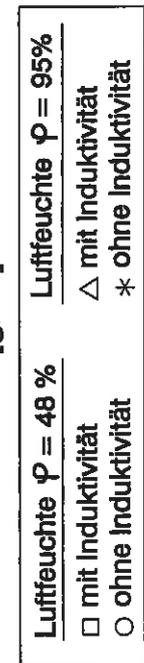
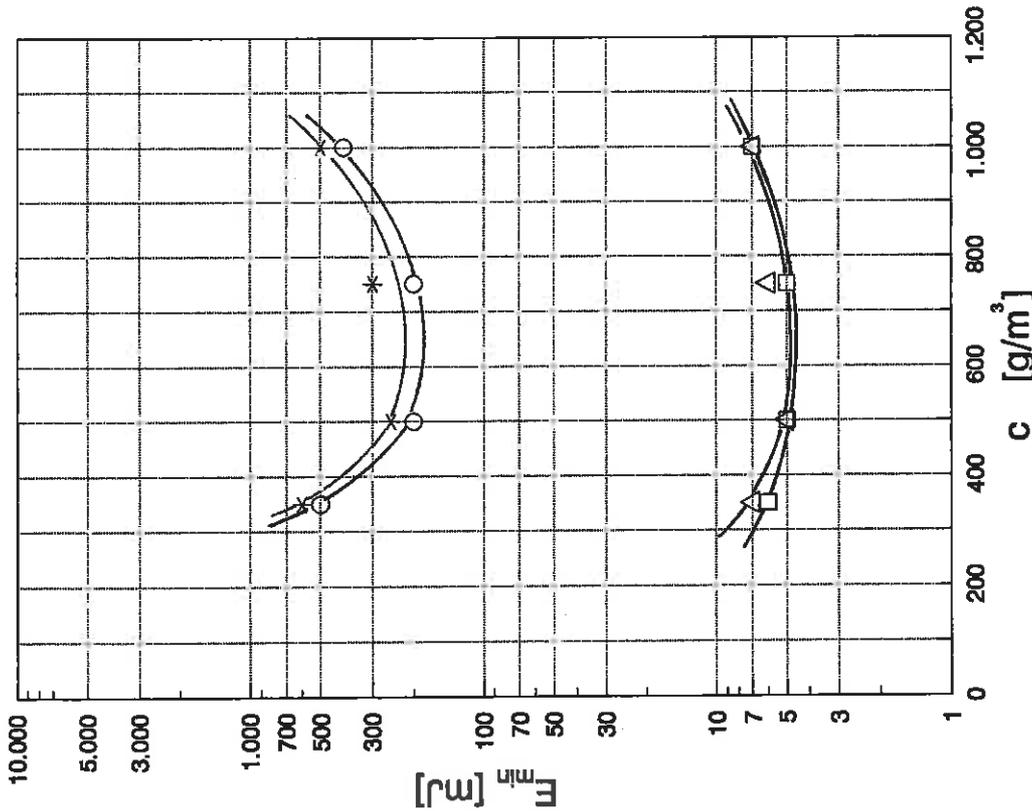


Abb. 4.18:

### 4.3.3 Einfluß der Temperatur

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluß zu ermitteln, den die Temperatur auf das Zündverhalten brennbarer Stäube gegenüber Kondensator-entladungen einnimmt.

Die Untersuchungen im Hinblick auf den Temperatureinfluß auf die Mindestzündenergie wurden schon von Glarner durchgeführt. Für die Explosionskenngrößenbestimmung brennbarer Stäube verwendete er eine kugelförmige Laborapparatur mit  $V = 20$  l Inhalt. Hierzu wurde das Produkt und die Apparatur auf bis zu  $200$  °C aufgeheizt.

Die Auftragung der Messwerte erfolgte in ein Diagramm mit doppeltlogarithmischer Skalenteilung. Durch die Verbindung der Messpunkte ergeben sich Geraden, die einen gemeinsamen Schnittpunkt haben. Mit Hilfe von Regressionsverfahren hat Glarner [2] den Schnittpunkt bei ( $T = 1000$ °C;  $E_{M,min} = 0,088$ mJ) festgelegt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 4.20 zu sehen.

Die Versuche in der Klimakammer konnten allerdings nur bis zu Versuchstemperaturen von max.  $50$  °C durchgeführt werden, da die Proben-eingabe manuell erfolgt. Die minimale Mindestzündenergie wurde bei einer Temperatur von  $5$  °C,  $20$  °C und  $50$  °C - mit und ohne Induktivität im Entladekreis - ermittelt. Um den Temperatureinfluß auf die minimale Mindestzündenergie zu erhalten, sollte die Luftfeuchte konstant sein. Bei einer Temperatur von  $20$  °C bzw  $50$  °C kann die relative Luftfeuchte bei  $48\%$  gehalten werden. Aus dem Feuchtediagramm geht hervor, daß bei einer Temperatur von  $5$ °C die Luftfeuchte  $100\%$  betragen wird. Durch das Öffnen der Tür fällt die Feuchte jedoch stets ab, die Temperatur bleibt dagegen annähernd gleich. Durch die Ausnutzung dieses Effekts konnte die relative Luftfeuchte bis auf ca.  $50\%$  abgesenkt werden. Um den Temperaturanstieg ( $\approx 1$  °C) beim Öffnen der Tür auszugleichen, wurde der Sollwert auf  $T = 4$  °C eingestellt.

Bei der Ermittlung der Mindestzündenergie in Abhängigkeit der Luftfeuchte wurden Messungen über einen breiten Konzentrationsbereich durchgeführt. (s. Kap.: 4.3.2) Diese aufwendigen Versuchsreihen konnte man sich jetzt ersparen, da die zündefreudigste Staubkonzentration für jeden Teststaub bekannt ist. Für die Untersuchungen wurde ebenfalls getrocknetes Produkt verwendet. Die Produktfeuchte lag bei Maisstärke und Weizenmehl bei jeweils  $1,7$  und bei Malodextrin bei  $0,2$  Gewichtsprozent.

Nach erfolgter Aufheizung der Klimakammer auf die gewünschte Temperatur wurden die vorher abgewogenen und in Aluminiumbechern verschlossenen

Proben in den Versuchsraum gegeben und dort ca. eine halbe Stunde aufbewahrt. Hierdurch war gewährleistet, daß die Proben die selbe Temperatur wie die Umgebungstemperatur annehmen.

Die erhaltenen Messergebnisse sind in Tabelle 10.17 (Anhang) zusammengefaßt. In Anlehnung an die Versuchsergebnisse von Glarner, sind die Messwerte ebenfalls in doppeltlogarithmischer Darstellung aufgetragen. In Abbildung 4.21 ist die minimale Mindestzündenergie in Abhängigkeit der Temperatur graphisch dargestellt.

Anzumerken ist hier noch, daß Maltodextrin bei einer Temperatur von 50 °C und einer Energie von 1 mJ gezündet werden konnte. Es ist anzunehmen, daß die minimale Mindestzündenergie unterhalb von 1 mJ liegt. Eine Verringerung der Energie ( $E < 1\text{mJ}$ ) ist mit der vorhandenen Kondensatorentladungsapparatur nicht möglich.

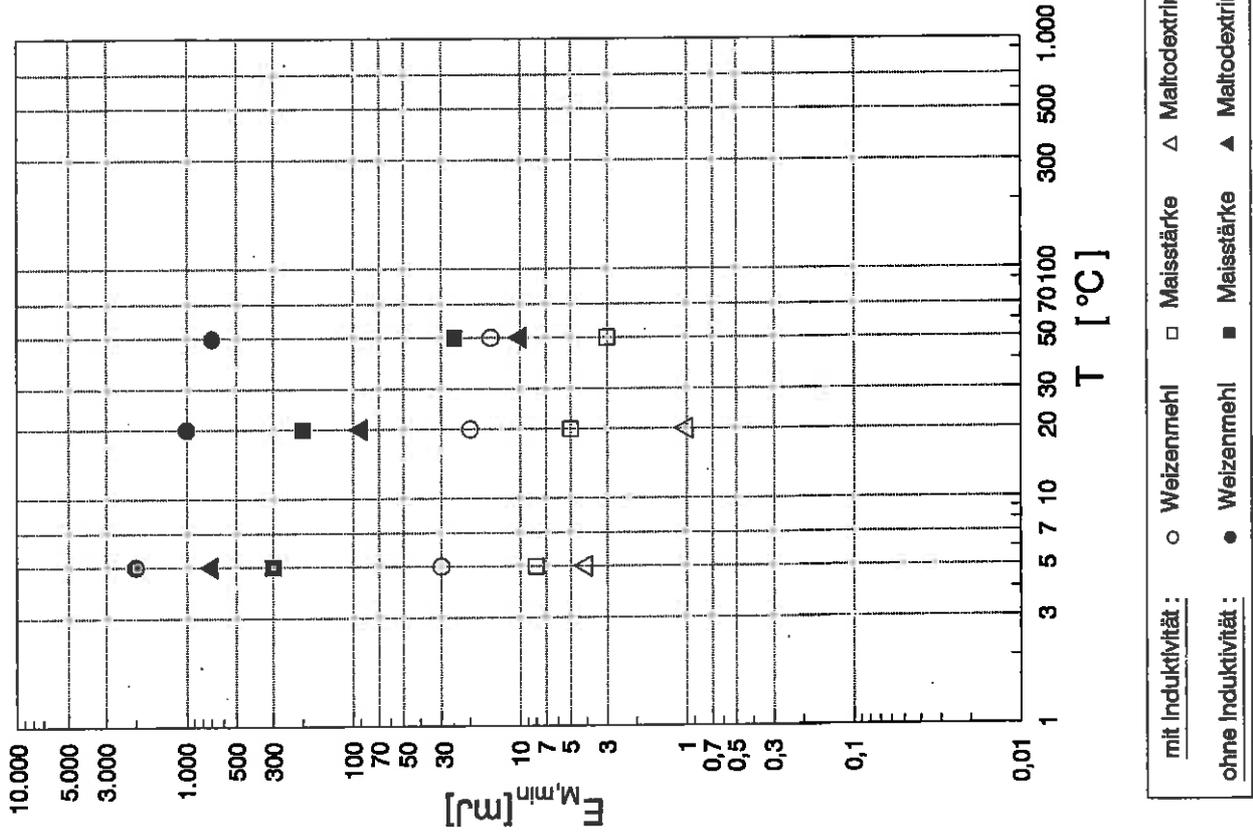


Abb. 4.21:

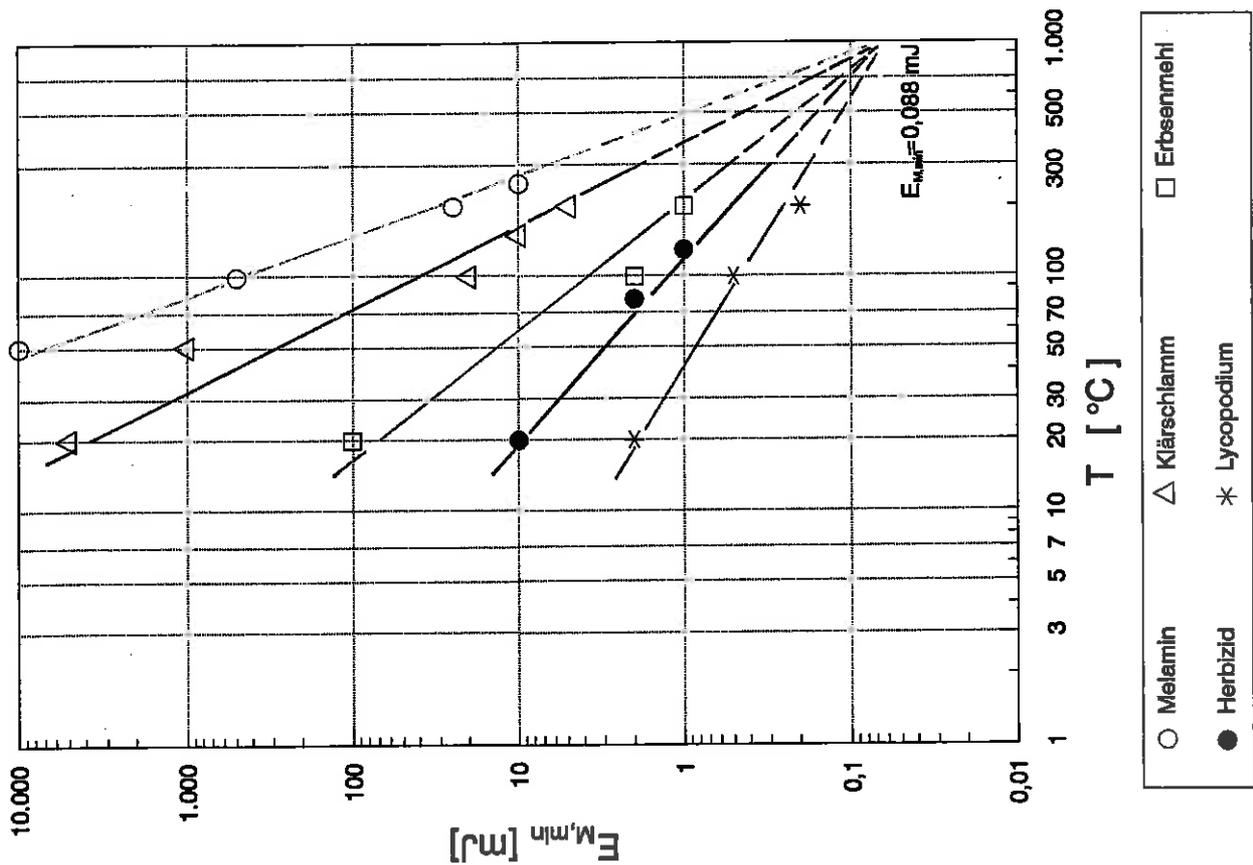


Abb. 4.20 : (v. Glarner [2])

#### **4.3.4 Einfluß der Produktfeuchte**

Die Abhängigkeit der minimalen Mindestzündenergie von der Produktfeuchte zeigen die nachfolgenden Untersuchungen. Begonnen wurden die Versuche mit nicht getrocknetem Produkt. Um noch höhere Produktfeuchten zu erhalten, wurden die Staubproben einer Atmosphäre mit einer relativen Luftfeuchte von 95% ausgesetzt. Hierzu wurde einfach der Deckel der Aluminiumbecher, in denen sich die Staubproben befinden, weggelassen. Das Produkt nimmt aufgrund der geringen Menge relativ rasch die Feuchte auf, so daß nach etwa 2 Stunden Aufenthalt unter feuchter Atmosphäre mit den Versuchen begonnen werden konnte. (s. Kap.: 4.2.2) Mit Maltodextrin konnten allerdings die Versuche nur bis zu einer maximale Produktfeuchte von 7 Gewichtsprozent durchgeführt werden, da es sich bei noch höherer Produktfeuchte verflüssigt. Die Bezugstemperatur lag für alle ermittelten Werte bei ca. 20 °C. Durch den vorher festgestellten geringen Einfluß der Luftfeuchte auf die Mindestzündenergie von brennbaren Stäuben, konnten somit auch teilweise Messwerte aus den vorhergehenden Untersuchungen übernommen werden. Die Messwerte sind in Tabelle 10.18 (Anhang) festgehalten und in Abbildung 4.22, 4.23, 4.24 aufgezeichnet.

**Einfluß der Produktfeuchte**

Produkt: Maltodextrin  
Temperatur T = 20 °C

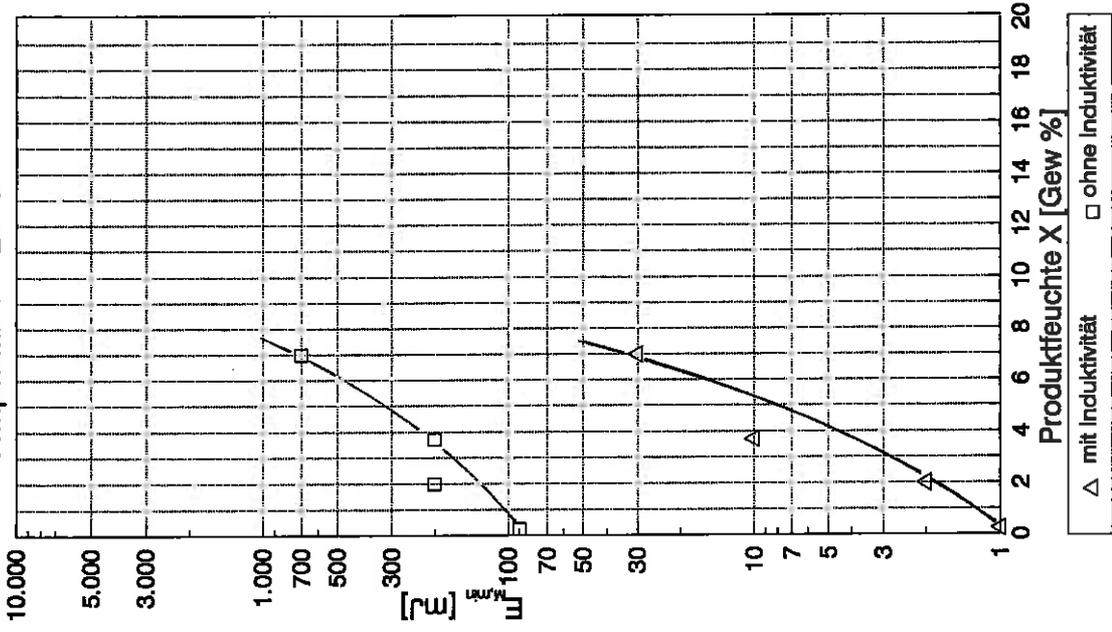


Abb. 4.24:

**Einfluß der Produktfeuchte**

Produkt: Weizenmehl  
Temperatur T = 20 °C

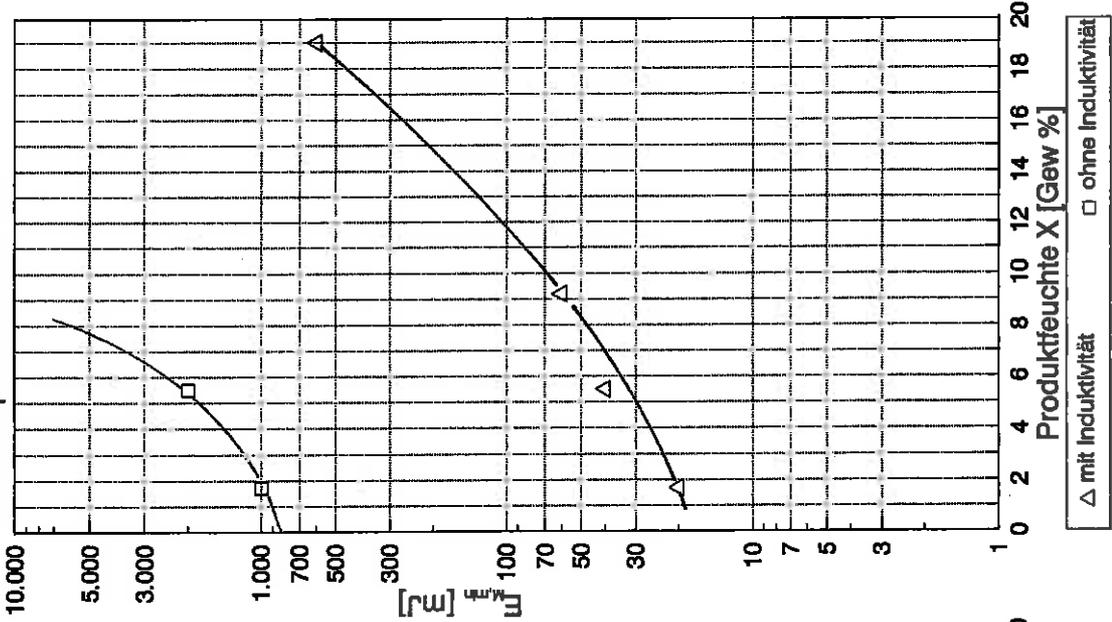


Abb. 4.23:

**Einfluß der Produktfeuchte**

Produkt: Maisstärke  
Temperatur T = 20 °C

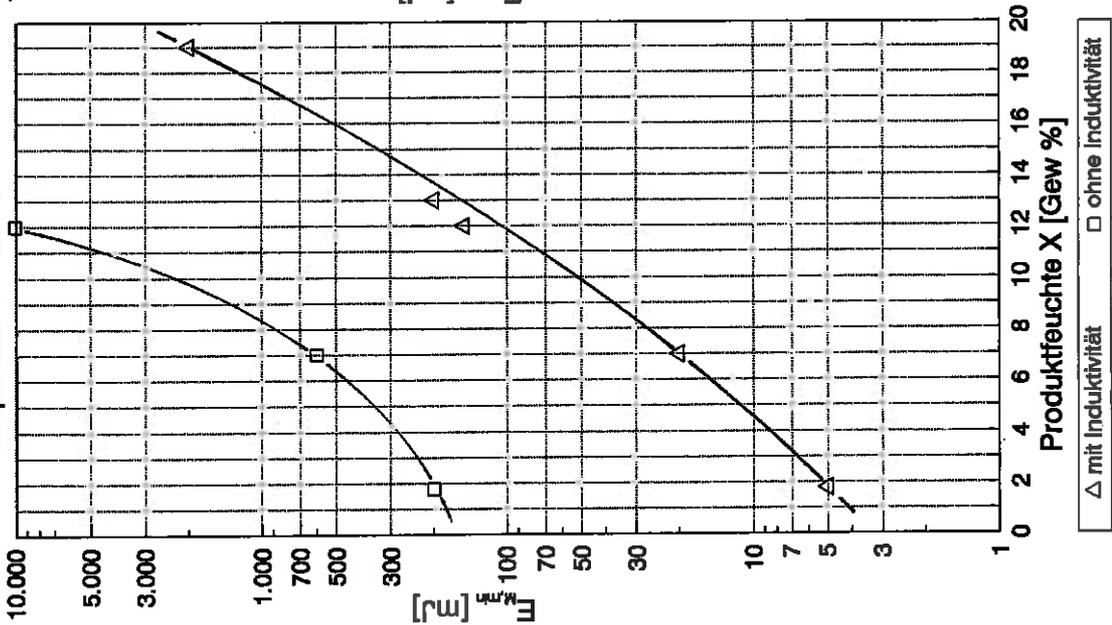


Abb. 4.22:

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche zur Bestimmung der Mindestzündenergie unter Variation verschiedener Parameter lieferten sehr viele Informationen über das Explosionsverhalten der dort erwähnten Stäube bei unterschiedlichen Kondensatorentladungsenergien.

Auf die im Kapitel 4.3 ermittelten Versuchsergebnisse wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

In Abbildung 4.18 und 4.19 sieht man den Einfluß der *Luftfeuchte* auf die Mindestzündenergie. Hierbei ist eine geringfügige Erhöhung der Mindestzündenergie bei einer relativen Luftfeuchte von 95% gegenüber den ermittelten Werten bei 48% Luftfeuchte festzustellen. Die Abweichung der Messergebnisse kann verschiedene Ursachen haben. Eine mögliche Fehlerquelle kann die sein, daß bei hoher Luftfeuchte die Elektrodenoberfläche sich schnell mit einer Schmutzschicht aus aufgewirbelten und verbrannten Staubteilchen überzieht. Die Anlagerung von Produkt an den Elektroden verhindert, besonders bei niedrigen Energien, ein einwandfreies Überspringen des Zündfunken. Aus diesem Grunde mußten bei den Messungen die Elektroden möglichst oft gereinigt werden.

Die wahrscheinlichere Möglichkeit, weshalb es zu Meßwertabweichungen kommen konnte, gibt die nachfolgende Erklärung. Vor jedem neuen Zündversuch muß die Tür vom Klimaschrank geöffnet werden. Hierbei fällt die Luftfeuchte immer etwas ab (max. 10 %). Nachdem die Tür geschlossen ist, muß man ca. 2 - 3 Minuten warten, bis der gewünschte Feuchtwert wieder erreicht ist. Erst dann kann der Versuch gestartet werden. Es ist zu erwarten, daß das Produkt innerhalb der Wartezeit Feuchte aus der Umgebungsluft aufnimmt. Die dadurch ansteigende Produktfeuchte könnte eine Erhöhung der Zündenergie zur Folge haben, was auch im Rahmen der Meßgenauigkeit liegt. Falls dies der Fall sein sollte, läßt sich aus den entsprechenden Diagrammen (s. Abb. 4.22 und 4.23) die Zunahme der Produktfeuchte zurückrechnen. Bei Maisstärke und Weizenmehl wäre die Erhöhung der Produktfeuchte von 1,8 auf bis zu 4 - 5% Gewichtsprozent durchaus realistisch, da die Schichthöhe der Staubprobe bei max. 1mm liegt und die Feuchteaufnahme dadurch begünstigt wird.

Bei einer Luftfeuchte unterhalb von 100 % liegt das Wasser dampfförmig vor. Der Einfluß der Wasserdampfteilchen am eigentlichen Verbrennungsvorgang

dürfte wahrscheinlich vernachlässigbar sein. Das Produkt hat auch während der kurzen Zeit der Staubaufwirbelung ( $t_v = 100$  ms) kaum die Möglichkeit den Wasserdampf zu adsorbieren.

Einen nicht unwesentlichen Einfluß auf die minimale Mindestzündenergie hat die *Temperatur*, wie man aus den Abbildungen 4.20 und 4.21 ersehen kann. Die in dieser Arbeit erhaltenen Messwerte bestätigen den von Glarner gefundenen Zusammenhang, der besagt, daß mit steigender Temperatur die minimale Mindestzündenergie abfällt. Eine Temperaturerhöhung hat bei schwerer entzündlichen Stäuben (z.B. Melamin) einen stärkeren Einfluß auf die Verminderung der minimalen Mindestzündenergie als auf die ohnehin schon leicht entzündlichen Stäube (z.B. Lycopodium). Aus der Abbildung 4.20 läßt sich ablesen, daß die untersuchten Stäube bei Temperaturen  $T > 250$  °C als besonders leicht entzündlich ( $E_{M,min} < 10$  mJ) anzusehen sind. Eine deutliche Abnahme der minimalen Mindestzündenergie ist in Abbildung 4.21 am Beispiel von Maltodextrin zu erkennen. Bei 5 °C erfolgt die Zündung ohne Induktivität im Entladekreis bei 700 mJ, wobei sich der Wert bei 50 °C auf 10 mJ vermindert. Werden bei der sicherheitstechnischen Beurteilung von Anlagen, in denen brennbare Stäube bei überhöhter Temperatur hergestellt, verarbeitet oder gefördert werden, im Hinblick auf z.B. elektrostatische Zündgefahren die auf die Raumtemperatur bezogene minimale Mindestzündenergie zugrunde gelegt, so kann es daher zu nicht unerheblichen Fehleinschätzungen kommen.

Glarner hatte weiterhin festgestellt, daß sich durch die Verbindung der Messpunkte in doppeltlogarithmischer Darstellung Geraden ergeben, die sich in einem Punkt schneiden. Dieser Schnittpunkt wurde mit Hilfe von Regressionsverfahren bei ( $T = 1000$  °C;  $E_{M,min} = 0,088$  mJ) bestimmt. Der lineare Zusammenhang kann allerdings durch die geringe Anzahl der in dieser Arbeit erhaltenen Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden. Erschwerend kommt noch hinzu, daß der Temperaturbereich auf 5°C bis 50 °C begrenzt ist. Die Abnahme der minimalen Mindestzündenergie bei steigender Temperatur liefert die folgende Erklärung.

Bei organischen Stäuben werden - nach heutiger Sicht - beim Verbrennungsvorgang Schwelgase ausgetrieben. Bei den Staubteilchen, die sich in unmittelbarer Nähe der Zündquelle aufhalten, werden zuerst die flüchtigen Bestandteile entweichen. Die nachfolgende Staubexplosion ist dann ein Abbrand dieser Schwelgase an der Kornoberfläche der übrigen Teilchen. Bei entsprechender Temperatur und Sauerstoffgehalt kann der Staub restlos

verbrennen. Deutlich wird dies am Beispiel einer Kerze. Bei dieser brennt nicht der feste oder flüssige Stearin, sondern der Stearindampf. Eine erhöhte Lufttemperatur wirkt sich positiv auf den Verbrennungsprozeß aus. Um eine selbstständige Flammenfortschreitung auszulösen, wird deshalb nicht mehr so viel Energie benötigt als bei verminderter Temperatur.

Für die Berechnung der unteren Zündgrenze (Zehr VDI Band 19 S.63) wird angenommen, daß nur dann eine vollständige Flammenfortpflanzung stattfinden kann, wenn die bei einer Reaktion freiwerdende Energie in der Lage ist, sowohl die Reaktionsprodukte als auch die überschüssige Luft und sonstige Ballaststoffe auf eine Temperatur von ca. 1000 °C zu erwärmen.

Diese Annahme fällt mit dem von Glarner ermittelten Schnittpunkt ( $T=1000^{\circ}\text{C}; E_{M,\min} = 0,088 \text{ mJ}$ ) zusammen. Bei dieser Temperatur haben alle Stäube die gleiche minimale Mindestzündenergie. Die Brenngase der gesättigten Alkane (Methan, Propan, Pentan, Heptan ..) haben größenordnungsmäßig eine ähnliche Mindestzündenergie ( $E_{M,\min} = 0,24 - 0,31 \text{ mJ}$ ). Es ist zu erwarten, daß bei diesen hohen Temperaturen wahrscheinlich die flüchtigen Bestandteile vollständig aus dem Produkt ausgetrieben werden. Diese Schwelgase haben dann eine ähnliches Zündverhalten gegenüber Kondensatorentladungen wie die entsprechenden Brenngase.[2]

Anzumerken ist hier noch, daß die Werte für die minimale Mindestzündenergie von brennbaren Stäuben bei entsprechend hohen Temperaturen ( $T > 250^{\circ}\text{C}$  bis  $1000^{\circ}\text{C}$ ) meßtechnisch noch nicht erfaßt worden sind.

Werden die von Glarner gefundenen Versuchsergebnisse zugrunde gelegt, kann die Temperaturabhängigkeit des Zündverhaltens eines Staubes einfach auch durch eine Gerade zwischen den Koordinaten ( $T = 20^{\circ}\text{C}; E_{M,\min}$ ) und ( $T = 1000^{\circ}\text{C}; E_{M,\min} = 0,088 \text{ mJ}$ ) beschrieben werden. In der Praxis ist dieses Verfahren für eine grobe Abschätzung der minimalen Mindestzündenergie bei überhöhter Temperatur als ausreichend anzusehen.

Es bleibt noch zu erwähnen, daß alle Versuche mit organischen Produkten durchgeführt worden sind. Interessant wären hier noch Untersuchungen in Verbindung mit anorganischen Stäuben (wie z.B. Aluminiumpulver). Diese unterliegen ja keinem Verschwelungsprozeß, sondern verbrennen durch eine mehr oder weniger heterogene Reaktion.

Den wichtigsten Einfluß auf die Mindestzündenergie besitzt die *Produktfeuchte*. Aus den Abbildungen 4.22, 4.23 u. 4.24 sieht man deutlich die Abhängigkeit der minimalen Mindestzündenergie von der Produktfeuchte. Die Bestimmung

der minimalen Mindestzündenergie erfolgte mit und ohne Induktivität im Entladekreis. Die zur Zündung notwendige Energie erhöhte sich mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt bei Maisstärke und Weizenmehl um bis zu 2 Energiedekaden (Faktor 100). Mit Maltodextrin konnten die Messungen nur bis zu einem Produktfeuchtegehalt von 7% durchgeführt werden. Die Erhöhung der Zündenergie ist folgendermaßen zu erklären. Anhaftendes Wasser in Form von Adsorbat oder auch chemisch gebunden als Kristallwasser vermindert den Gehalt an brennbaren Bestandteilen innerhalb des Produkts. Wird nun ein solches Gemisch entzündet, so muß zuerst das Wasser beim Verbrennungsprozeß verdampft werden, damit die brennbaren Bestandteile an der Reaktion teilnehmen können. Für die Verdampfung des Wassers bei der Zündung, ist somit eine zusätzliche Energie nötig. Mit zunehmender Produktfeuchte war auch eine Abnahme der Heftigkeit der Staubexplosion zu beobachten. Bei Produktfeuchten von über 20 % kann man kaum noch von einer selbstständigen Flammenfortschreitung sprechen. In der Flammenfront reicht die gesamte freiwerdende Wärme die bei der Verbrennung entsteht, wahrscheinlich gerade aus, um bei den benachbarten unverbrannten Staubteilchen das anhaftende Wasser zu verdampfen. Weiterhin führt ein erhöhter Wassergehalt bei Stäuben zu Agglomerationen und vermindert damit die Wirbel- und Schwebefähigkeit. Dieser Effekt stellt sich bei den Produkten Weizenmehl und Maisstärke bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 19% ein.

Bei der Bestimmung der *Zündverzögerungszeit*  $t_v$  (s.Kap 3.6) ist bei allen Produkten eine nicht unerhebliche Streuung der Messwerte festzustellen. Diese Abweichungen sind darauf zurückzuführen, daß der Probenaufbereitung zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Die Fehler lagen im wesentlichen darin, daß die Trocknung bei unterschiedlichen Schütthöhen erfolgte.

Weiterhin wurden die Staubproben für die Zündversuche nur auf flache Glasschalen geschüttet und abgewogen. Durch die folgende Wartezeit bis zum Versuch, konnten die Produkte wieder Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen.

Es ist einzusehen, daß der Probenaufbereitung, vorwiegend der Trocknung, eine besondere Beachtung geschenkt werden muß. Nur durch eine gewissenhafte Probenvorbereitung, können reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Anzumerken ist an dieser Stelle noch, daß bei den in der Literatur angegebenen Mindestzündenergiewerten kaum nähere Angaben über die Produktfeuchte bzw. Probenvorbereitung gemacht wurden. Deshalb ist ein Vergleich der Werte zwischen verschiedenen Literaturstellen nur unter Vorbehalt möglich.

## 6. *Schlußbetrachtung*

Die Mindestzündenergie ist für eine vergleichende Beurteilung der Stäube untereinander, bezüglich der Zündwirksamkeit gegenüber Kondensator-entladungen, von wichtigem Interesse. Hierbei darf man aber nicht vergessen, daß die Bestimmung der Mindestzündenergie nur unter idealisierten Bedingungen in einem genau definierten Explosionsraum durchgeführt worden ist und die Ergebnisse verfahrensabhängig sind. Bei Veröffentlichungen muß deshalb das verwendete Verfahren immer angegeben werden.

In der Praxis ist mit den unterschiedlichsten Funkenarten zu rechnen. Die Zündwirksamkeit gegenüber Staub/Luft-Gemischen hängt hierbei vom Energiebetrag, der Temperatur, und von der zeitlichen bzw. räumlichen Energieumsetzung ab. In der Laborapparatur können nur der Energiebetrag und in begrenztem Maße unter Verwendung einer Induktivität auch die Funkenentladungsdauer beeinflußt werden. Um wirksame Schutzmaßnahmen gegen das Entstehen einer Staubexplosion ergreifen zu können, ist die Kenntnis der Zündquellenart, die in der Anlage eventuell auftreten kann, von wichtigem Interesse. Zu unterscheiden ist hier zwischen trivialen Zündquellen (z.B. unbefugtes Rauchen, Schweißen usw.) und zum anderen die durch Betriebsstörungen oder die beim Produktionsprozeß entstehenden Zündquellen ( Fremdkörper oder Stiftbruch in Mühlen, Elektrostatische Aufladung etc.). Um einen Vergleich zwischen den verschiedenen mechanisch erzeugten Funken und den unterschiedlichen elektrostatischen Entladungsformen zu erhalten, ordnet man ihnen eine elektrische Äquivalentenergie zu. Dies entspricht einer zeitlich gedehnten Kondensatorentladung von gleicher Zündwirksamkeit. Für die Bestimmung der Äquivalentenergie geht man wie folgt vor. In einem Staub/Luft-Gemisch werden definierte praxisnahe Funken erzeugt und die Staubkonzentration dann soweit verändert, bis eine Zündung des Gemisches erfolgt. Die gleiche Staubkonzentration wird nun der Kondensatorentladungsapparatur ausgesetzt und die entsprechende Mindestzündenergie bestimmt. Dieser Betrag wird dann als Äquivalentenergie  $E_A$  der praktischen Zündquelle zugeordnet. Mechanische Funken können als Schleiffunken ( z.B. Schleifflex ) und als Reib- oder Schlagfunken ( bei z.B. bei schnell laufenden Mühlen, Brechern oder Elevatoren ) entstehen.

Funkenentladungen finden z.B zwischen einem isolierten, aufgeladenen Metallteil und einem geerdeten Metallteil statt. Die Aufladung kann zum Beispiel durch aufgeladenes Gut, oder durch Reibungsvorgänge bei Produktförderung in Rohrleitungen, entstehen.

---

Je nach Entladungsform ist eine Zündung eines Staub/Luft-Gemisches möglich. Die Zündwirksamkeit hängt hierbei stark von der zeitlichen und räumlichen Energieumsetzung ab.

Die wirksamste Schutzmaßnahme bietet hier die Erdung sämtlicher leitfähiger Gegenstände, die sich gefährlich aufladen können.

Bei den vorkommenden unterschiedlichen Zündquellenarten muß deshalb die sicherheitstechnische Auslegung von Anlagen nur nach fachkundigem Ermessen erfolgen. [1]

## 7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit der Klimaparameter. Zu diesem Zweck mußte eine entsprechende Versuchsanlage aufgebaut werden, wobei die Steuerung und Regelung elektropneumatisch erfolgt. Als Explosionsgefäß dient ein vertikal angeordnetes Glasrohr mit  $V = 1,2$  Liter Inhalt, die sogenannte "modifizierte Hartmannapparatur". Die Zündung des Staub/Luft-Gemisches wird durch einen Hochspannungsfunken ausgelöst, der bei der Entladung von zuvor aufgeladenen Kondensatoren ( $U_{\max} = 8$  KV) entsteht. Durch Veränderung der Energie ( $E = 0,001$  bis  $10$  J) und der Staubkonzentration kann die minimale Mindestzündenergie für jeden Staub gefunden werden. Diese Werte sind für die Beurteilung der Stäube untereinander von großem Interesse.

Um die Mindestzündenergie ermitteln zu können, mußte durch Vorversuche die optimale Zündverzögerungszeit  $t_v$  (= Zeit zwischen der Staubaufwirbelung und der Zündung) experimentell bestimmt werden. Diese wurde für alle untersuchten Stäube bei  $t_v = 100$  ms gefunden.

Einen wichtigen Einfluß auf die Mindestzündenergie hat die Zuschaltung einer Induktivität in den Entladekreis. Diese bewirkt eine zeitlich gedehnte Funkenentladung und führt bei den untersuchten Stäuben zu einer Verringerung der Mindestzündenergie um 1 bis 2 Energiedekaden (Faktor 10 bis 100).

Die Hauptuntersuchungen wurden in einer Klimakammer durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, daß der Einfluß der Luftfeuchte ( $\varphi = 0,48$  bis  $0,95$ ) auf die Mindestzündenergie vernachlässigbar ist. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von  $5$  °C,  $20$  °C und  $50$  °C durchgeführt. Mit steigender Temperatur war eine Abnahme der Mindestzündenergie zu beobachten. Für die Vorausbestimmung der Mindestzündenergie bei noch höheren Temperaturen wird auf die von Glarner durchgeführten Versuche hingewiesen. Die Produktfeuchte besitzt den stärksten Einfluß auf die Mindestzündenergie. Hierbei kann mit Zunahme der Werte um bis zu 2 Energiedekaden (Faktor 100) gerechnet werden. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ist auf eine gewissenhafte Probenvorbereitung zu achten, da durch unterschiedliche Trocknungsverfahren und Einflüsse der Luftfeuchte die Produktfeuchte starken Schwankungen unterliegt. Hierdurch können keine reproduzierbaren Meßergebnisse erhalten werden.

Bei Kenntnis der Produktfeuchte und der atmosphärischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) von Anlagen, in denen Stäube hergestellt, verarbeitet oder gefördert werden, kann die Mindestzündenergie mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden.

## 8. Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
c	kg/m <sup>3</sup>	Staubkonzentration
C	F	Kapazität
E <sub>min</sub>	J	Mindestzündenergie
E <sub>M,min</sub>	J	Minimale Mindestzündenergie
Ex <sub>o</sub>	kg/m <sup>3</sup>	obere Explosionsgrenze
Ex <sub>u</sub>	kg/m <sup>3</sup>	untere Explosionsgrenze
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
I	A	Strom
K <sub>st</sub>	bar·m·s <sup>-1</sup>	KenngroÙe
L	H	Induktivität
m	kg	Masse
P <sub>max</sub>	bar	maximaler Explosionsdruck
P <sub>D</sub>	bar	Dampfdruck
P <sub>s</sub>	bar	Sattdampfdruck
T	°C	Temperatur
t <sub>v</sub>	s	Zündverzögerungszeit
U	V	Spannung
V	m <sup>3</sup>	Volumen
w	m/s	Sinkgeschwindigkeit
X	Gew. %	Produktfeuchte [kg Wasser /kg Trockenmasse]
x	g/kg	Feuchtegehalt [ g Wasser/kg trockene Luft ]
x <sub>St</sub>	m	Stoke-Durchmesser
x <sub>pm</sub>	m	mittlerer Partikeldurchmesser
φ	%	relative Luftfeuchte
ψ	1	Formfaktor (Sphärizität )
η	kg/m·s <sup>-1</sup>	dynamische Viskosität
ρ <sub>P</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Partikeldichte
ρ <sub>F</sub>	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft

---

**9. Literaturverzeichnis**

- [ 1 ]     Bartknecht Wolfgang  
          Staubexplosionen  
          Ablauf und Schutzmaßnahmen  
          Springer Verlag Berlin Heidelberg 1987
  
- [ 2 ]     Glarner Thomas  
          Temperatureinfluß auf das Explosions- und Zündverhalten  
          Brennbarer Stäube  
          Dissertation TH Zürich 1980
  
- [ 3 ]     Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben  
          Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit  
          Erich Schmidt Verlag 1987
  
- [ 4 ]     Scheuermann Klaus  
          Untersuchung des Explosionsverhalten von Maisstärke im  
          geschlossenen 1 m<sup>3</sup> - Behälter  
          Zwischenbericht Nr. 1 1988
  
- [ 5 ]     Berthold Werner  
          Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft- Gemischen  
          Fortschrittsberichte VDI  
          Reihe 3: Verfahrenstechnik  
          VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1987
  
- [ 6 ]     VDI - Richtlinien  
          Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen  
          Kenngrößen von Stäuben  
          VDI 2263 ( Entwurf )  
          VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1988
  
- [ 7 ]     Brzostek E. und Krämer H.  
          Entzündung explosionsfähiger Gemische durch elektrische Funken  
          Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig 1990  
          Verlag f. neue Wissenschaften GmbH, Bremerhafen

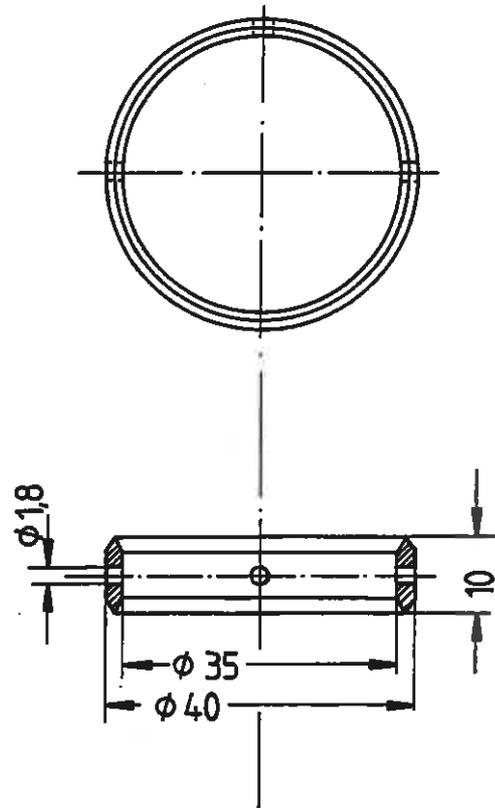
- 
- [ 8 ] Radandt S.  
Symposium, Heft 1  
Fachheftreihe der BNG  
November 1983  
Statistische Erfassung von Unglücksfällen
- [ 9 ] Stiegler Leonhard  
Natur und Technik  
Physik  
Cornelsen-Velhagen & Klasing Verlagsgesellschaft, Bielefeld 1980
- [ 10 ] Neumüller Dr.Otto-Albrecht  
Römpps Chemie-Lexikon  
Frankh'sche Verlagshandlung Stuttgart, 7. Auflage 1973
- [ 11 ] Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie  
Urban & Schwarzenberg Verlag München-Berlin, 3.Aufage 1965
- [ 12 ] Baltes Werner  
Lebensmittel Chemie  
Springer Verlag Berlin-Heidelberg 1983
- [ 13 ] Bosnjakovic  
Technische Thermodynamik  
Verlag Theodor Steinkopf, Dresden 1971
- [ 14 ] Doering Ernst  
Technische Wärmelehre  
B.G. Teubner, Stuttgart 1968
- [ 15 ] Doering / Schedwill  
Grundlagen der technischen Thermodynamik  
B.G. Teubner Stuttgart 1987
- [ 16 ] Baer Hans Dieter  
Thermodynamik  
Springer Verlag Berlin Heidelberg 1966

- 
- [ 17 ] Heinrich H.-J.  
Ablauf von Gas- und Staubexplosionen  
Gemeinsamkeiten und Unterschiede  
VDI -Berichte 701, Bd. 1  
VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
- [18] Christill/Nastoll/Leuckel/Zarzalis  
Einfluß der Strömungsturbulenz auf den Explosionsablauf in Staub/  
Luft-Gemischen  
VDI -Berichte 701, Bd. 1  
VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
- [19] Zehr J.  
Physikalische Kennzeichnung der Staubeigenschaften  
VDI-Berichte Bd.19  
VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1957
- [20] Selle H.  
Die chemischen und physikalischen Grundlagen der  
Verbrennungsvorgänge von Stäuben  
VDI-Berichte Bd.19  
VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1957
- [21] Meyers Lexikon der Technik und Naturwissenschaften  
Bibliographisches Institut Mannheim/ Wien / Zürich 1970
- [22] Grassmann Peter  
Einführung in die thermische Verfahrenstechnik  
Verlagsbuchhandlung Georg Reimer 1967
- [23] Fritz W.  
Skript-Unterlage aus dem Fach mechanische Verfahrenstechnik SS90
- [24] Lueger  
Lexikon der Verfahrenstechnik  
Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart 1970
- [25] Radandt S.  
Abläufe und Auswirkungen von Auswirkungen von  
Staubexplosionen in der Praxis  
VDI -Berichte 701, Bd. 1  
VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf 1989

## Bauelemente:

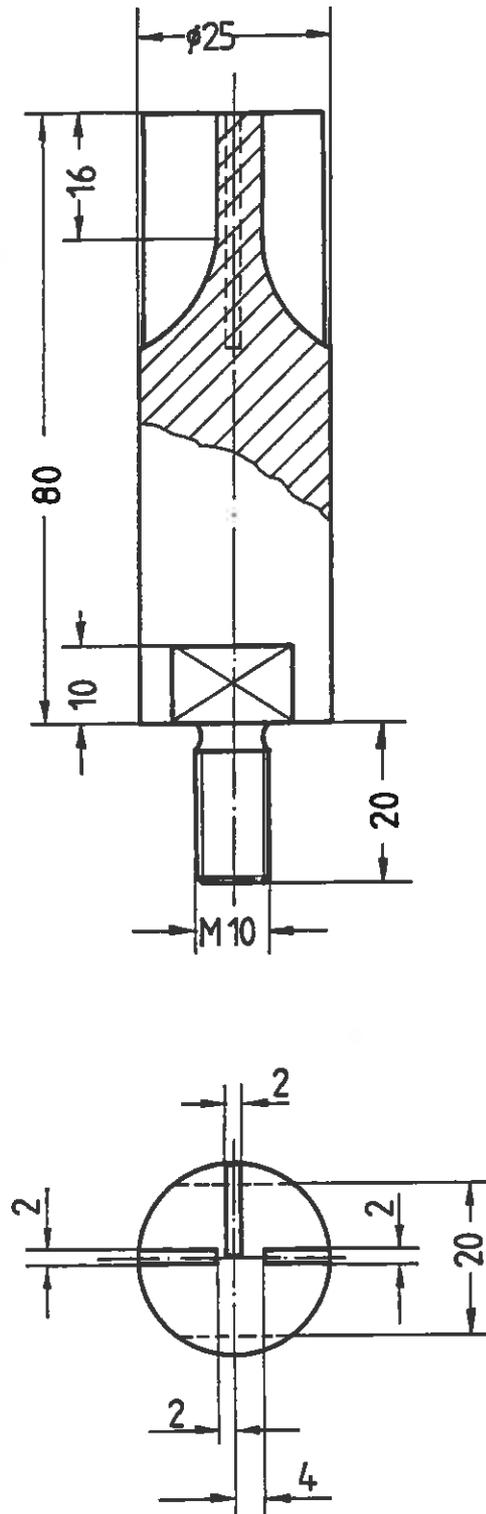
Nr.	Steuerelemente / Antriebsglieder
0.1	Wartungseinheit
0.2	3/2 Wegeventil ; direkt betätigt
1.1 1.2	3/2 Magnetventil mit Handhilfsbetätigung 24 V Gleichstrom
1.3	5/2 Pneumatik Impulsventil mit Handhilfsbetätigung
1.4	Schnellentlüftungsventil
1.0	Doppelt wirkender Zylinder Kolben Ø 50 mm; Hublänge 125 mm => V = 245 cm <sup>3</sup>
2.0	Doppelt wirkender Zylinder Kolben Ø 63 mm; Hublänge 125 mm => V = 389 cm <sup>3</sup>
2.1 2.2 2.4	Absperrventile ( Kugelhahn )
2.3	Rückschlagventil

## 10.1: Bauelemente für die pneumatische Steuerung



10.2: Führungsring aus Kunststoff

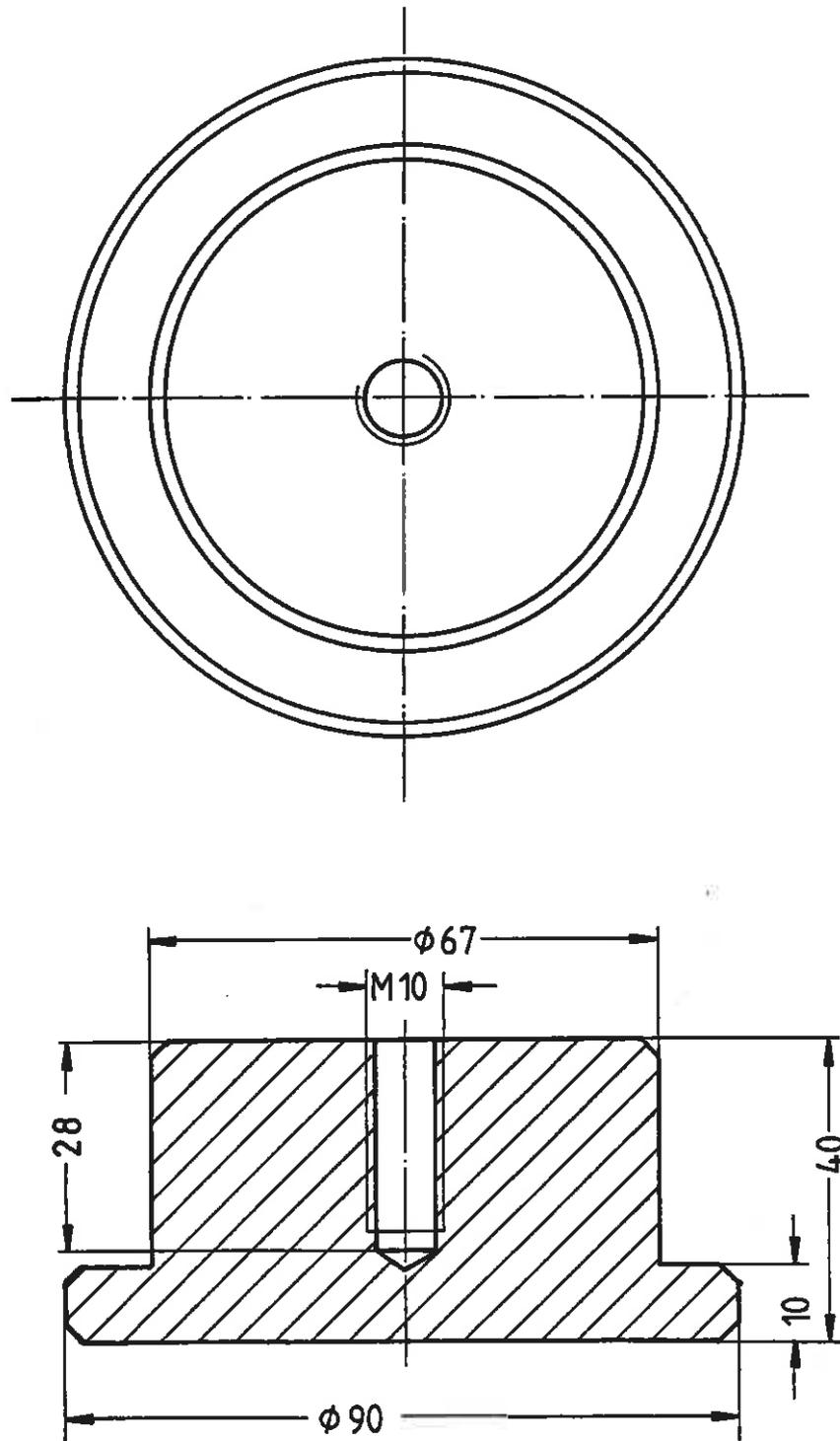
Maßstab: 1:1



103: Lehre zum Einstellen des Elektrodenabstandes

Werkstoff: Aluminium

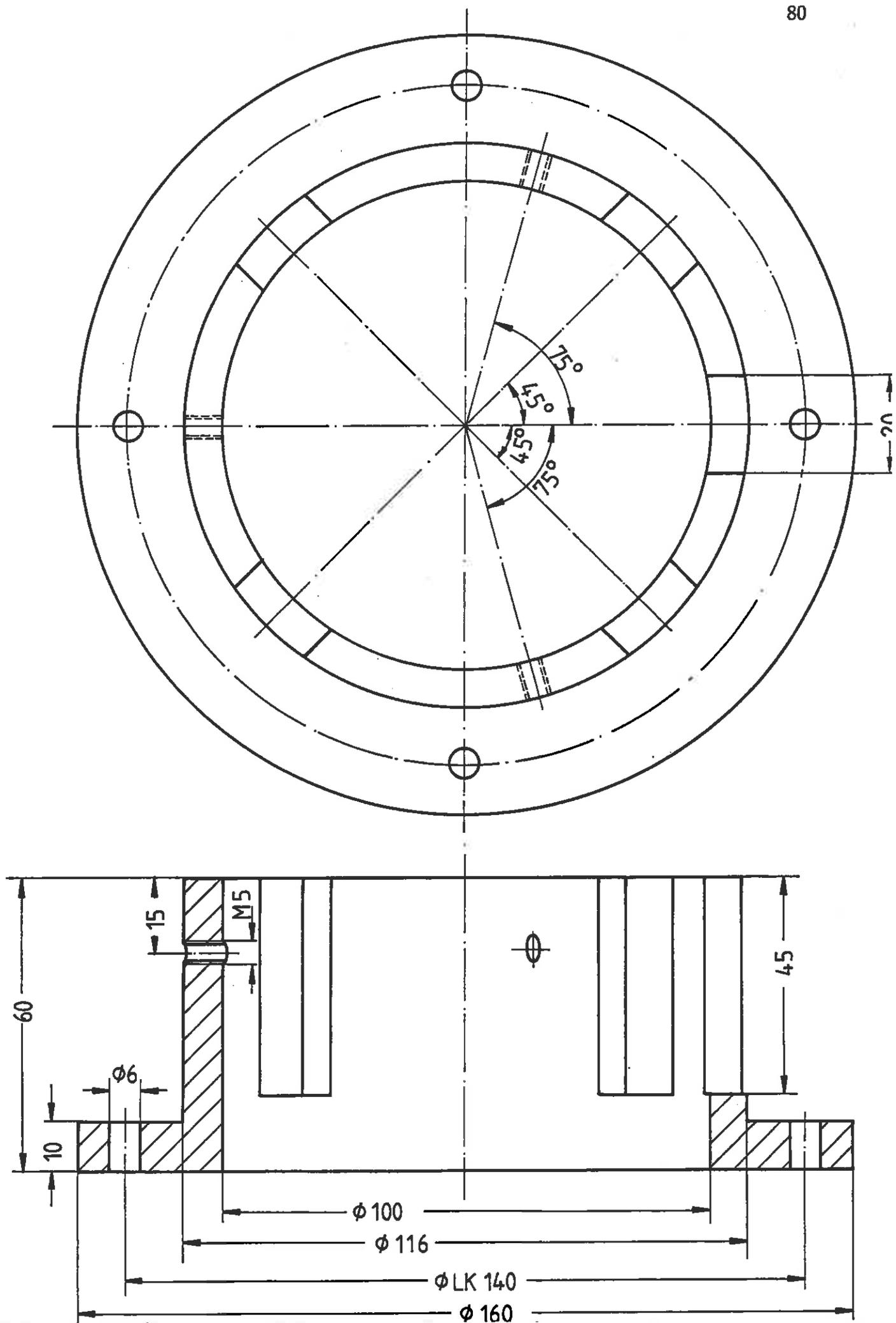
Maßstab: 1:1



#### 10.4: Halterung für Lehre

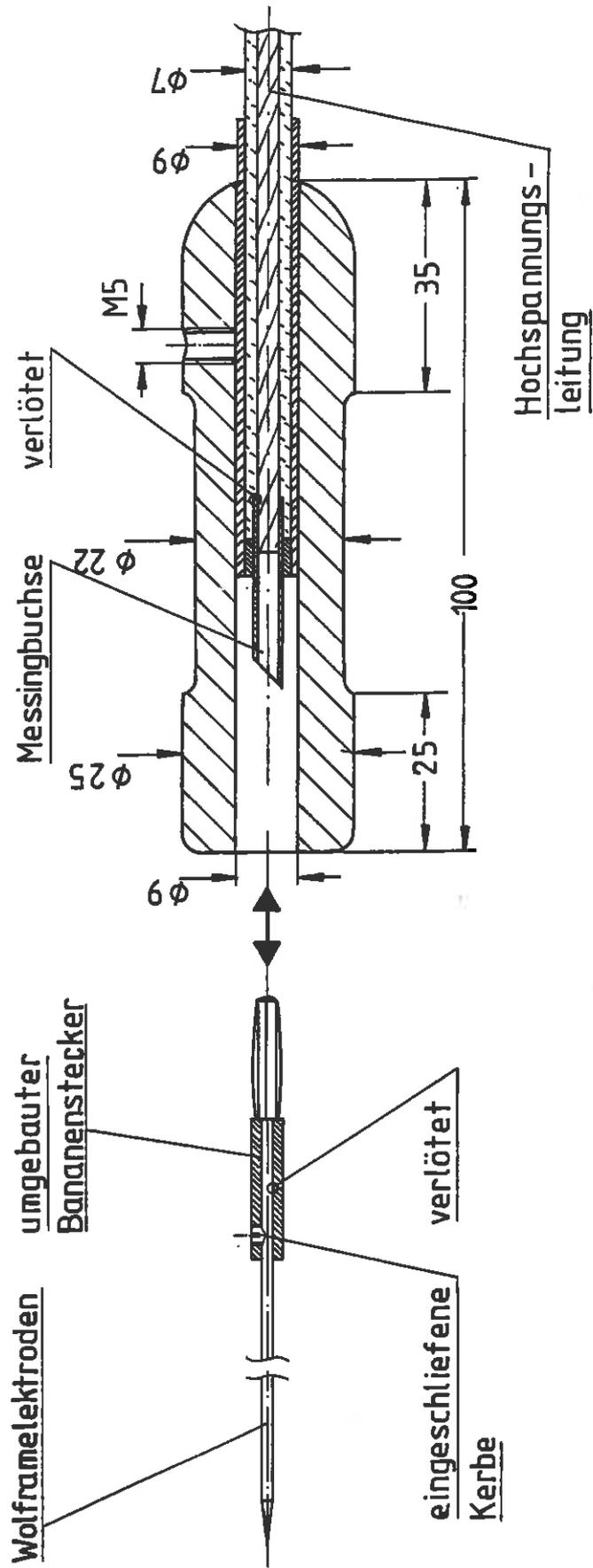
Werkstoff: Kunststoff

Maßstab: 1:1



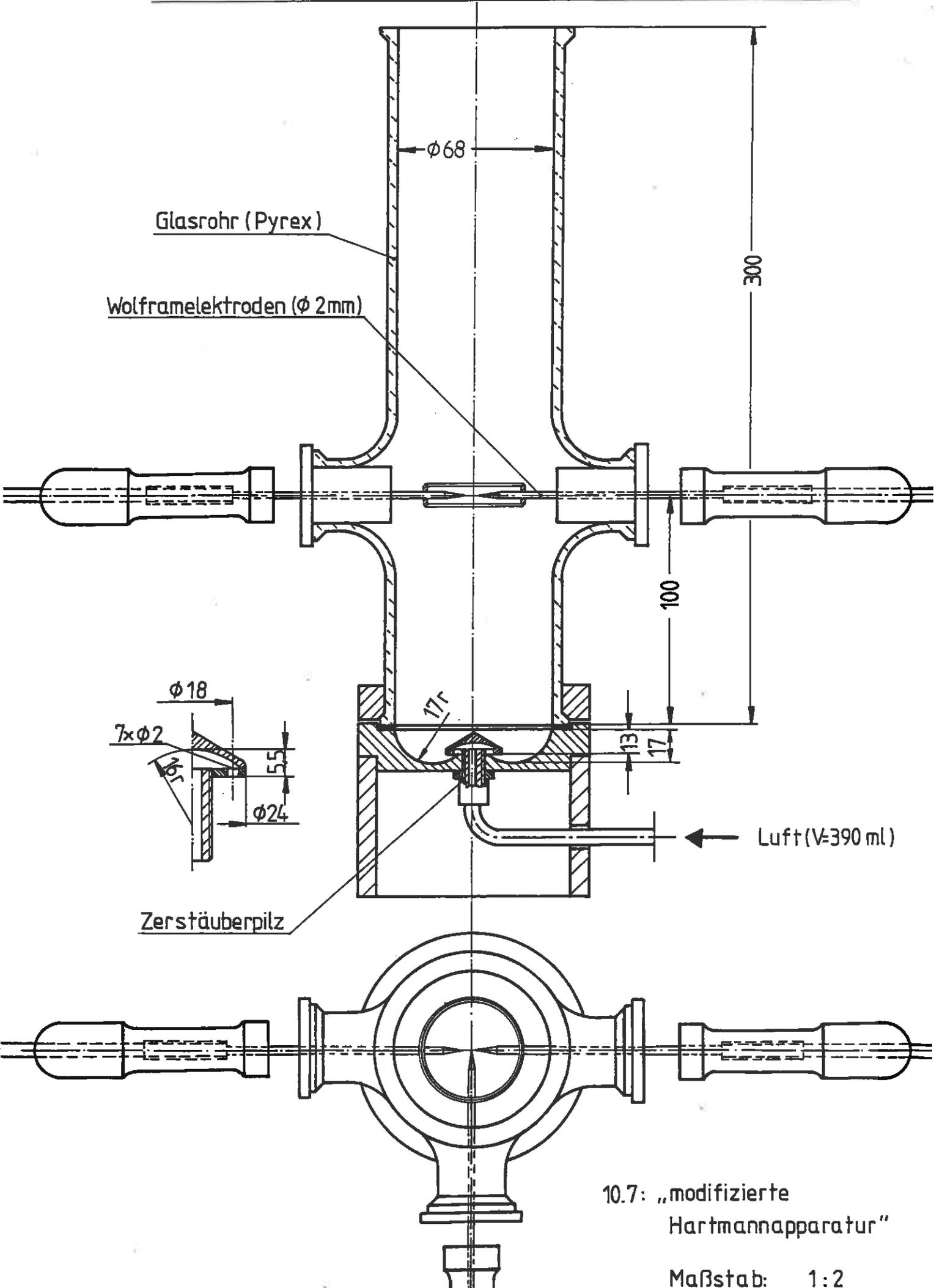
10.5: Halterung für Hartmannapparatur aus Kunststoff

Maßstab: 1:1



10.6: Steckverbindung zwischen Elektrode und Hochspannungsleitung

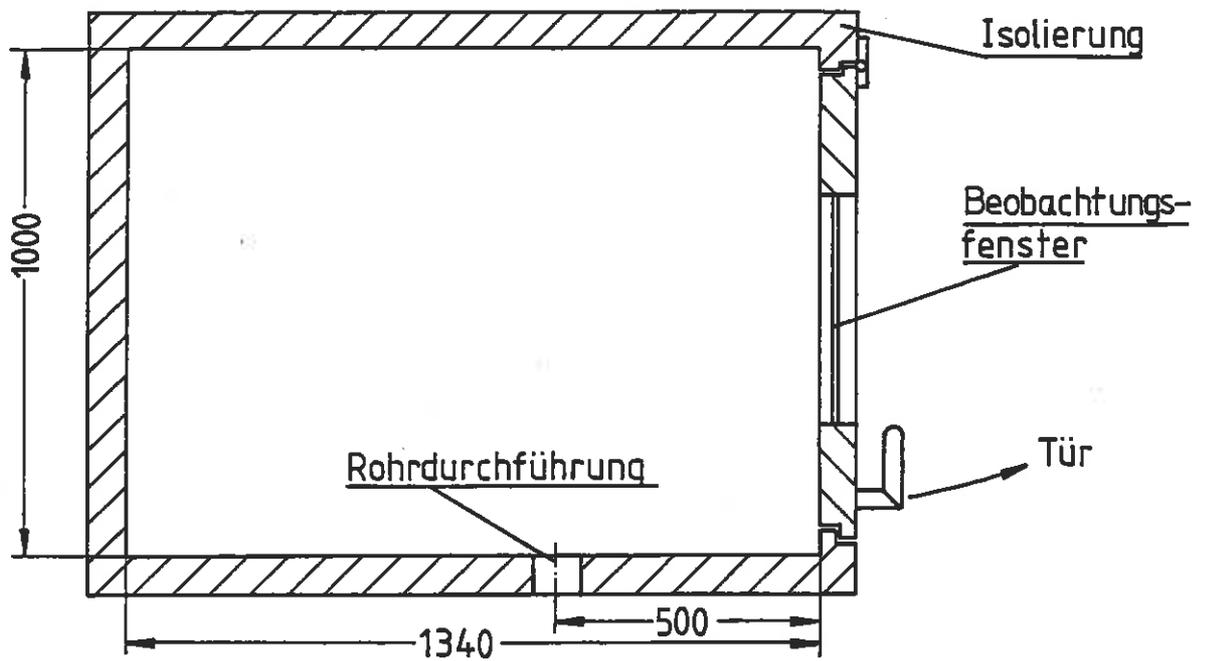
Maßstab: 1:1



**Klimaschrank**

( Prüfraum )

**DRAUFSICHT ( Schnitt A-A )**



**SEITENANSICHT**

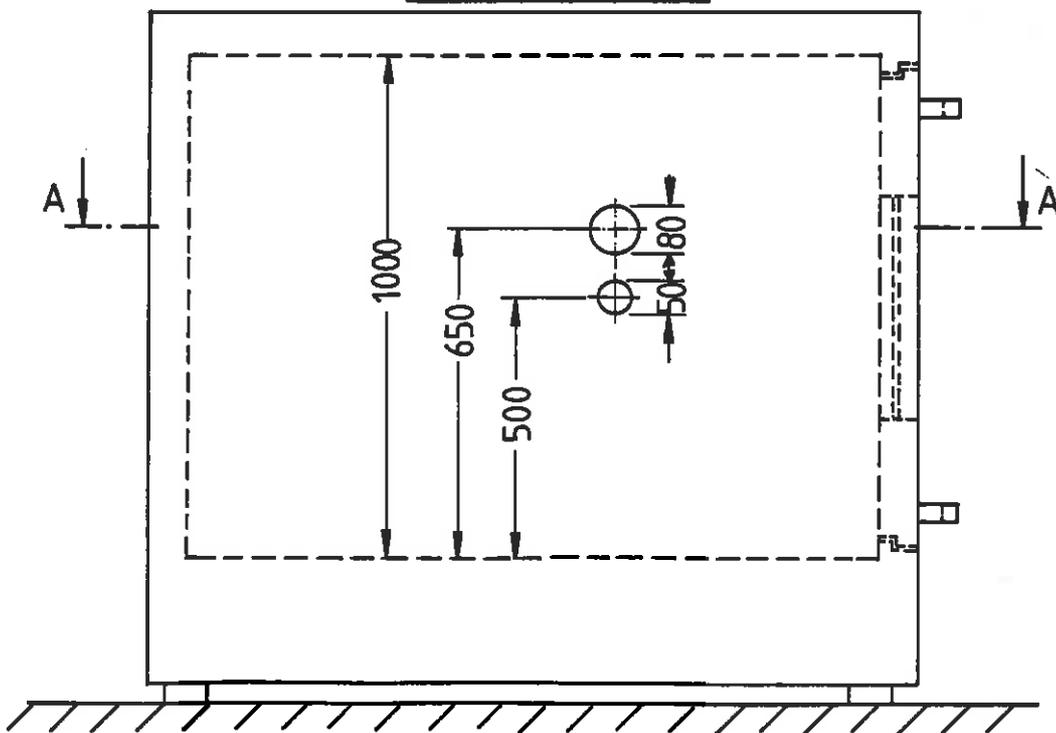


Abb.10.8: Klimaschrank

Tabelle 10.9: Ermittlung von Energie - Zwischenwerte an der Kondensator-entladungsapparatur

	Energie E	Spannung U [ KV ]
10	10	8,00
	9	7,59
	8	7,16
	7	6,69
	6	6,20
	5	5,66
	4	5,06
	3	4,38
	2	3,58
1	1	8,00
	0,9	7,59
	0,8	7,16
	0,7	6,69
	0,6	6,20
0,5	0,5	8,00
	0,4	7,16
	0,3	6,20
	0,2	5,06
0,1	0,1	8,00
	0,09	7,59
	0,08	7,16
	0,07	6,69
	0,06	6,20
0,05	0,05	8,00
	0,04	7,16
	0,03	6,20
	0,02	5,06
0,01	0,01	8,00
	0,009	7,59
	0,008	7,16
	0,007	6,69
	0,006	6,20
0,005	0,005	8,00
	0,004	7,16
	0,003	6,20
	0,002	5,06
	0,001	3,58

Tabelle 10.10: Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit und der Teilchengröße

Kugelförmige Teilchen ( $\psi = 0,8$ )		
$x_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\rho_p = 1000$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_p = 2000$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
	w [cm/s]	w [cm/s]
5	0,054	0,11
10	0,22	0,43
30	1,95	3,90
63	8,60	17,2
100	22,0	43,3
200	86,0	173
500	541	1083

Faserige Teilchen ( $\psi = 0,3$ )		
$x_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\rho_p = 1000$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_p = 2000$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
	w [cm/s]	w [cm/s]
5	0,012	0,025
10	0,05	0,10
30	0,45	0,90
63	1,97	3,94
100	4,98	9,96
200	19,9	39,8
500	124	248

Tabelle 10.11: Einfluß der Zündverzögerungszeit  $t_v$  auf die Mindestzündenergie  $E_{min}$  brennbarer Stäube

Produkt:	Zündverzögerungszeit $t_v$ in [ms]	Staubkonzentration $c$ in [g/m <sup>3</sup> ]	Mindestzündenergie $E_{min}$ in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Maisstärke	30	50	--	
		80	50	
		100	40	1000
		200	30	
		350		900
		500	20	1000
		1000	30	
	50	100	50	
		200		500
		500	20	400
		1000	60	1000
	60	100	100	
		200	25	1000
		500	20	450
		750	30	500
		1000	45	1000
	70	100	500	3000
		200	30	
		500	20	600
		750		500
		1000	20	800
	100	150	500	
		200	40	9000
		500	20	600
750			600	
1000		20	900	
140	200		10000	
	250	300		
	300	40		
	500	20	5000	
	750	20		
	1000	20	5000	

Tabelle 10.12: Einfluß der Zündverzögerungszeit  $t_v$  auf die Mindestzündenergie  $E_{min}$  brennbarer Stäube

Produkt:	Zündverzögerungszeit $t_v$ in [ms]	Staubkonzentration $c$ in [g/m <sup>3</sup> ]	Mindestzündenergie $E_{min}$ in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Lycopodium	30	100	15	200
		200	15	200
		500	40	500
		750		600
	60	100	30	400
		200	10	150
		350	15	200
		500	15	200
		750	50	300
		1000	2000	
	100	100	60	300
		200	25	200
		350	15	150
		500	6	150
		750	10	150
		1000	20	200
140	100	200	500	
	200	10		
	500	8	250	
	1000	8	200	
Maltodextrin	100	200	20	
		500	6	1500
		750	5	500
		1000	2	200
		1200	5	250

Tabelle 10.13: Einfluß der Zündverzögerungszeit  $t_v$  auf die Mindestzündenergie  $E_{\min}$  brennbarer Stäube

Produkt:	Zündverzögerungszeit $t_v$ in [ms]	Staubkonzentration $c$ in [g/m <sup>3</sup> ]	Mindestzündenergie $E_{\min}$ in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Weizenmehl	30	50	900	
		100	100	
		200	200	
		350	400	
	60	200	90	
		350	90	
		500	200	
		750	700	
	100	200	70	
		500	20	
		1000	40	
	140	200	90	
500		50		
1000		90		

Tabelle 10.14: Einfluß der Schütthöhe auf die Trocknung

	Produktfeuchte X [Gew %] ( Anfangsfeuchte [Gew %] )		
	Maisstärke	Weizenmehl	Maltodextrin
--	( 11,79 )	( 8,76 )	( 3,67 )
80	10,77	8,30	2,80
40	8,89	7,19	1,78
15	3,38	2,80	0,57
10	1,77	1,73	0,21

Tabelle 10.15: Einfluß der Luftfeuchte auf die Zunahme der Produktfeuchte

Produkt	Luftfeuchte $\varphi$ [%]	Zeit t [h]	Produktfeuchte X [Gew %]	
Maisstärke	95	0	1,77	
		0,5	15,44	
		1	17,38	
		2	18,79	
		3	19,52	
		4	19,19	
	70	0	1,77	
		0,5	11,88	
		1	13,23	
		2	13,18	
		3	13,00	
		4	10,50	
48	0	1,77		
	0,5	9,63		
	1,5	10,12		
	2	10,23		
	3	10,20		
	4	10,50		
Weizenmehl	95	0	1,73	
		0,5	14,05	
		1	16,51	
		2	18,47	
		3	19,39	
		4	19,39	
	48	0	1,73	
		0,5	8,47	
		1	9,06	
Maltodextrin	95	0	0,21	
		0,5	4,58	
		1	7,52	
		Verflüssigung		

Tabelle 10.16: Einfluß der Luftfeuchte  $\varphi$  auf die Mindestzündenergie  $E_{\min}$ 

Produkt:	Luftfeuchte: $\varphi$ in [%]	Staubkonzentration $c$ in [g/m <sup>3</sup> ]	Mindestzündenergie $E_{\min}$ in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Maisstärke	48	350	6	500
		500	5	200
		750	5	200
		1000	7	400
	95	350	7	600
		500	5	250
		750	6	300
		1000	7	500
Weizenmehl	48	350	40	2000
		500	20	1000
		750	20	1000
		1000	40	2000
	95	350	40	3000
		500	25	1000
		750	20	1500
		1000	50	3000

Tabelle 10.17 : Einfluß der Temperatur T auf die minimale Mindestzündenergie

Produkt:	Versuchstemperatur T in [°C]	Zündfreudigste Staubkonzentration c in [g/m <sup>3</sup> ]	minimale Mindestzündenergie E <sub>M,min</sub> in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Maltodextrin	5	1000	4	700
	20	1000	1	90
	50	1000	-	10
Maisstärke	5	500-750	8	300
	20	500-750	5	200
	50	500-750	3	25
Weizenmehl	5	500-750	30	2000
	20	500-750	20	1000
	50	500-750	15	700

Tabelle 10.18: Einfluß der Produktfeuchte  $\varphi$  auf die min. Mindestzündenergie

Produkt:	Produktfeuchte X in [Gew%]	Zündfreudigste Staubkonzentration c in [g/m <sup>3</sup> ]	minimale Mindestzündenergie E <sub>M,min</sub> in [mJ]	
			mit Induktivität	ohne Induktivität
Maisstärke	1,8	500	5	200
	7	500	20	600
	11,8	500	150	10000
	13	500	200	--
	19	500	2000	--
Weizenmehl	1,7	500	20	1000
	5,5	500	40	2000
	9,2	500	60	--
	19	500	600	--
Maltodextrin	0,25	1000	1	90
	2	1000	2	200
	3,7	1000	10	200
	7	1000	30	700