

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



Explosionsschutz an Silofahrzeugen

F05-9201

Abschlußbericht März 1996

DC Gerhard Beck,

Techniker Sigurd Kleinhans



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung, Aufgabenstellung
2. Lösungsweg
3. Produktbeschreibung
4. Anlagenbeschreibung
 - 4.1 Wirkungsweise der Gesamtanlage
 - 4.1.1 Mechanischer Gesamtaufbau
 - 4.1.2 Elektronische Regelung
5. Beschreibung des Untersuchungsablaufes
 - 5.1 Warmlagerversuche
 - 5.2 Reaktoruntersuchungen
 - 5.2.1 Einbringen der Probe
 - 5.2.2 Justieren der Fühler
 - 5.3 Untersuchungsdurchführung
 - 5.4 Interpretation der Pegelschriebe
6. Durchgeführte Versuchsreihen und deren Ergebnisse
7. Interpretation der Ergebnisse
8. Umfassender Explosionsschutz an Silofahrzeugen
9. Zusammenfassung und Ausblick
10. Literaturzusammenstellung

Anlagen

- A1 Kernwerte der Produkte
- A2 Pegelschrieb
- A3 Ergebnisse der Standarduntersuchungen aller Produkte
 - A3.1 Warmlagerversuche, Volumenabhängigkeit
- A4 Ergebnisse der Reaktorversuche aller Produkte
- A5 Reaktorversuche 100 l/min , 0 - 1 Bar
- A6 Reaktorversuche 50 - 150 l/min, 1 Bar
- A7 Reaktorversuche Pneumatikgewebe E350 und E800
- A8 Reaktorversuche - Überströmen



-
- A9 Reaktorkontrollversuche 100l/min 0,0 bar
 - A10 Reaktorkontrollversuche 100l/min 0,5 bar
 - A11 Reaktorkontrollversuche 1 bar , 50l/min
 - A12 Reaktorkontrollversuche - Überströmen
 - A13 Pegelschrieb mit Liste der Abkürzungen



1. Einleitung, Aufgabenstellung

Es ist bekannt, daß Silofahrzeuge für den Transport von Futtermitteln und Futtermittel-Komponenten durch Explosionen zerstört werden können und daß diese Explosionen auch Todesopfer gefordert und beträchtliche Umgebungsschäden ausgelöst haben [1], [7] - [9]. In den Silozellen dieser Fahrzeuge sind die Bedingungen für eine Explosionsentstehung beim bestimmungsgemäßen Normalbetrieb oder bei dessen Störungen wie folgt gegeben:

- ◆ Die gefährliche explosionsfähige Atmosphäre im Sinne der EX-RL [2]
 - bezüglich Staubexplosionen besteht wenigstens während des Füllens, möglicherweise aber auch während des Entleerens;
 - bezüglich Gas- oder Hybridexplosionen¹ kann durch einen Schweißbrand entstehen, bei dem sich infolge Sauerstoffmangels brennbare Schweißgase bilden.
- ◆ Staubablagerungen, die zu gefährlichen explosionsfähigen Atmosphären aufgewirbelt werden, können als durchgängig vorhanden angesehen werden, soweit die Silobehälter innen nicht frisch innen gereinigt sind.

Demzufolge können derartige Explosionen entstehen, wenn in einer Silozelle eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre existiert und wenn in dieser eine ausreichend starke Zündquelle auftritt.

Die Zerstörung des explosionsbelasteten Silobehälters ist zwangsläufig, da bei dem maximal möglichem Betriebsüberdruck von 2 bar (A) der maximale Explosionsdruck ≤ 20 bar (A) und der Berstdruck der Silobehälter ca. 5 bar (A) beträgt.

Es muß also davon ausgegangen werden, daß

- die gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auch bei bestimmungsgemäßigem Betrieb unter den gegenwärtigen technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten unvermeidbar ist,
- der Berstdruck kleiner als der maximal möglicher Explosionsdruck ist.

Demzufolge sind Zündquellen hier die entscheidende Ursache für Explosionen in Silofahrzeugen und für daraus resultierende Schäden.

Der Schutz vor Explosionen und Explosionsschäden in Silofahrzeugen muß demzufolge - wenigstens schwerpunktmäßig - in der sicheren Vermeidung der hier relevanten Zündquellen bestehen.

Erfahrungsgemäß sind bei dem bestimmungsgemäßigen Betrieb oder bei dessen Störungen folgende Zündmechanismen als technisch möglich anzusehen:

1. Unmittelbare Zündung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre in einer Silozelle.

Bei der Befüllung wird ein Glutbrandnest in eine Silozelle eingetragen und wird zusammen mit brennbarem staubförmigen Fördergut aufgewirbelt, wodurch eine Staubexplosion ausgelöst wird.



2. Mittelbare Zündung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre zu einer Staubexplosion über einen Glutbrand in einer Silozelle oder einen Vorkammerbrand.

Das Fördergut gerät durch eine der primären Zündquellen, die auf Seite 5 aufgeführt sind, in Glutbrand. Beim Leerfahren des Silos erhält der Brand durch die Druckluft ein erhöhtes Sauerstoffangebot und wird dadurch weiter entfacht. Durch die Auflockerungsluft oder beim Zusammenrutschen des Förderguthaufwerkes gelangt der Glutballen an die Oberfläche und wird zusammen mit brennbarem staubförmigen Fördergut aufgewirbelt, wodurch eine Staubexplosion ausgelöst wird.

3. Mittelbare Zündung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre zu einer Gas- oder Hybridexplosion¹ über einen Glutbrand in einer Silozelle,

Das Fördergut gerät durch eine primäre Zündquelle in Glutbrand. Durch diesen Glutbrand wird infolge Sauerstoffmangels brennbares Schwelgas gebildet. Beim Leerfahren wird durch die Druckluftzugabe ein zündfähiges Schwelgas/Luft-Gemisch oder ein zündfähiges Schwelgas/Fördergutstaub-Luft-Gemisch (ein sogenanntes Hybridgemisch) gebildet, das durch einen Glutballen, der beim Leerfahren an die Oberfläche tritt, zu einer Gas- oder Hybridexplosion gezündet wird.

Die Entstehung eines Glutbrandes in dem Fördergut ist dabei als die wesentlichste und als gegenwärtig noch nicht ausreichend beherrschte Explosionsursache anzusehen.

Für die Entstehung eines derartigen Glutbrandes kommen folgende primäre Zündquellen in Betracht:

1. Ein Vorkammerbrand, der dadurch entsteht, daß das Fördergut in der Vorkammer an dem Pneumatikgewebe anbäckt oder durch defektes Filtergewebe in den Druckluftverteilungsraum unterhalb des Pneumatikgewebes fällt. In beiden Positionen verbleibt das Fördergut unbemerkt längere Zeit, längstens bis zur nächsten Generalreinigung des Silofahrzeuges. Dabei wird es bei jeder Entladung mit ungekühlter Druckluft aus dem Bordkompressor durch- bzw. umströmt. Diese Druckluft kann infolge adiabatischer Kompression bis auf 200 °C erwärmt sein. Dadurch gerät das abgelagerte Fördergut nach hinreichend langer Expositionsdauer in Brand.
2. Die Entstehung eines Vorkammerbrandes kann durch unkorrekte, aber in der Praxis durchaus beobachtete alternierende Füllung der Silofahrzeuge mit Futtermitteln einerseits und nitrathaltigem Düngemittel oder anderen, oxidierend wirkenden Agrochemikalien andererseits begünstigt werden. Es ist z.B. bekannt, daß Mischungen aus oxydierenden Stoffen (wie Nitraten, Chloraten, Peroxiden) und brennbaren Stäuben sehr leicht entzündliche bis explosionsgefährliche Mischungen ergeben. Für derartige Fälle kann auch die Außenerwärmung (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung) zur Auslösung der Selbstentzündung ausreichen.

¹ hier = Brenngas / Brennstaub / Luft - Explosion



3. Durch biochemische Vorgänge erwärmt sich das Produkt während der Lagerung im Silofahrzeug bis zur selbständig ablaufenden Oxidation und dadurch weiter bis zur Selbstentzündung.
4. Harte und/oder sperrige Fremdkörper im Fördergut führen bei der Förderung zu Reib- und Schlagvorgängen, durch die heiße Oberflächen und oder Funken entstehen, die Glimmbrände oder Staubexplosionen auslösen können. Besonders zündwirksam sind Funken zwischen Aluminium und rostigem Eisen.
5. Bei fehlendem elektrischen Potentialausgleich zwischen Metallteilen oder bei hochisolierenden Innenauskleidungen von Metallteilen im Förderungsbereich können elektrostatische Entladungsfunken entstehen, die Glimmbrände oder Staubexplosionen auslösen können.
6. Sogenannte triviale Zündquellen, d.h. solche, die unmittelbar durch Fehlhandlungen entstehen, wie
 - offene Flammen,
 - Funken und heiße Flächen infolge von Schweißen, Flexen, Schleifen, Bohren
 - glimmende Tabakwarenkönnen Glimmbrände oder Staubexplosionen auslösen.

Aus diesen Betrachtungen und aus Erfahrung ergibt sich, daß die Erwärmungen des Fördergutes in dem Silofahrzeug bis zu dessen Selbstentzündung die dominierende Zündquelle ist.

Ausgehend von diesen Überlegungen hat die Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin den Auftrag gegeben,

- den Entstehungsmechanismus von Silofahrzeugbränden oder -explosionen soweit zu untersuchen, um daraus geeignete Schutzmaßnahmen zur deren Vermeidung ableiten zu können.
- Vorgaben zu technisch und wirtschaftlich praktikablem umfassendem Explosionsschutz an Silofahrzeugen, insbesondere durch zuverlässige Vermeidung der vorgenannten Zündquellen, zu liefern.

Diese Forschungsleistungen und die Vorgaben werden benötigt, um Forderungen der UVV "Verdichter" [3] bezüglich Temperaturbegrenzung der Förderluft zu begründen und um den Herstellern und Betreibern von Silofahrzeugen praktikable Vorlaufleistungen für die Herstellung und Nutzung explosions sicherer Silofahrzeuge zur Verfügung zu stellen.



2. Lösungsweg

- (1.) Auswahl der zu untersuchenden Produkte unter dem Gesichtspunkt der Verwendung in der Praxis.
- (2.) Kennzeichnung des Brand- und Explosionsverhaltens dieser Produkte durch Bestimmung der einschlägigen standardisierten Kenngrößen.
- (3.) Die Entscheidung darüber, daß die Untersuchungen im Rahmen dieses Auftrages nicht in einer originalmaßstäblichen Apparatur sondern in einer Laborapparatur durchgeführt werden sollen.

Eine Apparatur, mit der das Selbstentzündungsverhalten der Produkte unter Laborbedingungen untersucht werden kann, wird bis zur Dauereinsatzreife entwickelt. Diese Untersuchungen erfolgen unter möglichst weitgehender Simulation der Bedingungen hinsichtlich Druck, Temperatur, Durchströmungsrate und Expositionsdauer bei erhöhter Temperatur.

Diese Apparatur wird im folgenden mit Reaktor bezeichnet.

- (4.) Funktionsprüfung, Einfahren und soweit erforderlich Komplettierung bzw. Verbesserung des Reaktors.

Angaben hierzu finden sich im vorgenannten Zwischenbericht vom 18.11.1993 und im Abschnitt 4 dieses Abschlußberichtes .

- (5.) Erarbeitung einer geeigneten Untersuchungstechnik für den Reaktor.
- (6.) Untersuchungen über das Entzündungsverhalten der hier verwendeten Produkte und Vergleich der dabei gewonnenen Ergebnisse mit den Selbstentzündungstemperaturen nach dem bei Normaldruck ablaufenden sogenannten Warmlagerversuch in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [4].

Die Beschreibung der Untersuchungen, die Darstellung der Ergebnisse und ihre Diskussion sind im Abschnitt 5 dieses Abschlußberichtes enthalten.

- (7.) Folgerungen aus den Ergebnissen und Erkenntnissen dieses Berichtes zur Vermeidung von Selbstentzündungsbränden in Silofahrzeugen

Diese Folgerungen werden in Abschnitt 7 - 9 des Berichtes dargelegt.

- (8.) Über (7.) hinausgehend Zusammenstellung von ausreichenden Schutzmaßnahmen zur sicheren Vermeidung der weiteren in Abschnitt 1 genannten Zündquellen.
- (9.) Anfertigung eines Abschlußberichtes.



3. Produktbeschreibung

Untersuchte Produkte	Laboruntersuchungsnummer
Weizen unbehandelt	656
Weizenabrieb	657
Weizenmehl Typ 556	617
Roh (Brau) Gerste	630
Reinigungsstaub Gerste	628
Raps	616
Raps behandelt Vollöl (geschroteter Raps, nicht extrahiert)	629
Schwein 5282 ME Krümel	627
Hähnchen-Endmast 4321	631
Futter 1360	632
Milchviehfutter	676
Raps Extraktionsschrot	710

Im Zuge der Produktbeschreibung in Anlehnung an VDI 2263 Blatt 1 [4] durchgeführte Untersuchungen:

- Kornanalyse
- Feuchtigkeitsbestimmung (Wassergehalt)
- Zündtemperatur
- Glimmtemperatur
- Brennbarkeit
- Fettgehaltbestimmung mit der Soxleth-Extraktionsapparatur in Anlehnung an die Richtlinie 84/4/EWG Verfahren A ohne die Zugabe von Natriumsulfat

Die Ergebnisse sind in der Anlage 1 zusammengefaßt.

Dabei gilt definitionsgemäß:

- Zündtemperatur:

Sie beschreibt das Entzündungsverhalten des aufgewirbelten Staubes an heißen Flächen.

- Glimmtemperatur:

Hier wird das Entzündungsverhalten einer 5 mm dicken Staubschicht beschrieben. Die Abkürzung k.G.b. ... °C bedeutet: kein Glimmen bis ... °C.

Brennbarkeit:

Diese Bewertung erfolgt aufgrund des Reaktionsablaufes mit Ziffern zwischen 1 und 6

- 1 kein Anbrennen
- 2 kurzes Anbrennen, rasches Auslöschten
- 3 örtliches Brennen oder Glimmen ohne Ausbreitung
- 4 Ausbreitung eines Glimmbrandes
- 5 Ausbreitung eines offenen Brandes
- 6 sehr rasches Abbrennen

4. Anlagenbeschreibung

Durch wiederholt auftretende Schadensfälle an Silofahrzeugen durch Explosionen wurde die FSA beauftragt, die Mechanismen, die zu Explosionen führen können, zu untersuchen. Dazu war es notwendig, eine Versuchsapparatur zu entwickeln, in der die Betriebsparameter des Entleervorganges eines Silofahrzeuges im Labormaßstab simuliert werden können. In Bild 1 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt.

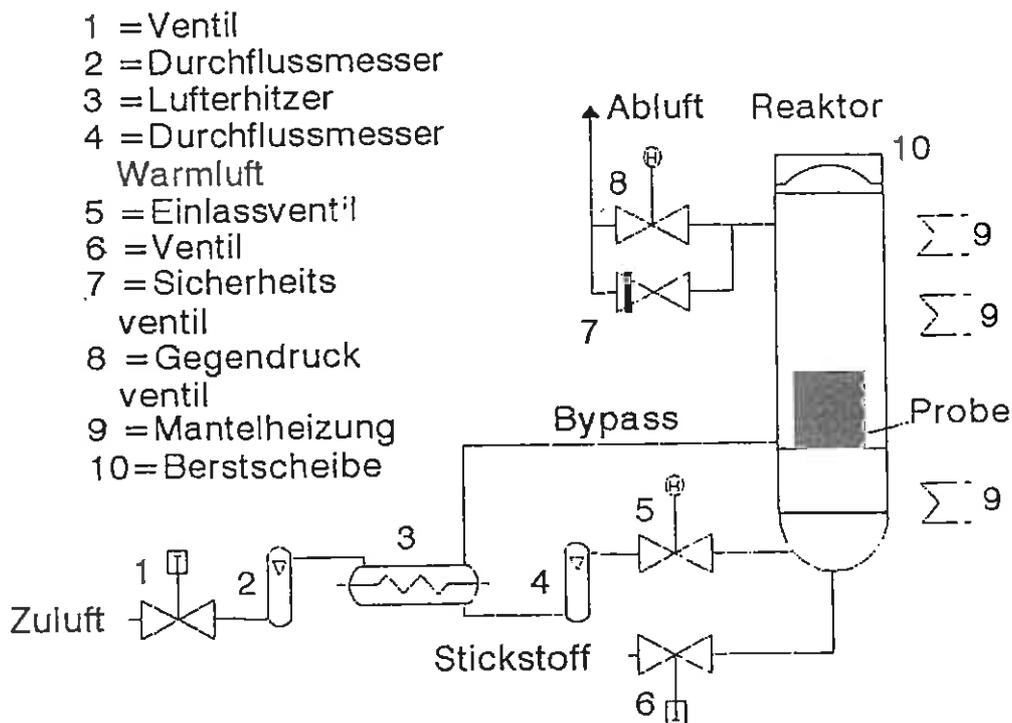


Bild 1



Kernstück der Versuchseinrichtung ist der Versuchsbehälter, Reaktor genannt. In diesem Behälter befindet sich die zu untersuchende Probe. Der Reaktor besteht aus 4 Teilen:

- Teil 1
- Einlaß der vorgeheizten Druckluft
 - Temperaturmessung Ta 1
 - Druckmessung P 1
 - Einbringen von Stickstoff zu Löschzwecken

- Teil 2
- Probebehälter aus Duran-Glas mit Krone.

Er steht auf einem V2A Sieb. Die in das Glas hineinragende Krone verschließt mit dem an ihr angebrachten Sieb den Probenbehälter nach oben. Ein Ausblasen des Produktes kann somit verhindert werden.

Die Probe kann nun von heißer Luft durchströmt werden. Der Glasdurchmesser und die Probenfüllhöhe betragen 8 cm und entsprechen somit der Geometrie und dem Probenvolumen des Standardkorbes bei den Warmlagerversuchen in Anlehnung an VDI 2263.

Die Reaktorhülle besteht in diesem Bereich aus einem druckfesten Glaszylinder, so daß der Versuchsablauf beobachtet werden kann. Der Zwischenraum zwischen Sichtglas und Probenbehälter wird von der erwärmten Bypassluft durchströmt und soll Wärmeverluste vermeiden.

- Teil 3
- Aufnahmeteile für Temperaturfühler zur Messung der Proben temperatur (Ti 1 und Ti 2).

Die Anordnung der Fühler ist analog der Anordnung bei dem Warmlagerversuch in Anlehnung an VDI 2263.

Die Temperatur Ti 1 entspricht der Versuchstemperatur und ist gleichzeitig die Führungsgröße für die Sicherheitselektronik (Doppelthermoelement).

- Teil 4
- Temperaturmessung Ta 2
 - Druckmessung P 2
 - Luftauslass über ein Ventil zur Einstellung eines Behältervordrucks
 - Ein im Bypass zum Auslaßventil liegendes Sicherheitsventil
 - Eine Berstscheibe zur Entlastung über dem gesamten Querschnitt als oberer Abschluß des Behälters

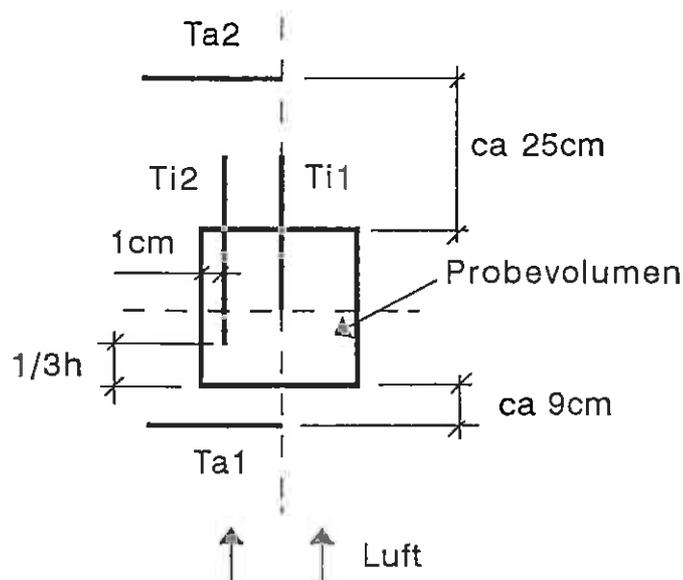


Bild 2 Anordnung der Temperaturfühler (nicht maßstäblich)

4.1 Wirkungsweise der Gesamtanlage

4.1.1 Mechanischer Gesamtaufbau

Die von der hauseigenen Druckluftanlage zur Verfügung gestellte Druckluft wird über eine Reduzierstation auf max. 3 bar reduziert. Diese Druckluft kann als ölfrei angesehen werden, weil sie wie folgt nachbehandelt wird:

Dem Druckluftkessel ist ein Lufterhitzer zur Trocknung nachgeschaltet. Danach passiert die Druckluft zwei hintereinandergeschaltete Mikrofilter (Fa. Zander). Die danach noch möglichen Ölpartikel werden im Lufterhitzer des Reaktors (Temperatur > 300 °C) verbrannt.

Die Luft gelangt über ein Nadelventil vor dem Luftmengenmesser "kalt" - es dient zur Einstellung der Luftmenge - zum Durchflußmesser. Dem Durchflußmesser ist ein Manometer und das Magnetventil "Luft kalt" direkt nachgeschaltet.

Über einen Metallgewebes Schlauch gelangt die Kaltluft in den Luftherhitzer. Hier wird die Luft entsprechend der Regelvorgabe auf Versuchstemperatur gebracht. Hier erfolgt auch die Aufteilung der Luft in die "Versuchsluft" und "Bypassluft". Die Versuchsluft durchströmt den Heißluftmesser und gelangt über ein Ventil in den Reaktor, wo die Probe heiß durchströmt wird.

Das am Reaktorausgang befindliche Ventil stellt den Überdruck im Reaktor ein. Das Sicherheitsventil im Bypass ist auf einen geringfügig höheren Abblasdruck eingestellt, um Drucküberhöhungen im Reaktor zu vermeiden. Die Abluft wird schließlich in einen Abzug geleitet.

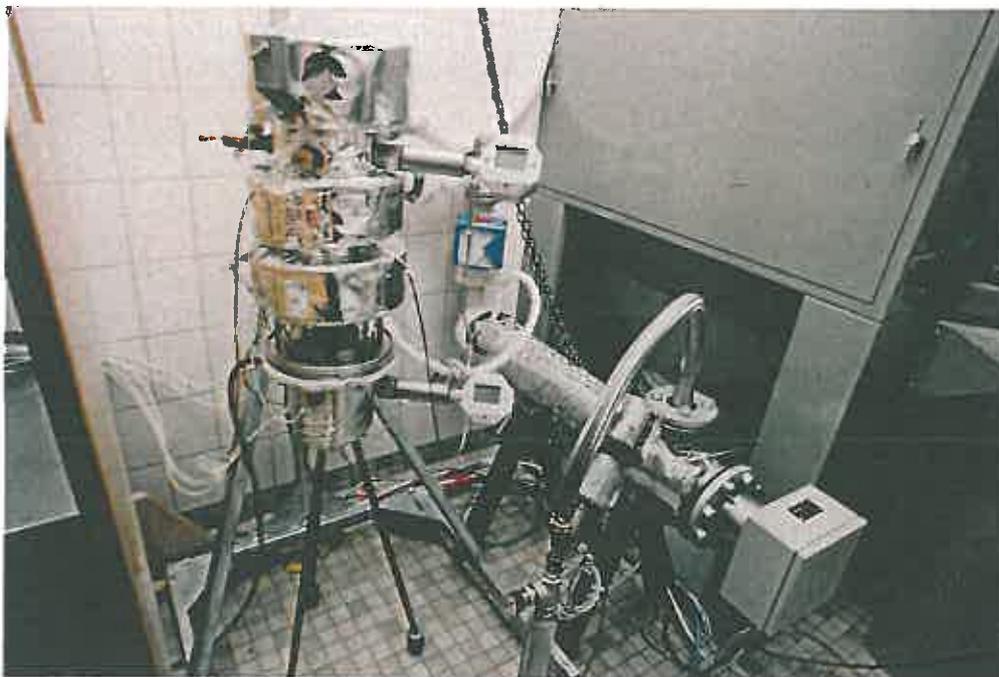


Bild 3 Reaktor mit Luftherhitzer

4.1.2 Elektronische Regelung

Jeder Heizkreis - sei es nun der Luftherhitzer oder die drei Mantelheizungen - verfügen über separate Regler zur Temperatureinstellung. Diese elektrischen Verbraucher werden von einer Sicherheitseinrichtung eingespeist.



Diese Sicherheitsregelung erfüllt folgende Kriterien:

Im stromlosen Zustand ist das Ventil "Stickstoff" offen und das Ventil "Luft" geschlossen. Im eingeschalteten Zustand schaltet die Regelung auf die Pos. "Heizung aus", d.h. Mantelheizungen und Lufterhitzer sind stromlos.

Zwei Temperaturen werden stetig gemessen und angezeigt: Ta 1 - die Lufttemperatur - und Ti 1 - die Versuchstemperatur.

Der Timer für die Stickstofflutung wird entsprechend der Vorgabe gesetzt.

Durch Drücken der Taste "Heizung" wird

- das Stickstoffventil abgeschaltet
- die Luft zugeschaltet
- die Heizung eingeschaltet

Überschreitet nun Ti 1 einen Wert $> 400\text{ °C}$ (variabel), so schaltet die speicherprogrammierbare Steuerung

- die Heizung aus
- Luft aus
- Stickstoff ein

Der Behälter wird entsprechend der Nachlaufzeit geflutet.

Ein Einschalten der Heizung ist erst wieder mit Hand möglich.

Wegen der schnellen Druckerhöhungen und wegen des Ansprechens der Berstscheiben auch nach Bränden im Reaktor wurden zusätzlich

- der über der Probe liegende Temperaturfühler ebenfalls als Doppelthermoelement ausgelegt,
- der speicherprogrammierbaren Steuerung für die Sicherheitseinrichtung als Abschaltkriterium eine ODER-Funktion zugeführt.



5 Beschreibung des Untersuchungsablaufes

5.1 Warmlageruntersuchungen

Von den Urmustern (= Anlieferungszustand) aller Produkte wurden Warmlageruntersuchungen in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [4] durchgeführt.

Dazu wird das Produkt in einen Drahtkorb von 400 cm^3 eingebracht (Höhe/Durchmesser - Verhältnis $h/d = h$) und in einen Wärmeschrank eingestellt. Die Temperaturfühler (2 in der Probe, 2 außerhalb der Probe) werden einjustiert und der Ofen auf Betriebstemperatur gebracht. 2 l/min erwärmter Luft wird in den Ofen geleitet. Untersucht wird, ob sich die Probe über die Betriebstemperatur hinaus erwärmt. Die Temperatur wird in $10 \text{ }^\circ\text{C}$ -Sprüngen variiert.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anlage 2 dargestellt.

Um die Volumenabhängigkeit darzustellen, wurden von dem Produkt "Raps behandelt Vollöl Untersuchungen in Drahtkörben von 100 cm^3 , 400 cm^3 und 3200 cm^3 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anlage A3.1 dargestellt.

5.2 Reaktoruntersuchungen

5.2.1 Erstellen und Einbringen der Probe

Das Urmuster der Probe wird in ein 400 cm^3 -Eichgefäß eingebracht und abgewogen.

Der Reaktor wird zwischen Teil 2 und 3 sowie zwischen Teil 3 und 4 getrennt. Teil 4 wird mit einem Flaschenzug angehoben. Teil 3 wird auf einer nebenstehenden Konstruktion abgelegt. Somit ist der auf einem Drahtgitter stehende Probezylinder zugänglich. Die Probe wird eingefüllt und glattgestrichen. Die Krone mit dem Drahtgitter wird eingesetzt. Ein sternförmiger Niederhalter wird auf die Krone gesetzt und mit Bolzen im Reaktor verschraubt. Die Probe ist somit im Reaktor positioniert.

5.2.2 Justieren der Fühler

Ebenso wie der Niederhalter ist auch das Drahtgitter der Krone mit 2 Bohrungen versehen. Durch diese Bohrungen werden auf Maß abgelängte, unten verschlossene dicht passende Glasröhrchen eingeführt und befestigt. Jetzt wird Teil 3 auf Teil 2 aufgesetzt und die Temperaturfühler in die Glasröhrchen eingeschoben. Damit sind die Temperaturfühler exakt positioniert. Teil 4 wird auf Teil 3 aufgesetzt. Die Reaktorteile werden miteinander verschraubt und die Flansche temperaturisoliert.

Damit ist der Reaktor für die Untersuchung vorbereitet.



5.3 Untersuchungsdurchführung

Nach dem Einschalten der Sicherheitsregeleinrichtung und der Meß- und Registriereinheit, Schließen des Einlaßventils und Öffnen des Abluftventils werden an der Sicherheitsregeleinrichtung

- alle Heizkreise zugeschaltet
- Luftventil geöffnet
- Stickstoffventil geschlossen.

Das Einlaßventil wird geöffnet, am Auslaßventil wird der Gegendruck eingestellt.

Die Probe wird von der sich immer mehr erwärmenden Versuchsluft durchströmt, bis die eingestellte Versuchstemperatur erreicht ist. Diese Temperatur wird - falls keine Reaktion eintritt - mindestens für 2 h gehalten. Tritt eine Reaktion ein, so schaltet die Sicherheitsregeleinrichtung bei einer Temperatur $> 400\text{ °C}$

- das Luftventil zu
- alle Heizkreise ab
- Stickstoffventil für eine definierte Zeit auf.

Die Untersuchung wird somit unterbrochen.

Die Versuche haben gezeigt, daß bei einer Reaktion des Produktes die Produkttemperatur sehr schnell ansteigt, so daß bereits von einem dynamischen Vorgang gesprochen werden kann. Die Probe in der ersten Untersuchung wird auf 200 °C aufgeheizt. Reagiert die Probe, so wird die zweite Untersuchung auf der nächsten, tiefergelegenen, Zehner-Temperaturstufe gefahren - und zwar wiederum für mindestens 2 h nach Erreichen der Temperatur.

5.4 Interpretation der Pegelschriebe

Der Pegelschrieb (siehe Anlage 2) ist in 2 parallel laufende Schriebe unterteilt

- dem Temperaturbereich
- dem Druckbereich

Zur Interpretation des Versuchsablaufes wird der Temperaturbereich herangezogen. Verlaufen die Temperaturkurven nach Erreichen der Versuchstemperatur parallel, so hat keine Reaktion stattgefunden.

Steigen $T_i 1$ und $T_i 2$ steil an ohne eine nennenswerte Erhöhung von $T_a 1$ und $T_a 2$, so hat sich im Produkt ein Glimmnest gebildet.

Die Bewertung als Selbsterwärmung bzw. -entzündung erfolgt gemäß VDI - Richtlinie 2263 Blatt 1 [4].



Steigt Ta 2 an, gefolgt von Ti 1 und Ti 2, so hat das Produkt mit offener Flamme gebrannt und die Produkttemperatur hat sich aufgrund des Brandes erhöht (siehe auch Anlage 3).

Allerdings sollte man die bei einer Reaktion gemessenen Temperaturen und Drücke nicht als Maximalwerte betrachten. Man sollte sich immer vor Augen halten, daß die Reaktion von der Sicherheitselektronik abgebrochen wurde (siehe Abschnitt 4.1.2).

5.5 Bestimmung des Volumendurchsatzes der erwärmten Luft

Da die erwärmte Luft durch eine Rohrstrecke mit unterschiedlichen Durchmessern strömt, treten Kompressions- und Entlastungsvorgänge in dem Medium auf. Parallel dazu wird noch ein variabler Gegendruck von 0 - 1 bar aufgebaut. Dies hat zur Folge, daß die im Schwebekörperdurchflussmesser gemessenen Volumenströme korrigiert werden müssen. Daher handelt es sich bei den Angaben der erwärmten Volumenströme um unkorrigierte Werte.

6. Durchgeführte Versuchsreihen und deren Ergebnisse

Folgende Versuchsreihen wurden im Reaktor gefahren:

- Grundsätzliche Untersuchungen der Reaktionstemperatur der in Abschnitt 3 unter "Produktbeschreibung" aufgeführten Produkten bei 1 bar Gegendruck und bei Durchströmung mit 100 l Warmluft /min.
Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in Anlage 4 zusammengestellt.

Da sich "Raps behandelt Vollöl" mit einer Reaktionstemperatur von 180°C nach der Warmlageruntersuchung in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2263, Blatt 1, Ziffer 1.4.2, als das Produkt mit dem tiefsten Reaktionspunkt erwies, wurden die weiteren Versuche mit ihm gefahren:

- Variation des Gegendrucks von 0 - 1 bar bei konstantem Warmluftstrom 100 l/min
Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in Anlage 5 zusammengestellt.
- Variation des Warmluftstromes von 50 - 150 l/min bei 1 bar Gegendruck . Eine geringere Warmluftmenge führte zu unrealistisch langen Erwärmungszeiten des Produktes.
Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in Anlage 6 zusammengestellt.

Bei diesen Versuchsreihen wurde das Produkt zwischen Drahtsieben gelagert. Da in der Praxis die Vorkammerluft durch das Pneumatikgewebe strömt, erfolgte bei den folgenden Versuchen der obere Abschluß an der Krone mit Pneumatikgewebe E350 und E800.

- Bestimmung der tiefsten Reaktionstemperatur mit beiden Geweben bei 1 bar Gegendruck und 100 l/min Warmluft.
Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in Anlage 7 zusammengestellt.



In der Praxis kann das Produkt überströmt werden. Deshalb wurde der Aufbau des Probenbehälters wie in Bild 4 dargestellt modifiziert und folgender Versuch gefahren:

- Bestimmung der tiefsten Reaktionstemperatur bei 1 bar Gegendruck und 100 l/min Warmluft bei dem Gewebe E350.
Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in Anlage 8 zusammengestellt.

Der Reaktor sowie die Zusatzeinrichtungen wie Temperaturregelungen, Durchflußsteuerung, Messung und Registrierung der Temperaturen und Drücke funktionieren bestimmungsgemäß und betriebssicher.

Die in den Reaktor eingebaute Sicherheitstechnik, bei Selbstentzündung und darauf basierender Temperaturüberschreitung über 400 °C eine Stickstoff-Flutung auszulösen, hat sich bewährt (s. Anlage 2).

Man beachte den raschen Temperaturabfall von Beginn der N₂-Zugabe an.

Unter Berücksichtigung aller Meß- und Übertragungsfehler werden für die Untersuchungsintervalle 10 grad angesetzt.

Die maximalen Werte der Versuchsvariablen im Reaktor sind z.Zt.:

- Temperatur ≤ 200 °C
- Druck ≤ 2 bar (A)
- Volumenstrom 50 - 100 l / min ²

Eine höhere Einsatztemperatur ist durch die Temperaturempfindlichkeit der Dichtungswerkstoffe nicht möglich.

Der bei den meisten im Reaktor durchgeführten Untersuchungen eingestellte Volumenstrom von ca. 100 l/min ³ entspricht einem abgeschätzten mittleren Volumenstrom in den Auflockerungstrichtern der Silofahrzeuge. Genaue Zahlen sind auch prinzipiell nicht zugänglich, da die Teilluftströme für Oberluft, Auflockerungsluft und Förderluft zwischen 0 und voller Förderleistung beliebig variiert werden können.

Mit dem Produkt "Schwein ME Krümel" wurden folgende Kontrollversuche gefahren:

- Variation des Gegendrucks bei konstantem Warmluftstrom 100 l/min.
- Variation des Warmluftstroms bei 1 bar Gegendruck.

Die Versuche wurden abgebrochen, da keine Reaktionstemperaturen erreicht wurden. Die Versuchsparameter und -ergebnisse sind in den Anlagen 9 und 10 zusammengestellt. Diese Versuche wurden zwischen den Drahtsieben durchgeführt.

² erhitzte Druckluft, unkorrigierter Wert

³ erhitzte Druckluft, unkorrigierter Wert

Folgender Kontrollversuch wurde mit Pneumatikgewebe gefahren:

- Überstömversuch bei 1 bar Gegendruck und 100l/min Warmluft bei dem Gewebe E350 (Bild 4)

Dadurch wurde die Anordnung des Temperaturfühlers Ti 2 gemäß Bild 4 geändert.

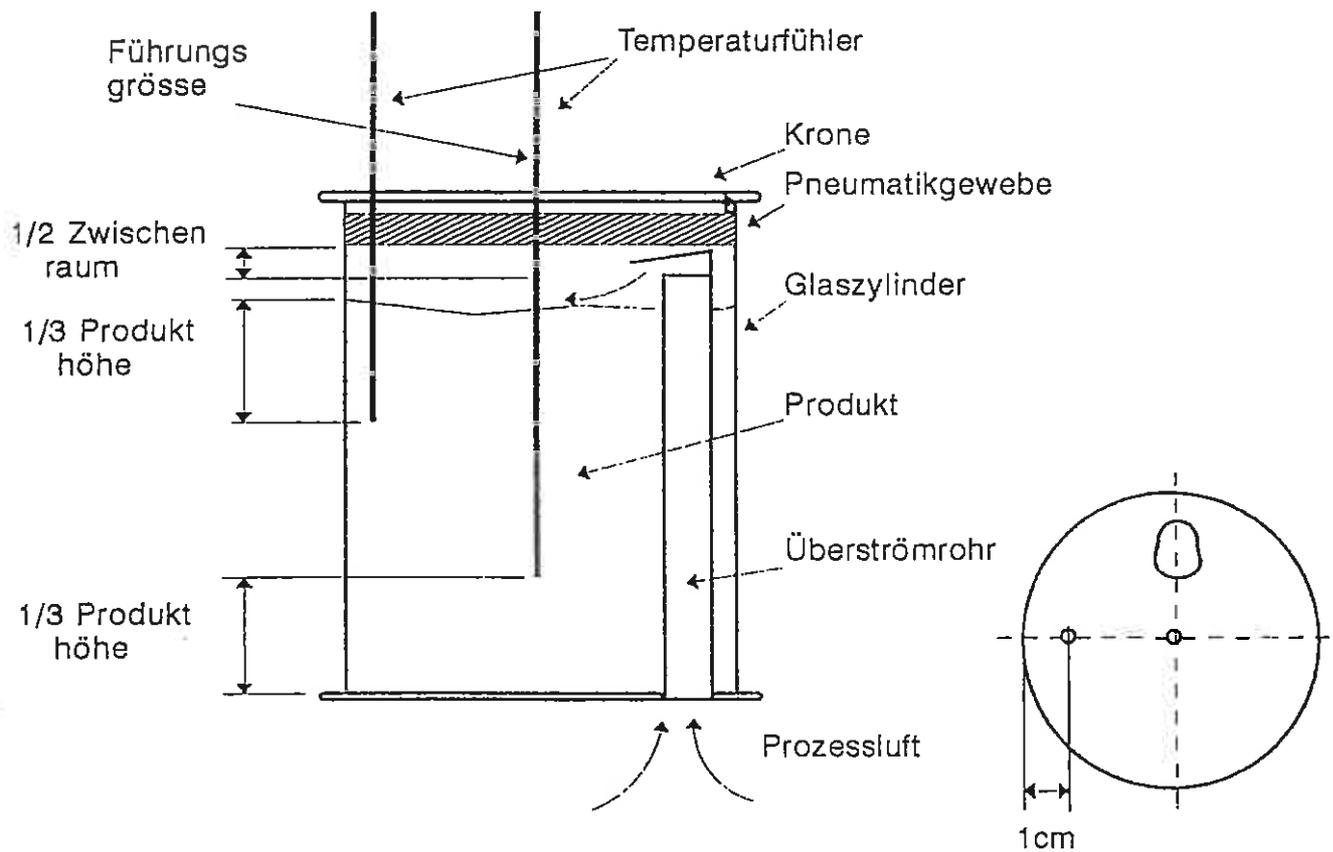


Bild 4 Überströmversuche



7. Interpretation der Ergebnisse

Aus Kapazitäts- und Zeitgründen wurde der Probenumfang auf 12 Produkte festgelegt. Diese geringe Probenanzahl gestattet für die folgenden Aussagen keine statistische Sicherung allgemein gültiger Zusammenhänge. Trotz dieser Einschränkung lassen sich aus den bislang gewonnenen Ergebnissen jedoch folgende wichtige Aussagen treffen:

- ◆ Ganzkornprodukte reagieren bis zur max. Untersuchungstemperatur im möglichen Untersuchungszeitraum von 2 Stunden nach Erreichen der Untersuchungstemperatur nicht.

Zur Verdeutlichung dieser Aussage sei darauf hingewiesen, daß mit abnehmender Korngröße der Partikel im Haufwerk folgende Effekte eintreten:

- Die massenspezifische Oberfläche nimmt zu.
Folgen:
 - Reaktionsgeschwindigkeit wird erhöht
 - Entzündungstemperatur wird erniedrigt
- Der Durchströmungswiderstand für Gase steigt. Die Gasdurchströmungsrate und damit die staubmassenspezifischen Geschwindigkeiten des O₂-Antransportes und des Abtransportes der gasförmigen Verbrennungsprodukte (CO₂, H₂O, N₂) sinken.
Folgen:
 - Reaktionsgeschwindigkeit wird erniedrigt
 - Entzündungstemperatur wird erhöht
- Die Wärmeleitungsfähigkeit der Staubschüttung sinkt. Damit wird weniger Reaktionswärme pro Zeiteinheit abgeführt, wodurch die Temperatur in dem Schüttgut schneller steigt.
Folgen:
 - Reaktionsgeschwindigkeit wird erhöht
 - Entzündungstemperatur wird erniedrigt

Der Einfluß der Korngröße wird am Vergleich der Entzündungstemperaturen deutlich:

Raps - Ganzkorn:	> 200 °C (Warmlagerversuch in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 2 und Reaktor)
Raps, behandelt - Vollöl:	140 °C (in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1)
(= Rapsschrot nicht entölt) (s.a. Anlage 3)	180 °C (Reaktor)

Beide Produkte unterscheiden sich im wesentlichen nur durch die Korngröße ca. 2 mm, Schrot 35 % < 0,5 mm).



- ◆ Ein signifikanter Einfluß der Zusammensetzung ist hinsichtlich Fettgehalt des Fördergutes zu erkennen. Ein erhöhter Fettgehalt senkt die Selbstentzündungstemperatur sowohl bei den Warmlagerversuchen in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1 als auch bei den Reaktoruntersuchungen und begünstigt das Brennverhalten. Das geht soweit, daß bei der Probe Rapsschrot Vollöl mit 28,5 % Fettgehalt ein offener Flammbrand neben dem Glutbrand der Probe eintritt. Dieser Flammbrand ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf flüchtige Zersetzungsprodukte des Fett- bzw. Ölanteiles zurückzuführen.
- ◆ Die Temperaturanstiege bei Selbstentzündung unter erhöhtem Druck sind wesentlich schneller und deutlicher als bei den unter Normaldruck verlaufenden Warmlagerversuchen.
- ◆ Die Selbstentzündungstemperatur sinkt mit abnehmender Durchströmungsrate. Das läßt sich damit erklären, daß durch die stärkere Durchströmung in der Reaktorprobe wesentlich mehr Reaktionsenergie abgeführt wird, als bei den Warmlagerversuchen in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1. Dieses Ergebnis ist auch von wesentlichem praktischen Nutzen, da es gestattet, die im Warmlagerversuch in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1 ermittelte Selbstentzündungstemperatur als einen kritischen Schwellwert anzusehen, der bei der Förderung aus dem Silofahrzeug auf keinen Fall überschritten werden darf.

Aus diesem Grund ist die Bestimmung von Selbstentzündungstemperaturen im Reaktor bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten, die eine Extrapolation auf 0 l/min gestattet, von besonderer Wichtigkeit.

- ◆ Die Selbstentzündungstemperatur sinkt mit zunehmendem Volumen bzw. abnehmender Wärmeleitfähigkeit des erwärmten Fördergutes.
- ◆ Die Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur unter Überströmen der Probe mit heißer Luft ist als Variante des Warmlagerversuches in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1 und zwar unter Druckluft, zu verstehen. Hinsichtlich der Ergebnisse ist festzuhalten:
 - Die dabei ermittelten Selbstentzündungstemperaturen sind gerade noch erkennbar niedriger als beim Durchströmen der Proben mit heißer Druckluft.
 - Verglichen mit dem drucklosen Warmlagerversuch in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1 ist die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich höher.
- ◆ Der Kontakt des Fördergutes mit dem Pneumatikgewebe begünstigt die Selbstentzündung.

Aus den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, daß die Gefahr der Selbstentzündung des Fördergutes nur dann gegeben ist, wenn es im Bereich der ungekühlten Druckluft liegen bleibt. Das ist dann der Fall, wenn das Fördergut entweder am Pneumatikgewebe anbäckt oder wenn es infolge von Gewebeschäden in den Druckluftverteilteraum unterhalb des Gewebes fällt.



Die Gefahr der Selbstentzündung steigt dabei

- mit abnehmender Korngröße des Fördergutes
- mit zunehmendem Öl-/Fettgehalt des Fördergutes
- mit zunehmendem Volumen bzw. abnehmender Wärmeleitfähigkeit des erwärmten Fördergutes
- mit steigender Verweildauer des Fördergutes im Bereich der ungekühlten Druckluft
- mit steigendem Druck der ungekühlten Druckluft
- mit steigender Durchströmungsrate der Fördergutes
- wenn das Fördergut mit dem Pneumatikgewebe Kontakt hat.

Zwischen den Selbstentzündungstemperaturen, die nach den Warmlagerversuchen und den Reaktorversuchen gewonnen wurden, besteht im hier vorgegebenen Untersuchungsbereich der Zusammenhang, daß die Werte der Warmlagerversuche in Anlehnung an VDI 2263, Blatt 1 um ca. 30 °C niedriger liegen als die Reaktorwerte (s.a. Anlage 3).

Eine Korrelation zwischen Zündtemperatur und Bewertung der Brennbarkeit (= Pos. 5 auf den Blättern der Anlage 1) einerseits und den Selbstentzündungstemperaturen bei den Warmlager- und Reaktoruntersuchungen andererseits ist nicht zu erkennen.

Zwischen den Glimmtemperaturen und den vorgenannten Selbstentzündungstemperaturen ist eine schwache Korrelation zu erkennen, aus der aber keine verwertbaren Schlüsse gezogen werden können.

8. Umfassender Explosionsschutz an Silofahrzeugen

Die Verpflichtung zu umfassenden Brand- Explosionsschutzmaßnahmen an Silofahrzeugen ist in den folgenden Vorschriften und Richtlinien festgelegt:

1. § 44, (1) UVV 1 [5]
Kann beim Umgang mit brennbaren Stoffen durch das Auftreten von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben explosionsfähige Atmosphäre entstehen, müssen Maßnahmen getroffen werden,
 - die eine Bildung explosionsfähiger Atmosphäre in gefahrdrohender Menge verhindernoder
 - die Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre verhindern
 - ...
2. Artikel 1.5.6 der Maschinenrichtlinie [6]
Die Maschine muß so gebaut und konzipiert sein, das jegliche von der Maschine selbst oder durch Gase, Flüssigkeiten, Stäube, Dämpfe und andere von der Maschine freigesetzte oder verwendete Substanzen verursachte Brand- und Überhitzungsgefahr vermieden wird.



3. Artikel 1.5.7 der Maschinenrichtlinie [6]

Die Maschine muß so gebaut und konzipiert sein, das jegliche Explosionsgefahr, die von der Maschine selbst oder von Gasen, Flüssigkeiten, Stäuben, Dämpfen und anderen von der Maschine freigesetzte oder verwendete Substanzen ausgeht, vermieden wird

Hierzu hat der Hersteller Maßnahmen zu treffen, um

- ...
- eine Zündung explosionsfähiger Atmosphäre zu vermeiden
- ...

Die Silofahrzeugbehälter, die pneumatischen Fördersysteme einschließlich der Kompressoren sind nach Artikel 2.1. Anhang 1 der Maschinenrichtlinie [6] den Nahrungsmittelmaschinen zuzurechnen.

4. § 17a der UVV "Verdichter" [3]

Luftverdichter zur Förderung brennbarer, fester Stoffe müssen so betrieben werden, daß eine Entzündung des Staubes nicht möglich ist.

5. Anlage zu den §§ 9 und 17 UVV "Verdichter" [3]

Grenzwert der Verdichtungsendtemperatur für Luftverdichter zum Fördern brennbarer Stoffe : 100 °C.

6. Abschnitt 6.3.2.1 der VDI - Richtlinie 2263 [4]

Die Temperatur des Fördermediums muß so niedrig sein, daß Selbstentzündung nicht eintritt.

8.1 Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen

Die in diesem Abschnitt angestellten Betrachtungen beziehen sich auf den Transport von Getreide- und Futtermittelstäuben in Silofahrzeugen. Hierunter sind im engeren Sinne zu verstehen:

- Abrieb von Ganzkorngetreide
- Pelletabrieb
- Mehl,
- Dunst, Gries
- Kleie, Nachmehl
- Reinigungsabgänge, Keime
- Pelletabrieb
- Futtermittelkomponenten als Schrote oder in Pulverform
- loses Mischfutter



Da bei dem Transport, der Förderung und der Lagerung von zunächst nicht staubförmigen Produkten wie Ganzkorngetreide Pellets, Granulate und Expeller unvermeidbar Staub entsteht, müssen auch diese Produkte hinsichtlich Temperaturbegrenzung wie die "Getreide-und Futtermittelstäube" betrachtet und behandelt werden.

Es ist zu beachten, daß die Verhütung von Glimmbränden die wesentlichste, aber nicht die einzige und damit für sich allein auch noch keine ausreichende Schutzmaßnahme gegen Explosionen in Silofahrzeugen ist.

Zusätzlich müssen noch praktikable und in ihrer Schutzwirkung ausreichende Maßnahmen zur Ausschaltung der in Abschnitt 1 aufgeführten weiteren Zündquellen angewandt werden. Es ist notwendig, die folgenden Maßnahmen gemeinsam anzuwenden, um Zündquellen in Silofahrzeugen mit ausreichender Sicherheit zu vermeiden.

Die Maßnahmen 8.1.1 - 8.1.5 resultieren aus den Arbeiten gemäß Abschnitt 3 - 7, die Maßnahmen 8.1.6 - 8.1.11 resultieren aus den Betrachtungen gemäß Abschnitt 1 dieses Abschlußberichtes.

- 8.1.1 **Verhinderung der Selbstentzündung durch Begrenzung der Drucklufttemperatur** für die Auflockerung und Förderung entsprechend der Forderung des § 17a UVV Verdichter und der zugehörigen Durchführungsanweisung auf maximal 100 °C zu beschränken. Eine weitergehende Temperatursenkung steigert das Sicherheitsniveau noch weiter.

Die Kühlung der Druckluft ist das Kernstück aller Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der Selbstentzündung.

- 8.1.2 **Konstruktive Maßnahmen zur leichteren Reinigung und Instandsetzung der Vorkammern**

- 8.1.3 **Regelmäßige Inspektion, Reinigung und Instandhaltung** der Austragsapparate sowie ihrer Zu- und Ableitungen mit dem Ziel, Ablagerungen und Anbackungen zu vermeiden bzw. zu beseitigen bevor sie sich selbst entzünden.

- 8.1.4 Soweit wie technisch möglich sollten die **Pneumatikgewebe** zur Vermeidung von entzündungsgefährdeten Anbackungen am Pneumatikgewebe **durch Lochbleche oder Metallfrittenplatten** ersetzt werden.

- 8.1.5 In einem Silofahrzeug **dürfen nicht alternierend brennbare Fördergüter und verbrennungsfördernde Produkte**, wie (Kalk/)Ammonsalpeter, Chlorate (Totalherbicide), Peroxide u. dgl. transportiert werden.

- 8.1.6 **Verhinderung von Glutbrandeintragung beim Befüllen der Silofahrzeuge.**



- 8.1.7 **Verhinderung des Eintrags harter potentiell zündwirksamer Fremdkörper beim Befüllen der Silofahrzeuge** durch Verwendung von Schutzsieben oder Rosten mit geknickten Stegen. Derartige Fremdkörper sind z. B. Steine, Glasflaschen, Eisenteile (besonders rostige! wenn Alu-Silos befüllt werden), Aluteile (besonders wenn Stahlsilos befüllt werden).

Die Maßnahmen nach 8.1.5 und 8.1.6 sind unverzichtbare Aufgaben der Betriebe, die das Fördergut herstellen wie Getreidesilos, Kraftfuttermischwerke, Mühlen usw.

Diese Maßnahmen werden der Aufgabenstellung entsprechend hier nicht weiter betrachtet.

- 8.1.8 **Durchgängige Maßnahmen zur Verhinderung zündgefährlicher elektrostatischer Entladungen** mittels

- Potentialausgleich (Übergangswiderstand $< 10^6$ Ohm) zwischen allen metallischen Teilen
- betriebssichere stabile Erdungsanschlüsse und -verbindungen beim Be- und Entladen
- Verzicht auf isolierende Innenauskleidung metallischer Teile des Silofahrzeuges.

- 8.1.9 **Konsequente Brandkontrolle vor jeder Entladung**, im einfachsten Falle durch Geruchs- und Temperaturfühprobe.

- 8.1.10 Bei Brandverdacht oder -anzeichen werden geeignete **Löschmaßnahmen** gemäß erprobter **Löschvorschriften angewendet**. Diese Vorschriften sollten in Kooperation zwischen Silofahrzeugherstellern, Feuerwehr, Brandversicherern und Berufsgenossenschaften erarbeitet werden.

Die **Silofahrzeugfahrer** werden dazu entsprechend **geschult**.

Als geeignete Löschverfahren kommen z. B. in Betracht:

Fluten mit Wasser oder Ablöschen mit Sprühstrahl, Fluten mit Inertgas bis der Brand gelöscht ist. Danach erst wird das Füllgut unter Brandkontrolle ausgetragen.

Die Brandlöschung ist zwar durchweg recht aufwendig aber unverzichtbar, denn sie ermöglicht bei sachgerechter Anwendung, daß solche folgenschweren Fehler in der Behandlung brennender Silofahrzeugbehälter, wie 1993 in Neu-Ulm geschehen, sich nicht wiederholen.



8.1.11 Verbot der sogenannten trivialen Zündquellen wie

- offene Flammen,
- Funken und heiße Flächen infolge von Schweißen, Flexen, Schleifen, Bohren
- glimmende Tabakwaren

8.2 Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von explosionsfähigen Atmosphären

Diese Maßnahmen sind an Silofahrzeugen nicht anwendbar.

Begründung:

1. Brennbarer Staub kann nicht vermieden werden, da er hier Haupt- bzw. unvermeidbares Nebenprodukt ist.
2. Die Absenkung des O₂-Gehaltes < O₂-Grenzkonzentration ist nicht mit technisch-wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu verwirklichen.

Anmerkung:

Man beachte aber die Anwendbarkeit dieser Schutzmaßnahme unter bestimmten Voraussetzungen zur gefahrlosen Entleerung von Silofahrzeugen mit brennendem Inhalt gemäß Ziffer 8.1.10

8.3 Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes

Eine Verbesserung des Explosionsschutzes an Silofahrzeugen durch zusätzlichen konstruktiven Staubexplosionsschutz ist denkbar und, besonders beim Transport zündempfindlicher Fördergüter und/oder bei hohem Schutzbedarf der Empfängeranlagen, sicherheitstechnisch sinnvoll. Sie muß aber durch Forschungsarbeiten hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit und Gestaltung untersucht werden.

8.4 Schlußfolgerung

Unter den gegenwärtigen Möglichkeiten bieten die vorgenannten **Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen** ausreichende Sicherheit gegen Brände und Explosionen in Silofahrzeugen.



9. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Abschlußbericht knüpft an den Zwischenbericht zum gleichen Thema vom 18.04.1994 an.

In Silofahrzeug sind wiederholt Brände und Explosionen mit schweren Schäden eingetreten. Als hauptsächliche Ursache ist die Selbstentzündung von Fördergut im Bereich des Auflockerungstrichters durch die ungekühlte Förderluft, die durch den Bordkompressor auf $\geq 180^\circ\text{C}$ erwärmt wird, anzunehmen. Diese Annahme wurde durch experimentelle Untersuchungen in einer Modell-Laborapparatur bestätigt.

Sie gestattet die Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens durch Ermittlung der Temperatur, bei der ein Produkt unter den gegebenen Bedingungen zur Selbstentzündung gelangt

- bei Drücken ≤ 2 bar (A)
- bei Temperaturen $\leq 200^\circ\text{C}$
- einem Volumenstrom von 50 - 100 l/min

Diese Parameter entsprechen den Bedingungen im Austragsapparat der Silofahrzeuge.

Zur Ergänzung und zur vergleichenden Betrachtung diene die Bestimmung

- der Kenngrößen, die die Brand- und Staubexplosionsgefährlichkeit der hier untersuchten Proben beschreiben;
- des Selbstentzündungsverhaltens unter Normaldruck in konventionellen, bereits vorhandenen Apparaturen.

Aus den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, daß die Gefahr der Selbstentzündung des Fördergutes nur dann gegeben ist, wenn es im Bereich der ungekühlten Druckluft liegen bleibt. Das ist der Fall, wenn das Fördergut entweder am Pneumatikgewebe anbäckt oder wenn es infolge von Gewebeschäden in die Vorkammern unterhalb des Gewebes fällt.

Die Gefahr der Selbstentzündung steigt dabei

- mit abnehmender Korngröße des Fördergutes
- mit zunehmendem Öl-/Fettgehalt des Fördergutes
- mit zunehmendem Volumen bzw. abnehmender Wärmeleitfähigkeit des erwärmten Fördergutes
- mit steigender Verweildauer im Bereich der ungekühlten Druckluft
- mit steigendem Druck der ungekühlten Druckluft
- je weniger das Lagergut durchströmt wird
- wenn das Fördergut mit dem Pneumatikgewebe Kontakt hat.



Unter den gegenwärtigen technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten bieten sich folgende gemeinsam anzuwendende Maßnahmen an, um ausreichende Sicherheit gegen Brände und Explosionen beim Transport von brennbaren Schüttgütern⁴ aus dem Bereich der Nahrungs- und Futtermittelwirtschaft zu gewährleisten:

- ◆ Konstruktive Maßnahmen am Silofahrzeug zur Zündquellenvermeidung
 - Verhütung von Selbstentzündung durch Temperaturbegrenzung der Druckluft vor der Einspeisung in
 - den Vorbehälter
 - den Behälter
 - die pneumatische Förderleitungmittels einer geeigneten Kühleinrichtung
 - Verbesserung des Auflockerungsapparates am Silofahrzeug, wie
 - leichte Zugänglichkeit und Handhabung zur planmäßigen Kontrolle und Reinigung
 - ggf. Verzicht auf Pneumatikgewebe soweit technisch möglich
 - Erdungsanschlüsse
- ◆ Betriebliche Maßnahmen
 - Brandkontrolle und -bekämpfung.
 - Vermeidung folgender Zündquellen wie
 - eingetragene Glimmbrände
 - eingetragene zündwirksame Fremdkörper
 - elektrostatische Entladungsfunken.

Die ausreichende Absenkung der Förderlufttemperatur auf ≤ 100 °C ist dabei eine wesentliche, aber nicht die einzige erforderliche Maßnahme.

Die Notwendigkeit zur Verbesserung des Explosionsschutzes an Silofahrzeugen ergibt sich aus den geltenden Vorschriften und Richtlinien.

Die im Rahmen dieses Auftrages erzielten Ergebnisse gestatten, diese Folgerungen mit hinreichender Fundierung zu äußern und praxiswirksam umzusetzen.

Eine Verbesserung durch Methoden des konstruktiven Staubexplosionsschutzes ist denkbar und sicherheitstechnisch sinnvoll. Sie muß aber durch Forschungsarbeiten hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit und Gestaltung untersucht werden.

⁴ Zu diesen Schüttgütern zählen neben staubförmigen und -haltigen Produkten des Abriebes wegen auch Ganzkornprodukte, Pellets, Granulate und Expeller (s. a. Ziffer 8.1, 1. Absatz).



Für den Fall, daß vertiefte und umfassende Grundlagenkenntnisse über den Entzündungsmechanismus brennbarer Schüttgüter an Luft unter erhöhtem Druck und umfassende diesbezügliche Stoffdaten, wie Entzündungstemperaturen, energetische und kinetische Kenngrößen, benötigt werden, sind noch weitere Untersuchungen erforderlich. Dies wären insbesondere modifizierte Warmlagerversuche in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [4] in dem Reaktor unter systematischer und umfassender Variation der folgenden wesentlichsten relevanten Einflußparameter erforderlich.

- chemische und granulometrische Produktzusammensetzung
- Probenvolumen
- Art und Dauer der thermischen Belastung
- Art und Intensität des Kontaktes mit Druckluft (Durchströmung, Überströmung, Druck, Volumenstrom)
- Art des Pneumatikgewebes und seines Kontaktes mit dem Fördergut.

Bei derartig vielen Einflußparametern ist eine lückenlose Variation aller Einflußparametern nicht mehr zu bewältigen. Ein akzeptabler Kompromiß zwischen Aufwand und Informationsverlust ist nur unter konsequenter Anwendung statistischer Versuchsplanung realisierbar.

Originalmaßstäbliche Untersuchungen unter Verwendung von Silofahrzeug-Baugruppen wie Kompressor, Silo, Austragsapparat, Armaturen und Rohren sind sehr aufwendig. Sie sind nur dann nötig, wenn

- vertiefte Erkenntnisse über den Entzündungsmechanismus als erforderlich angesehen werden
- und
- wenn technologische und konstruktive Details zur Vermeidung entzündungswirksamer Produkterwärmung untersucht werden sollen.

Für die ausreichender Abschätzung der maximal zulässigen Drucklufttemperatur bei der Förderung eines bestimmten Produktes kann im Zweifelsfall der bei Atmosphärendruck durchzuführende Warmlagerversuch nach VDI - Richtlinie 2263 Blatt 1 [4] dienen.

10. Literaturzusammenstellung

[1]
Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltung
Unveröffentlichte Berichte und Protokolle

[2]
Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit
Beispielsammlung - Explosionsschutz-Richtlinien (EX-RL)
November 1989, Bestell-Nr.: ZH 1/10



- [3]
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
Unfallverhütungsvorschrift Verdichter
(VBG 16)
- [4]
VDI - Richtlinie 2263
Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren - Beurteilung - Schutzmaßnahmen
Blatt 1
Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von
Stäuben
- [5]
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften
Unfallverhütungsvorschrift
Allgemeine Vorschriften
(VBG 1)
- [6]
Richtlinie des Rates der EG
zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Maschinen
(89/393/EWG)
ABl. Nr. L 183 vom 29.06.1989, S. 9
mit Änderungen
- 91/368/EWG, ABl. Nr. L 198 vom 22.07.1991, S. 16
- 93/44/EWG, ABl. Nr. L 175 vom 19.07.1983, S. 12
- [7]
N. N.
Staubexplosionen in Silofahrzeugen
Sichere Chemiearbeit 42, (1990), Nr. 1, 1 - 2
- [8]
Berufsgenossenschaft Chemie
Jahresbericht 1989
- [9]
F. Böker
Silofahrzeuge; "Flüsterkompressor" kontra Lärm-, Brand- und Explosionsgefahren
Verkehrsrundschau, 16.06.1994, S. 42
- [10]
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten
- unveröffentlichter Zwischenbericht über einen tödlichen Unfall vom 06. 09.1993
- unveröffentlichte Berichte



Anlage A 1

Kennwerte der Produkte

DOK-Nr.: 657 F

Produkt: Weizenabrieb

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	100	100	99,9	99,1	95,6
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	9,0 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	400 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	270 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	4			
6.	Fettbestimmung	:	2,4 [%]			

DOK-Nr.: 656 F

Produkt: Weizen, unbehandelt

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	Nicht möglich, da Körner L = 6 mm, D = 3 mm				
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	6,6 [%]			
3.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
4.	Fettbestimmung	:	1,8 [%]			



DOK-Nr.: 617 F

Produkt: Weizenmehl, Typ 550

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	100	99,4	90,0	54,0	30
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	13,4 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	410 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	470 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
6.	Fettbestimmung	:	2 [%]			

DOK-Nr.: 630 F

Produkt: Gerste (Braugerste), roh

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	1,6	1,5	1,4	1,2	0,9
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	6,3 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	400 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	340 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
6.	Fettbestimmung	:	1,5 [%]			

**DOK-Nr.: 628 F****Produkt: Reinigungsstaub, Gerste**Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	58,3	37,9	21,8	15,3	11,9
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	7,2 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	430 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	280 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	4			
6.	Fettbestimmung	:	1,9 [%]			

DOK-Nr.: 616 F**Produkt: Raps**Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	Nicht möglich, da Produkt kugelförmig D = 2 mm				
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	7,5 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	420 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	380 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	5			
6.	Fettbestimmung	:	34 [%]			



DOK-Nr.: 629 F

Produkt: Raps, behandelt Vollöl

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	35,1	9,1	1,8	1,0	0,5
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	5,3 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	410 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	k.G.b. 450 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	4 - 5			
6.	Fettbestimmung	:	28,5 [%]			

DOK-Nr.: 627 F

Produkt: Schwein 5282 ME Krümel

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	36,2	17,0	11,1	8,6	5,7
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	11,1 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	470 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	290 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
6.	Fettbestimmung	:	7,6 [%]			



DOK-Nr.: 631 F

Produkt: Hähnchen Endmast 4321

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	67,5	45,8	32,5	24,6	17,6
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	12,1 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	460 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	290 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
6.	Fettbestimmung	:	3,7 [%]			

DOK-Nr.: 632 F

Produkt: Tiermastprodukt 1360

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung					
	Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32

	Kornanteil (Gew.-%)	39,3	21,3	12,9	7,2	4,2
2.	Feuchtigkeitsbestimmung					
	Wassergehalt	:	8,2 [%]			
3.	Zündtemperatur	:	420 [°C]			
4.	Glimmtemperatur	:	300 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung	:	2			
6.	Fettbestimmung	:	8,6 [%]			



DOK-Nr.: 676

Produkt: Milchviehfutter

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32
<hr/>						
	Kornanteil (Gew.-%)	8,7	5,1	2,7	1,4	0,6
2.	Feuchtigkeitsbestimmung Wassergehalt		10,5 [%]			
3.	Zündtemperatur		490 [°C]			
4.	Glimmtemperatur		290 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung		3			
6.	Fettbestimmung		3,3 [%]			

DOK-Nr.: 710

Produkt: Raps Extraktionsschrot

Meß- und Prüfergebnisse:

1.	Korngrößenverteilung Fraktion [μm]	<500	<250	<125	<63	<32
<hr/>						
	Kornanteil (Gew.-%)	42,2	18,6	9,1	5,2	4,3
2.	Feuchtigkeitsbestimmung Wassergehalt		8,2 [%]			
3.	Zündtemperatur		500 [°C]			
4.	Glimmtemperatur		410 [°C]			
5.	Brennbarkeit, Bewertung		2			
6.	Fettbestimmung		2 [%]			



Anlage A 3

Ergebnisse der Standarduntersuchungen aller Produkte

Produkt	Num.	Brenn- prüfung	Fettbe- stimmung	Reaktionstemperatur in °C		
				bei	Reaktoruntersuchung mit Probelagerung auf Metallsiebgewebe	
				WLV	mit 250 µm	32 µm Maschenweite
Weizen, unbehandelt	656	U2G2	1,80 %	k.R.	k.R.	
Weizenabrieb	657	U4G4	2,40 %	N160	nein ¹⁾	
Weizenmehl Typ 550	617	U2G2	2,00 %	N190	nein ²⁾	
Gerste (Braugerste), roh	630	U2G2	1,50 %	k.R.	k.R.	
Reinigungsstaub Gerste	628	U4G4	1,90 %	N180		k.R.
Raps	616	U5G5	34,00 %	k.R.	k.R.	
Raps behandelt Vollöl	629	U2G4/5	28,50 %	N140	B180	
Schwein 5282 ME Krümel	627	U2G2	7,60 %	N170	N200	
Hähnchen-Endmast 4321	631	U1G2	3,70 %	N170		N200
Tiermastprodukt 1360	632	U2G2	8,60 %	N170	B200	
Milchviehfutter	676	U2G3	3,30 %	N180	k.R.	
Raps Extraktionsschrot	710	U2G2	2,00 %	N180	N200	

Legende

U	=	Urmuster	G	=	Genormtes Muster
N	=	Glimmnest	B	=	Brand
k.R.	=	keine Reaktion	WLV	=	Warmlageruntersuchungen

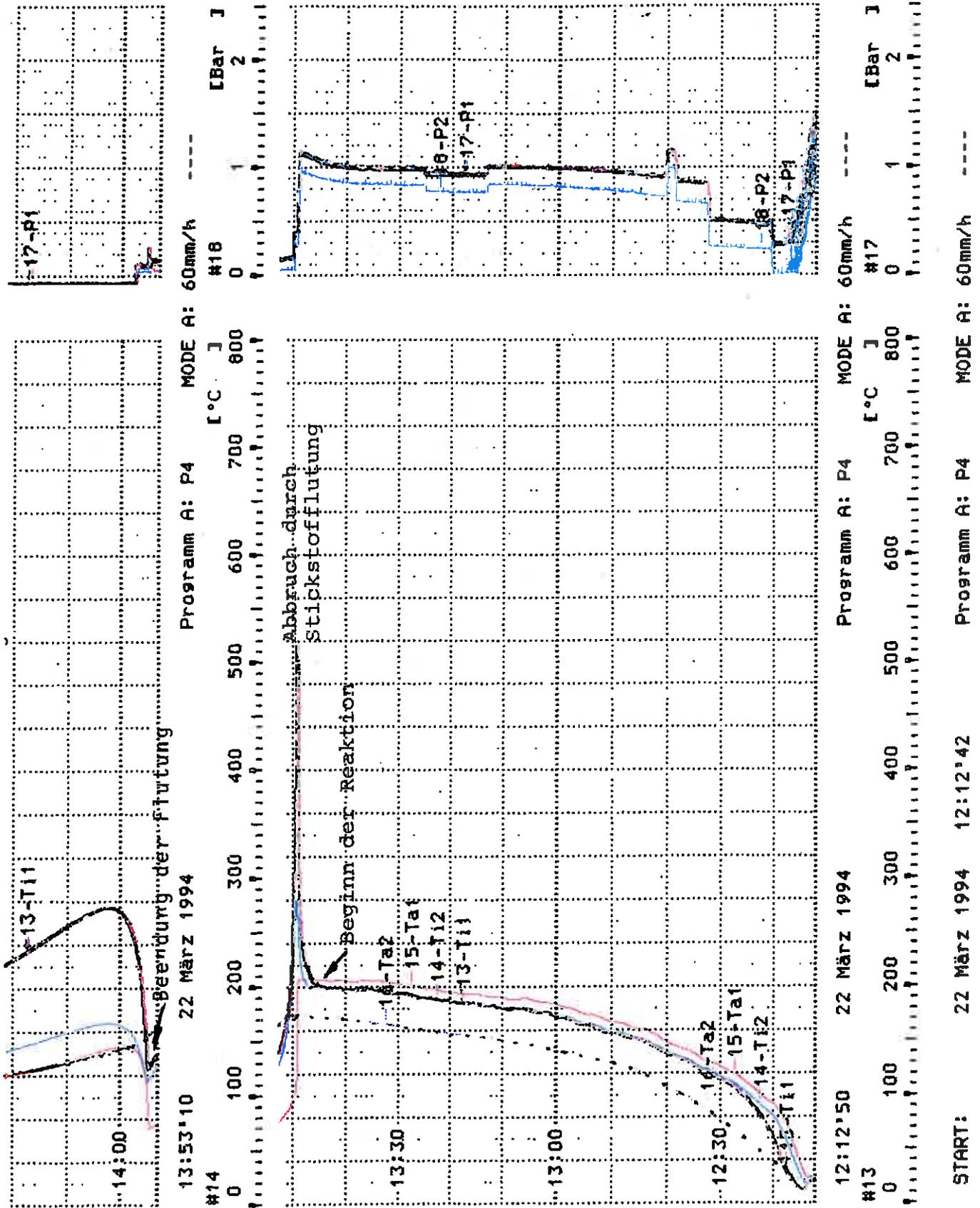
¹⁾ Keine Untersuchung, da die Probe zu feinteilig ist

²⁾ Keine Untersuchung, da die Reaktion erst über 200 °C zu erwarten war.



Anlage A 2

Pegelschrieb





Anlage A 3.1

Warmlagerversuche

Volumenabhängigkeit

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	Ofentemp. °C	Probe T _{max} °C	Induktionszeit h	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629	100	170	640	5 h 55'	Selbsterw. bei 150 °C
Raps behandelt Vollöl	629	400	140	552	14 h 55'	Selbsterw. bei 130 °C
Raps behandelt Vollöl	629	3 200	110	470	82 h 30'	



Anlage A 4

Ergebnisse der Reaktorversuche aller Produkte

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt Abb} °C	P _{reakt Abb} Bar	t _{reakt Probe} min	T _{1, Konst}	Flutung N	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	100	1	508	1,7	<1	<1	X	Brennen
Reinigungsstaub Gerste	628	400	200	100	1						
Hähnchen-Endmast	631	400	200	100	1	518	1,15	6	8	X	32 µm
Raps Extraktionsschrot	710	400	200	100	1	470	1,15	2	5	X	
Milchviehfutter Pallets	676	400	200	100	1						
Schwein 5282 ME Krümel	627	400	200	100	1	495	1,2	3	6	X	
Weizen ungereinigt	656	400	200	100	1						
Raps	616	400	200	100	1						
Rohgerste	630	400	200	100	1						
1360	632	400	200	100	1	575	2,05	<1	11	X	Brennen

*

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 5

Reaktorversuche 100 l/min., 0 - 1 Bar

Siebe: V 2 A, 250 µm

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T ₁ °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T ₁ Konst	Flutung N	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	100	1	508	1,7	< 1	< 1	X	Brennen
Raps behandelt Vollöl		400	180	100	0,75	690	2	< 1	< 1	X	Brennen
Raps behandelt Vollöl		400	170	100	0,5	430	0,55	8	< 1	X	
Raps behandelt Vollöl		400	190	100	0,25	455	0,3	7	< 1	X	
Raps behandelt Vollöl		400	170	100	0,0	490	0	21	< 1	X	Brennen

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 6

Reaktorversuche 50 - 150 l/min, 1 Bar

Siebe: V 2 A, 250 µm

Produkt	Nr.	Volumen cm³	T ₁ °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T _i Konst	Flutung N	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	150	1,0	700	2,4	6			Brennen Berstscheibe gebrochen Abbr. Versuche 150 l
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	100	1,0	508	1,7	< 1	< 1	X	Brennen
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	150	75	1	500	1,7	22	2 h	X	Brennen ODER Bei 160 °C Berst- scheibe gebrochen
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	130	50	1	515	1,2	49	5 h 46	X	Brennen ODER

Kleinere Strömungsgeschwindigkeit nicht möglich.

*

* Wert aus Liste A 3

Anlage A 7Reaktorversuche Pneumatikgewebe E 350 und E 800

Pneumatikgewebe oben

Siebe: V 2 A, 250 µm unten

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T ₁ °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt Abb} °C	P _{reakt Abb} Bar	t _{reakt Probe} min	T ₁ Konst	Flutung N	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	100	1	580	1,7	< 1	< 1	X	Brennen ODER = Siehe Kapitel 4.1.2
Raps behandelt Vollöl		400	160	100	1	490	1,5	14	28	X	Brennen ODER E 350
Raps behandelt Vollöl		400	170	100	1	./.	./.	8	< 1	X	Beginnender Brand ODER E 800 Ein für die Meßge- räte zu schneller Druckanstieg Berstscheibe gebrochen.

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 8

Reaktorversuche - Überströmen

**Pneumatikgewebe E 350 oben
Überströmversuche**

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T _i Konst	Flutung N	Bemerkung
Raps behandelt Vollöl	629 T	400	180	100	1	580	1,7	< 1	< 1	X	Brennen
		400	150	100	1	540	1,12	20'	< 1	X	Brennen
Brennen über Boden Probengefäß, kein Durchbrand nach oben.											

*

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 9

Reaktorkontrollversuche 100 l/min, 0,0 Bar

Siebe V 2 A, 250 µm

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P _i gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T _i Konst	Flutung N	Bemerkung
Schwein ME Krümel	627	400	200	100	1	495	1,2	3	6	X	
Schwein ME Krümel	627	400	180	100	0,0	/.	/.	/.	/.	/.	

Abgebrochen, da 180 °C erst nach Stunden erreicht wird.

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 10

Reaktorkontrollversuche 100 l/min., 0,5 Bar

Siebe V 2 A, 250 µm

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T _i Konst	Flutung N	Bemerkung
Schwein ME Krümel	627	400	200	100	0,5	/.	/.	/.	/.	/.	
Höchste erreichbare Temperatur 196 °C. Versuche abgebrochen											



Anlage A 11

Reaktorkontrollversuche 1 Bar, 50 l/min

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P _i gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T _i Konst	Flutung N	Bemerkung
Schwein ME Krümel	627	400	180	50	1,0	/.	/.	/.	/.	/.	
Abgebrochen, da höhere Temperaturen wie 140 °C bei dieser Einstellung nicht möglich.											

* Wert aus Liste A 3



Anlage A 12

Reaktoryersuche - Überströmen

Pneumatikgewebe E 350 oben
Überströmversuche

Produkt	Nr.	Volumen cm ³	T _i °C	S ₂ unkorr. l/min	P ₁ gegen Bar	T _{reakt} Abb °C	P _{reakt} Abb Bar	t _{reakt} Probe min	T ₁ Konst	Flutung N	Bemerkung
Schwein ME Krümel	627	400	190	100	1	352	188	25	< 1	x	brennen

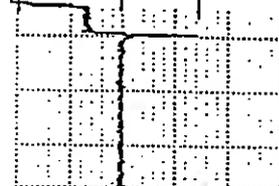
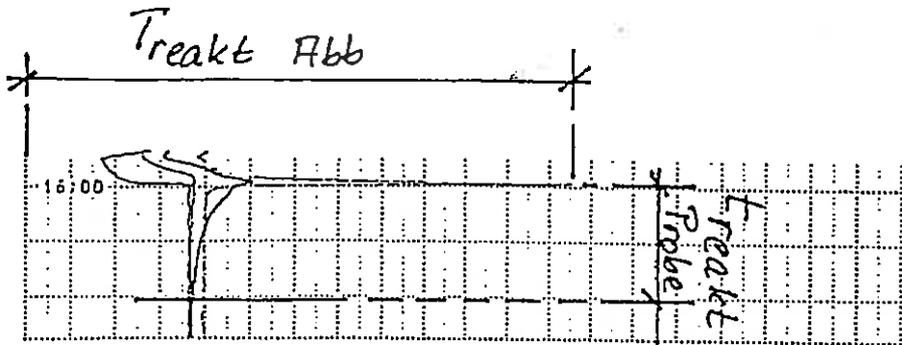
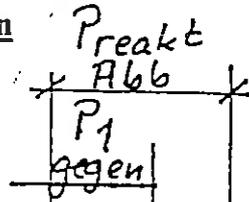
*

* Wert aus Liste A 3

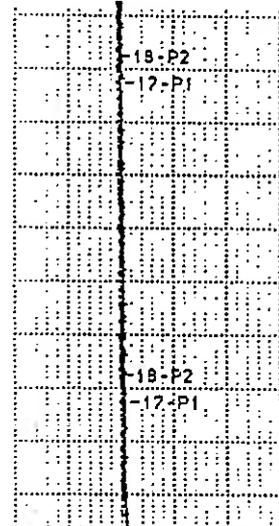
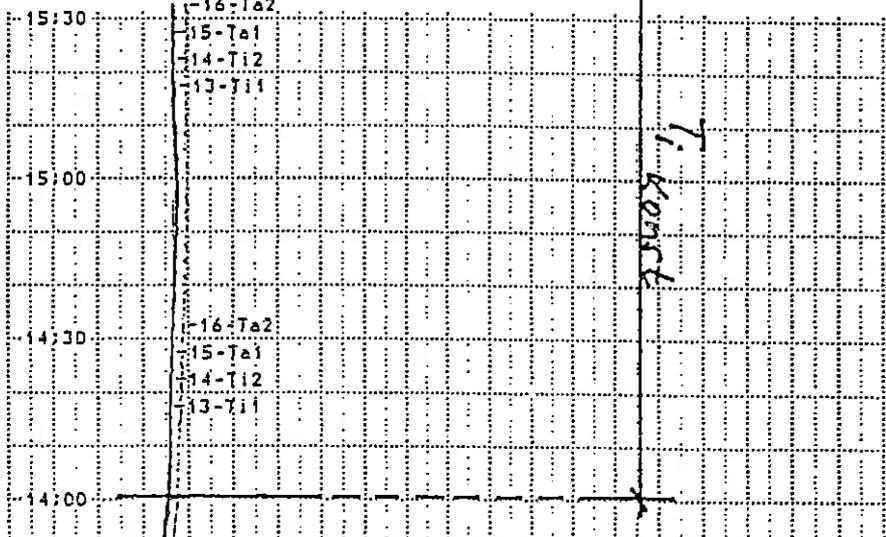


Anlage A 13

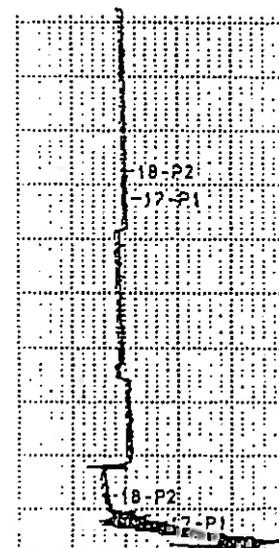
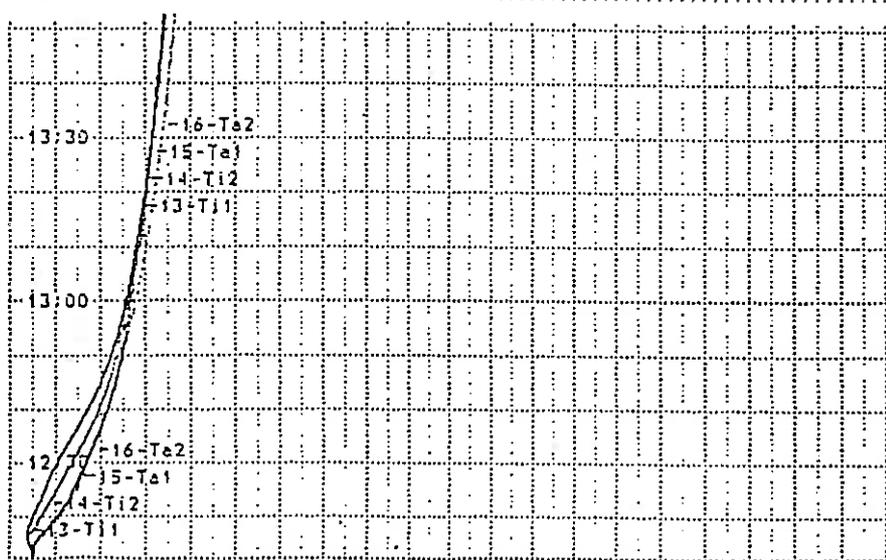
Pegelschrieb mit Liste der Abkürzungen



15:32:48 3 Nov. 1994 Programm A: P4 MODE A: 60mm/h
 #15 0 100 200 300 400 500 600 700 800 [°C] #17 0 1 [Bar] 2



13:52:31 3 Nov. 1994 Programm A: P4 MODE A: 60mm/h
 #14 0 100 200 300 400 500 600 700 800 [°C] #18 0 1 [Bar] 2



12:12:11 3 Nov. 1994 Programm A: P4 MODE A: 60mm/h
 #13 0 100 200 300 400 500 600 700 800 [°C] #17 0 1 [Bar] 2



Liste der verwendeten Abkürzungen

- T_i** Die im Mittelpunkt der Probe gemessene Temperatur. Sie entspricht der Versuchstemperatur.
- S₂ unkorrt** Die an einem Strömungsmesser gemessene Luftmenge der erwärmten Luft, die durch die Probe geleitet wird. Die Luftmenge ist nicht korrigiert.
- P_i gegen** Der im Reaktor herrschende Gegendruck.
- T_{reakt}
Abb** Die höchste an 2 Meßstellen in der Probe (und an einer Stelle über der Probe - bei der mit ODER bezeichneten Versuche) gemessenen Temperatur zum Zeitpunkt des automatischen Versuchsabbruches.
- P_{reakt}
Abb** Die höchste von je einer Meßstelle über und unter der Probe gemessene Druckspitze zum Zeitpunkt des automatischen Versuchsabbruches.
- t_{reakt}
Probe** Die Zeit zwischen dem sich Erhöhen der Probentemperatur gegenüber der Versuchstemperatur und dem automatischen Versuchsabbruch (siehe Bild).
- T_i
konst** Die Zeit, in der die Probentemperatur die Ofentemperatur erreicht hat und hält und dem Zeitpunkt des Beginn der T_{reakt} Probe (siehe Bild).
- Flutung
N** Zeigt an, ob der Versuch durch automatische Stickstofflutung beendet wurde.
- ODER** Die Versuche werden automatisch beendet, wenn T_i > 4120 °C ist.
Die mit ODER bezeichneten Versuche werden automatisch beendet, wenn
- T_i > 420 °C ist
 - oder
 - die Flammentemperatur des brennenden Produktes >420 °C ist.