

**Forschungsgesellschaft
für angewandte
Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin**



**Brandfrüherkennung bei der
Getreidetrocknung durch
CO-Detektion**

F 05-0803

Abschlussbericht
Mannheim, Februar 2011

Projekt Nr. F 05-0803

**Brandfrüherkennung bei der Getreidetrocknung durch
CO-Detektion**

Clemens Zockoll
Diplom-Ingenieur

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit
und Arbeitsmedizin

Sigurd Kleinhans
Elektro-Techniker

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe
Geschäftsbereich Prävention, Zentrallabor

Mannheim, Februar 2011

Danksagung

Unser Dank gilt

- Herrn Torge Brüning als Vertreter des Auftraggebers, der R+V Versicherung für seine tatkräftige Unterstützung bei den Messungen der CO Belastung und Leckortung von Getreidetrocknern sowie bei der Untersuchung von Schadensfällen.
- den Kollegen des BGN Labors in Mannheim und der BGN Versuchsstelle in Kappelrodeck (Schwarzwald), mit deren Hilfe die Versuchsdurchführungen reibungslos und routiniert abgewickelt werden konnten.
- Frau Madlen Schoenherr und Herrn Peter Schepp für die Unterstützung bei den Versuchsdurchführungen im Labormaßstab
- Herrn Wendelin Fischer für die mechanischen Arbeiten
- Herrn Thomas Kästner für die Bereitstellung der Messgaskühlung
- Herrn Markus Roth für die Unterstützung bei den Messungen an den Trocknern.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1. **Veranlassung**
2. **Problemstellung**
3. **Ablauf des Projektes**
4. **CO-Entwicklung bei Warmlagerversuchen**
 - 4.1 Versuche im Wärmeschrank
 - 4.2 Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung
 - 4.2.1 Einfahren der Versuchseinrichtung mit dem Produkt Mais und Messergebnisse
 - 4.2.2 Diskussion der Ergebnisse
 - 4.3 CO-Emission von Raps
 - 4.4 CO-Emission von Weizen
5. **Versuche über eine CO-Belastung beim Betrieb bestehende Durchlauf-trockner für Getreide (Dächerschachttrockner)**
 - 5.1 Grundsätzliches zum Aufbau der Trockner
 - 5.2 Versuche an einer Anlage im Saugbetrieb während der Trocknung von Raps
 - 5.2.1 Versuchsaufbau
 - 5.2.2 Messergebnisse
 - 5.2.3 Diskussion der Ergebnisse
 - 5.3 Versuche an einer Anlage im Druckbetrieb während der Trocknung von Mais
 - 5.3.1 Versuchsaufbau
 - 5.3.2 Messergebnisse
 - 5.3.3 Diskussion der Ergebnisse
6. **Ein Schadensfall aus der Praxis**
7. **Grundsätzliche Unterschiede bei der Entwicklung von Glimmnestern durch Warmlagerung und beim Betrieb von Dächerschachttrocknern**
8. **Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung**
 - 8.1 Einfahren der Versuchseinrichtung mit dem Produkt Mais und Messergebnisse
 - 8.2 Diskussion der Ergebnisse
9. **Versuche mit Mais zur Identifikation weiterer flüchtiger Stoffe**
10. **Möglichkeiten des Einsatzes der CO-Detektion in Dächerschachttrocknern**

Literaturverzeichnis

Anhang

Zusammenfassung

Bei der Getreidetrocknung in Dächerschachttrocknern kommt es immer wieder zu Brandereignissen, die mit den vorhandenen Sicherheitseinrichtungen nicht früh genug erkannt werden. Auf Wunsch der R+V Versicherung sollte überprüft werden, ob das von der FSA entwickelte auf CO-Detektion basierende Brandfrüherkennungssystem für Sprühtrocknungsanlagen auch für die Verbesserung der Brandfrüherkennung in Dächerschachttrocknern geeignet ist.

Es werden Versuche mit Mais, Weizen und Raps beschrieben, die in einer neu entwickelten Prüfapparatur durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die beim Selbstentzündungsprozess entstehende CO-Menge bei Mais und Weizen grundsätzlich eine Detektion gestattet. Bei Raps kann eine CO-Detektion erst dann wirksam werden, wenn größere Produktmengen betroffen sind.

Um Aussagen über eine eventuelle CO-Vorbelastung durch das Trocknungsverfahren in Dächerschachttrocknern machen zu können, werden die Ergebnisse von Messungen an zwei unterschiedlichen Trocknern (Anlage mit indirekter Ölheizung und Saugbetrieb; Anlage mit direkter Gasheizung und Druckbetrieb) dargestellt.

An einem aufgetretenen Schadensfall wird gezeigt, dass der Abbrand von Mais in einem Dächerschachttrockner anders abläuft als bei den Warmlagerversuchen im Labor. Um die Unterschiede beschreiben zu können, wurde eine Versuchseinrichtung gebaut, die die Verhältnisse in einem Dächerschachttrockner näherungsweise nachbildet. Gegenüber den Warmlagerversuchen ergibt dieser Versuch einen erheblich schnelleren Reaktionsablauf mit stark erhöhter Temperatur- und CO-Entwicklung.

Auf die grundsätzlichen Unterschiede bei der Entwicklung von Glimmnestern durch Warmlagerung und beim Betrieb von Dächerschachttrocknern wird eingegangen.

Durch Analyse der bei der Selbstentzündung von Mais auftretenden flüchtigen Stoffe wird nachgewiesen, dass CO der dominierende Stoff ist.

Abschließend werden die Möglichkeiten des Einsatzes der CO-Detektion in Dächerschachttrocknern diskutiert.

1. Veranlassung

Die R+V Allgemeine Versicherung AG, vertreten durch Herrn Dipl.-Ing. Torge Brüning, hat sich an die FSA e.V. gewandt, um Unterstützung bei der Verbesserung der Brandfrüherkennung in Getreidetrocknern – Durchlauftrocknern (Kaskaden- bzw. Dächerschachttrocknern) – zu erhalten.

Aufgebaut werden sollte dabei auf der erfolgreichen Zusammenarbeit in den 90iger Jahren, als das von der FSA entwickelte, auf der CO-Kohlenmonoxid-Detektion basierende Brandfrüherkennungssystem für Sprühtrocknungsanlagen der Milchindustrie in einem Langzeitversuch seine Praxistauglichkeit nachweisen konnte. Der damals gemeinsam festgelegte Standard hat inzwischen weltweit zur Verringerung der Schadensfälle in Sprühtrocknungsanlagen geführt.

2. Problemstellung

Zur Brandfrüherkennung in Durchlauftrocknern werden zurzeit Temperaturmesssysteme eingesetzt. Wie die Schadensfälle zeigen, sind diese Systeme häufig nicht in der Lage, ein Brandereignis so früh zu erkennen, dass das Bedienungspersonal noch erfolgreich eingreifen kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die geschlossene Bauweise der Trockner dem Bedienungspersonal und der alarmierten Feuerwehr oft nur begrenzte Möglichkeiten gibt, schnell an den Brandherd zu gelangen. Totalverluste der Getreidetrockner sind deshalb in den meisten Fällen die Folge.

Könnte ein Brandereignis über eine CO-Detektion so früh erkannt werden, dass sich der Getreidetrockner noch in einen sicheren Zustand bringen ließe, z. B. durch Abstellen der Trocknungsluft und Ausfahren des glimmenden Produktes aus dem Trockner, würde das Sicherheitsniveau wesentlich angehoben.

3. Ablauf des Projektes

Auf dem Weg zu einer wirksamen Brandfrüherkennung durch CO-Detektion mussten insbesondere folgende Fragen beantwortet werden:

Welche CO-Entwicklung tritt bei der Entstehung von Glimmnestern aus Getreide (Mais, Weizen) auf?

Der Schwerpunkt wurde dabei auf Mais gelegt. Bei der Maistrocknung treten die meisten Schadensfälle auf; außerdem werden bei diesem Produkt die höchsten Trocknungstemperaturen eingesetzt. Weiter sollten noch Aussagen zu der Ölsaat Raps gemacht werden.

Mit welcher Grundlast an CO muss man ggf. bei den in der Praxis verwendeten Trocknungsverfahren rechnen (indirekte Feuerung, z. B. mit Öl, direkte Feuerungen mit Gas)?

Wie beeinflusst das Trocknungsverfahren – bei dem das Produkt mit aufgeheizter Luft durchströmt wird – die Glimmnestentwicklung und das Abbrandverhalten des Produktes?

Lassen sich in der Phase vor dem Ausbruch des Brandes in der Abluft noch andere Indikatoren, z. B. Kohlenwasserstoffe, finden, die sich ggf. in Verbindung mit CO zum Aufbau eines Brandfrüherkennungssystems eignen würden, z. B. eines Systems aus Halbleitersensoren?

Diese Untersuchungen sollten an Mais nur durchgeführt werden, wenn sich abzeichnet, dass eine CO-Detektion in der bisherigen Ausführung für den Einsatz nicht sinnvoll erscheint.

4. CO-Entwicklung bei Warmlagerversuchen

Mit Warmlagerversuchen wird die Selbstentzündungstemperatur von Produktproben bestimmt. Dazu wird die Produktprobe, die sich in einem Drahtkorb befindet, im Wärmeschrank einer bestimmten Temperatur ausgesetzt. Führt die Temperatur des Wärmeschranks in der Produktprobe zu einer sich selbst tragenden Erhitzung des Produktes und steigt diese Temperatur über 400 °C, dann spricht man von einer Selbstentzündung. Um die Zahl der aufwändigen Versuche zu reduzieren, werden – entsprechend VDI 2263 Blatt 1 – die Versuche in Temperaturschritten von 10 °K gefahren. Erfolgt z. B. eine Selbstentzündung bei 190 °C, und bei dem Versuch mit 180 °C kommt es nicht zur Selbstentzündung, dann liegt die tatsächliche Selbstentzündung zwischen 180 °C und 190 °C. Aus Sicherheitsgründen wird dann die Temperatur, bei der keine Selbstentzündung erfolgte, als Selbstentzündungstemperatur angenommen. Diese Selbstentzündungstemperatur ist volumenabhängig. Größere

Volumen weisen eine niedrigere Selbstentzündungstemperatur auf. Bevor es bei organischen Produkten, z. B. Getreide, zur Selbstentzündung kommt, entwickeln sich Schwelgase, die u. a. auch Kohlenmonoxid enthalten.

4.1 Versuche im Wärmeschrank

Um einen Eindruck von den CO-Emissionen bei Warmlagerversuchen zu bekommen, hat man in der Vergangenheit schon wiederholt ein CO-Messgerät bei der Ermittlung von Selbstentzündungstemperaturen mitlaufen lassen.

Dazu wurde während des gesamten Erwärmungs- und Selbstentzündungsprozesses mit einem CO-Messgerät (Binos 100, Fa. Rosemount) Gas aus der Abluft des Wärmeschrankes (Fa. Binder, FED 53) abgesaugt, über ein Filtersystem geführt und der CO-Gehalt gemessen. Diese Messungen gestatten aber nur eine qualitative Aussage. Die zu Warmlagerversuchen eingesetzten Wärmeschränke sind nicht gasdicht gebaut. Zur gleichmäßigen Verteilung der heißen Luft im Innern des Schrankes benötigen sie eine Luftumwälzung. Luftwechsel bis zu 32 x/h treten bei den Warmlagerversuchen in dem Wärmeschrank auf.

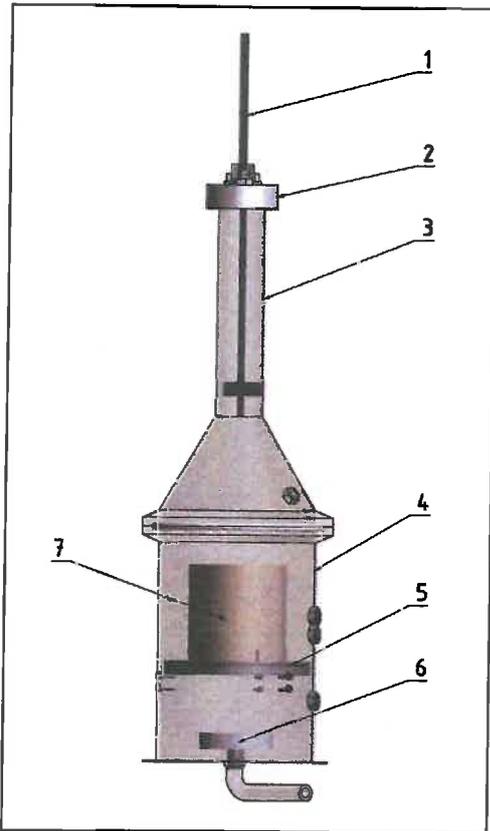
Durch Versuche, bei denen Prüfgas mit 1 Vol.% CO in unterschiedlichen Mengen (1l/min bis 12 l/min) unter verschiedenen Betriebsbedingungen zugeführt wurde, (Luftumwälzventilatoreinstellung wie beim Warmlagerversuch, Luftumwälzventilator ausgeschaltet), konnte nachgewiesen werden, dass die Messwerte nicht mit den zu erwartenden CO-Konzentrationen übereinstimmten. Insbesondere die Undichtigkeit des Wärmeschrankes und der Einfluss des Umwälzventilators wirken sich auf den Messwert aus und führen zu falschen Ergebnissen.

Um eine Aussage über das Entzündungsverhalten von Mais machen zu können, wurde zuerst ein klassischer Warmlagerversuch (ohne CO-Messung) mit 400 cm³ im Wärmeschrank gemacht. Der Versuch diente gleichzeitig als Referenzversuch für die neu zu entwickelnde Apparatur.

4.2 Entwicklung einer neuen Versuchsanlage

Gasdichte Wärmeschränke sind nur als Sonderanfertigung zu bekommen. Je nach Hersteller und Ausstattung sollten sie zwischen 8.000 und 15.000 € kosten. Deshalb wurde eine eigene Versuchseinrichtung konstruiert, die in den bestehenden Wärme-

schrank eingebaut werden kann, sodass die bei Warmlagerversuchen mit 400 cm^3 entstehenden Brandgase ohne die bisherigen Beeinflussungen gemessen werden können.



- 1 Messgassonde
- 2 Kondensatbehälter
- 3 Oberteil mit Flansch
- 4 Unterteil mit Flansch
- 5 Halter für Probenbehälter
- 6 Luftverteiler
- 7 Probenbehälter (400 cm^3)

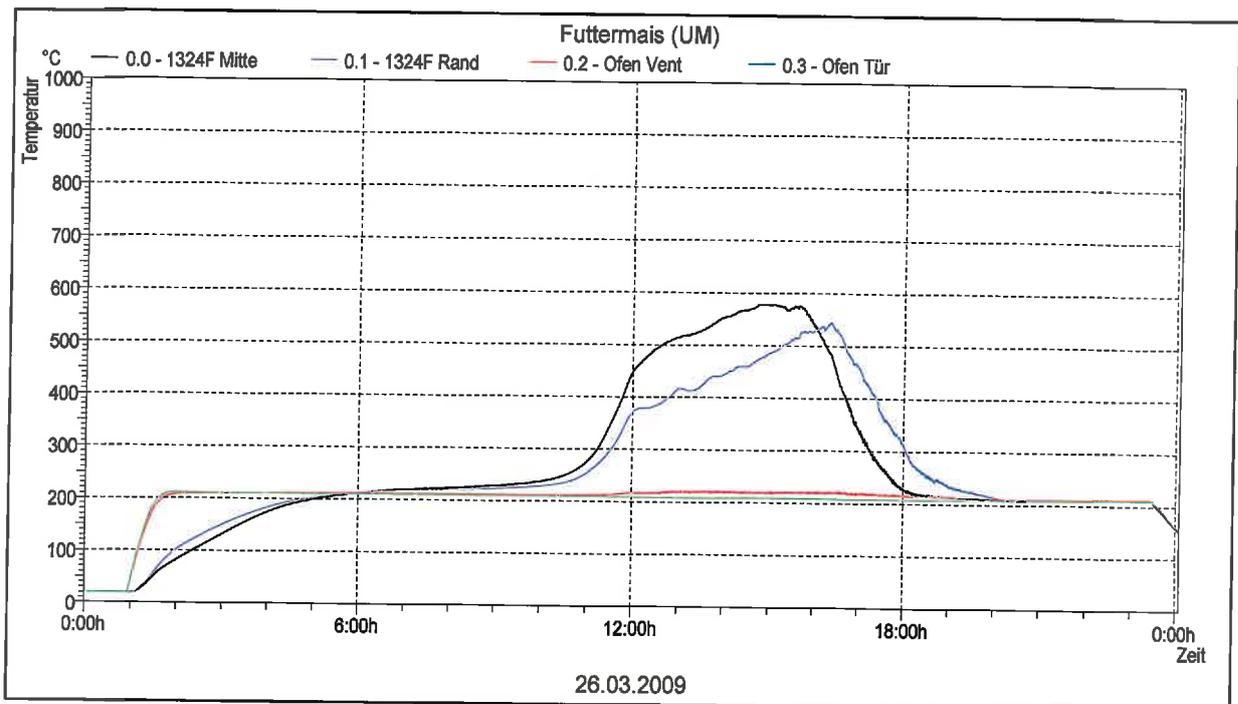
Bild 1 Versuchsbehälter



Bild 2 Im Wärmeschrank eingebauter Versuchsbehälter

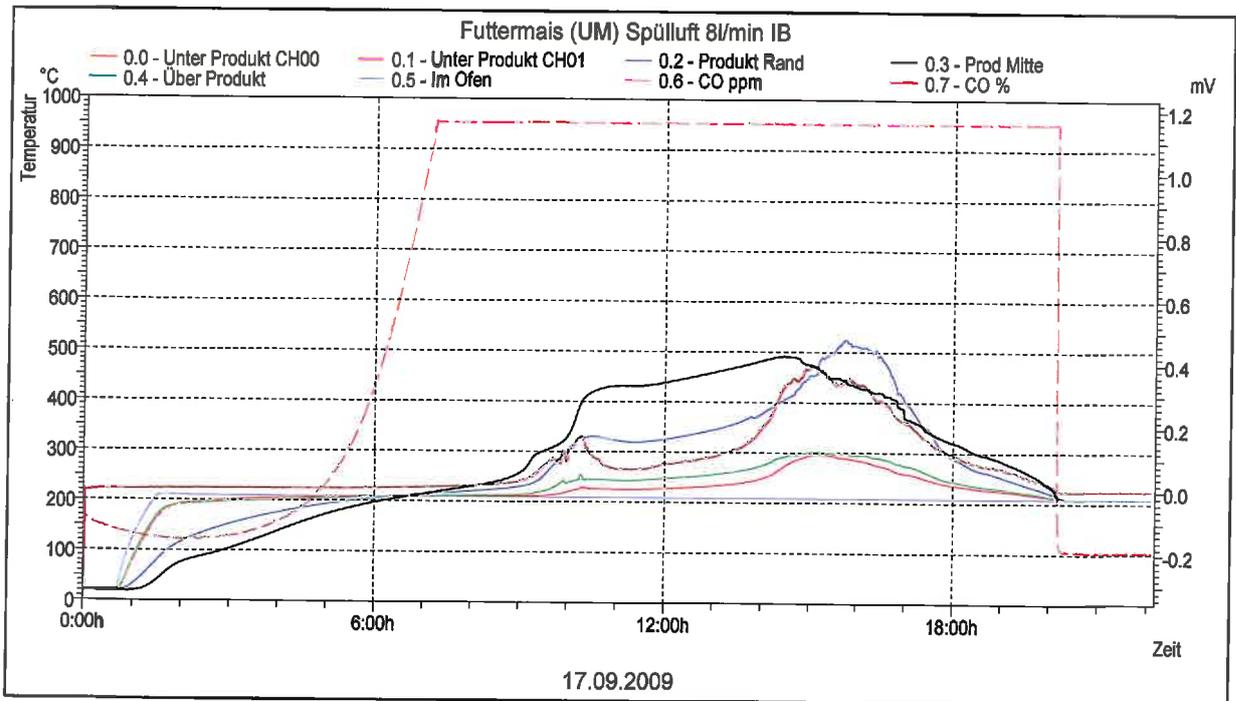
4.2.1 Einfahren der Versuchseinrichtung mit dem Produkt Mais und Messergebnisse

Bei vergleichenden Warmlagerversuchen mit dem Wärmeschrank zeigte sich, dass die Versuche zu dem gleichen Ergebnis kamen. In der neu entwickelten Apparatur wie auch im Wärmeschrank kam es bei 210 °C zur Selbstentzündung der Maisprobe und bei 200 °C zu keiner Selbstentzündung. Lediglich die Aufheizzeit des Produktes auf Ofentemperatur verlängerte sich bei der neuen Versuchseinrichtung (Innenbehälter im Wärmeschrank, z. B. bei dem Versuch mit 210 °C von ca. 5 h auf ca. 6 h).



Temperaturverlauf bei dem Versuch mit 210 °C im Wärmeschrank

Erläuterungen zu den Messpositionen und Farben bei den Laborversuchen s. Anhang



Temperaturverlauf bei der neuen Versuchsanlage (Innenbehälter) bei 210 °C mit CO-Messung

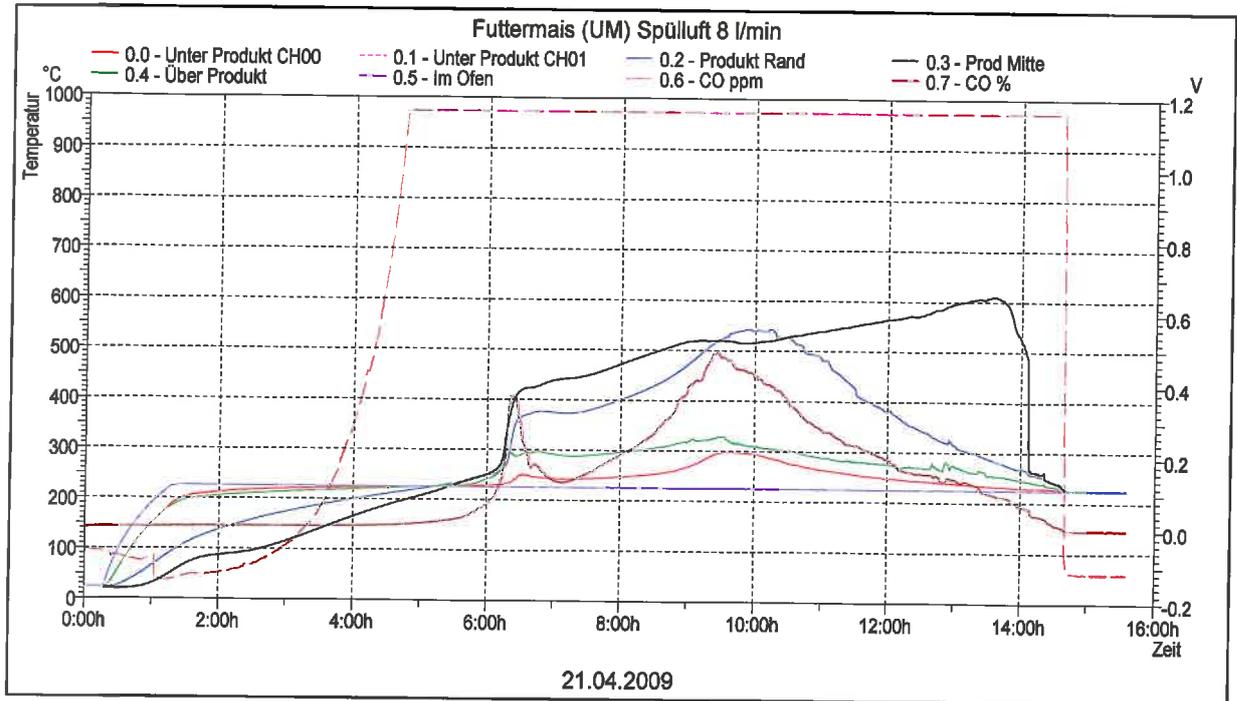
Aus früheren Versuchen mit Mais ist bekannt, dass die bei Warmlagerversuchen gefundenen Selbstentzündungstemperaturen Unterschiede aufweisen können. Dies ist auch zu erwarten, da die Zusammensetzung der Festbestandteile der Getreide von Parametern wie Sorte, Anbaubedingungen und Wetterverhältnissen abhängig ist. Nach den bisherigen Versuchen gingen die Maisvorräte langsam zu Ende und man hätte auf eine neue Probe umstellen müssen. Zur Sicherstellung eines Selbstentzündungsprozesses wurde deshalb die Aufheizphase auf 225 °C erhöht.

Mit dieser Temperatur wurden die CO-Emissionen von Mais (400 cm³) unter Variation des Zuluftstroms (2, 5, 8, 10, 20 l/min) ermittelt. Bei einem Luftstrom von 8 l/min – gemessen über den Zeitraum der CO-Emission – trat der höchste Durchschnittswert an CO auf. Die Maximalwerte für die CO-Emission lagen im Bereich der Versuche mit den höheren Luftgeschwindigkeiten.

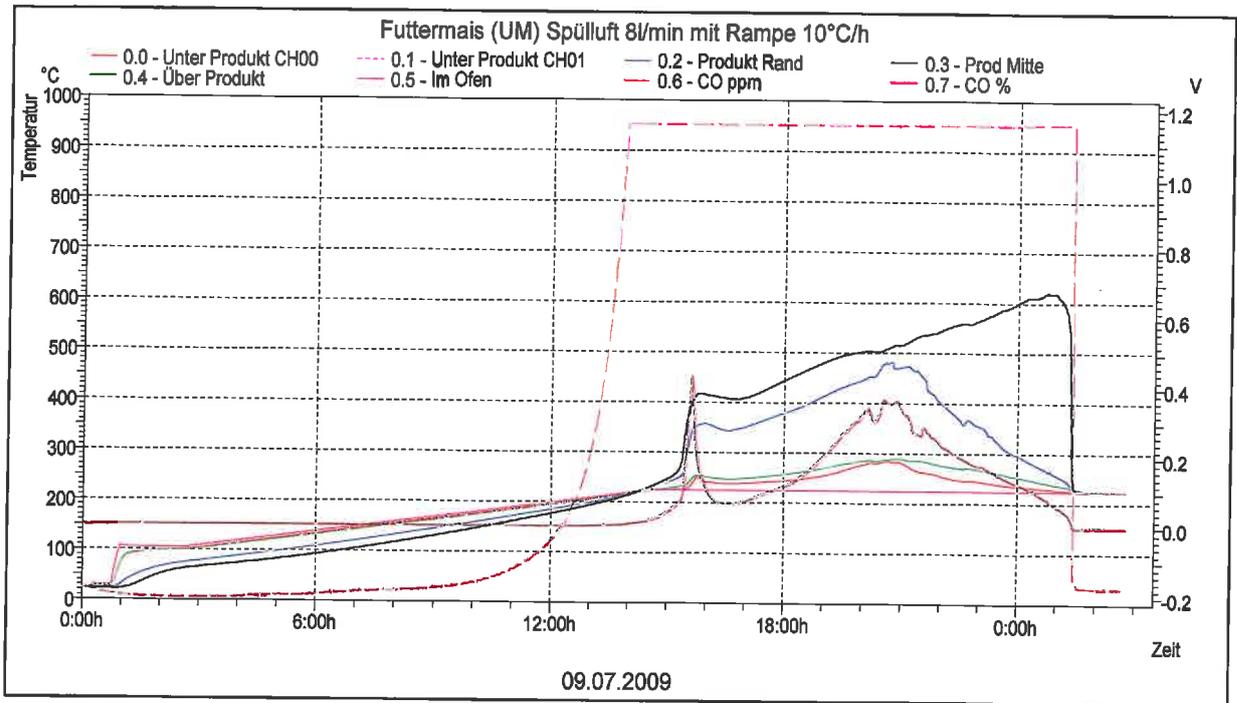
Im nächsten Schritt sollte der für die Warmlagerversuche notwendige Versuchsaufwand – mehrere Langzeitversuche bei unterschiedlichen Temperaturen – für die Aussagen über die CO-Emissionen reduziert werden. In einem ersten Schritt wurde die Temperatur des Wärmeschrankes (Ofen) auf 105 °C (Temperatur der Staubprobentrocknung nach Kühner) eingestellt. Dann wurde die Temperatur über eine Rampe (10 °C/h) bis auf den Maximalwert von 225 °C erhöht und anschließend auf diesem Temperaturniveau gehalten.

4.2.2 Diskussion der Ergebnisse

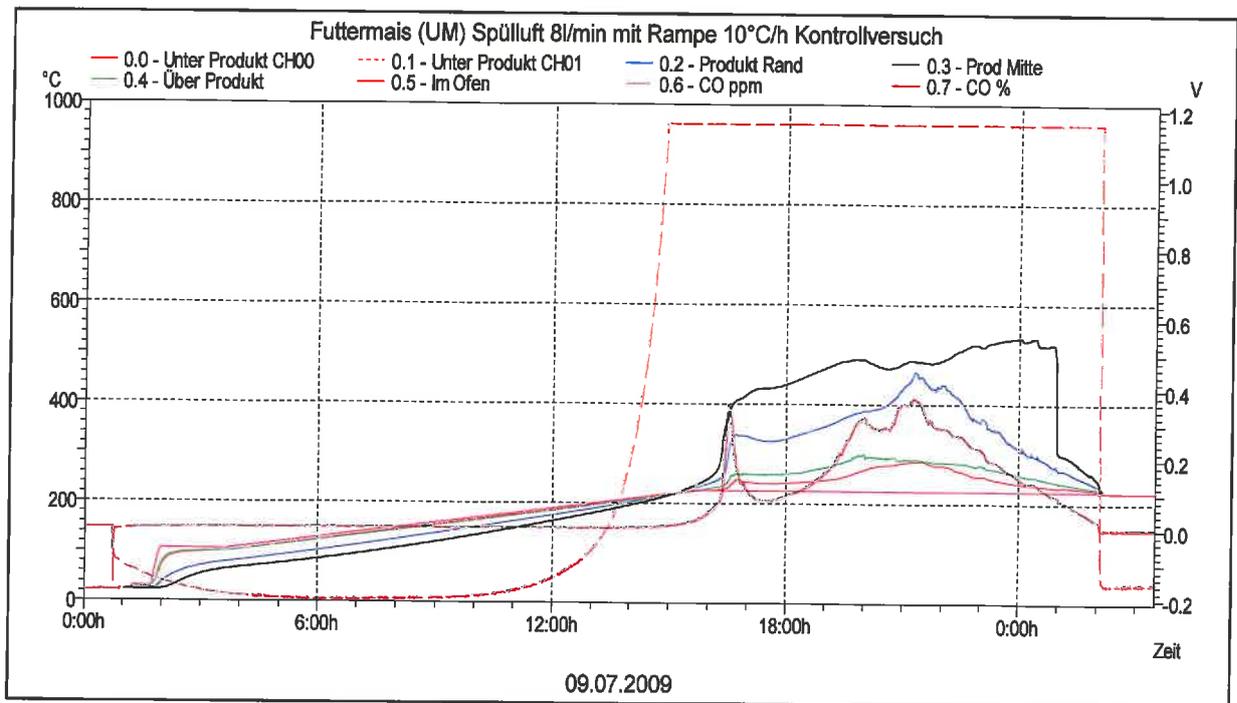
Ziel der Versuche ist es, Aussagen über die zu erwartenden CO-Emissionen bei der Selbstentzündung von Mais zu erlangen (s. die folgenden 3 Messchriebe).



CO-Messung mit Mais im Innenbehälter – Spülluft 8 l/min



CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C)



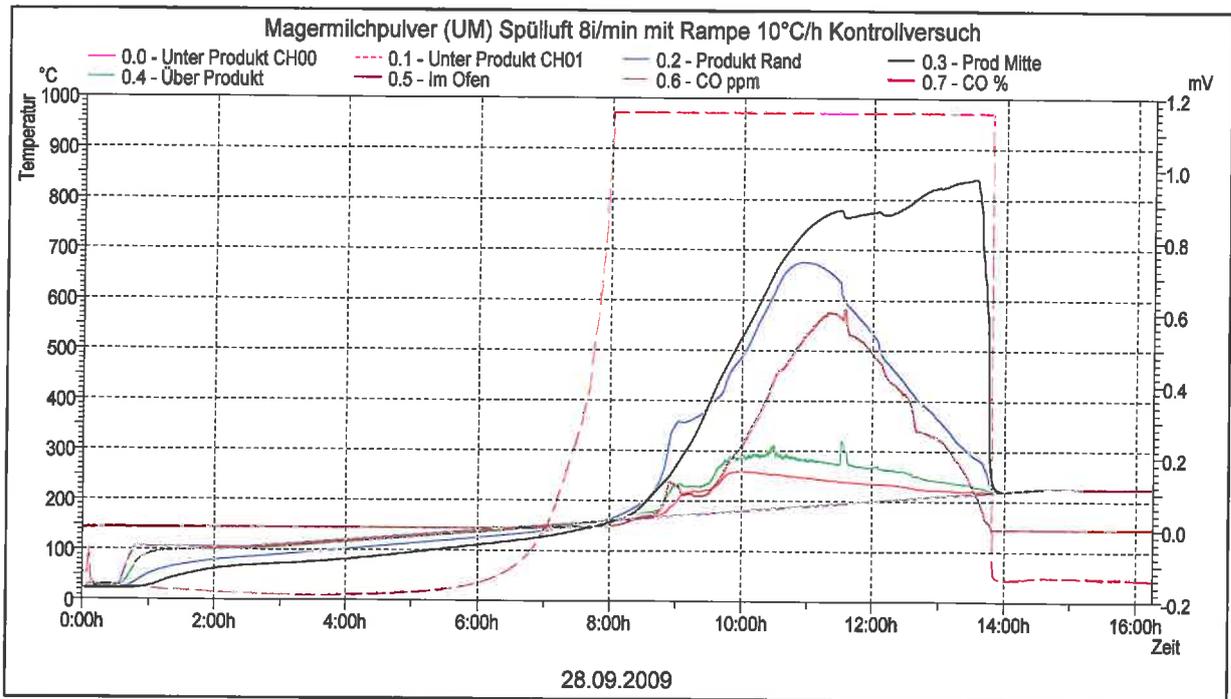
CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C)

Ein Vergleich der Messkurven der Versuche mit 8 l/min im Warmlagerversuch und den Versuchen mit der Rampe zeigen beim ersten Anstieg eine gute Übereinstimmung zwischen der CO-Entwicklung und den in der Produktmitte gemessenen Temperaturen. Beim zweiten Anstieg wird die CO-Entwicklung offensichtlich stärker von dem Anstieg der Produkttemperatur im Randbereich der Probe getragen. In beiden Messkurven liegen diese Temperaturen etwas niedriger als beim Warmlagerversuch.

Unter Berücksichtigung der jeweils niedrigsten Werte für die CO-Entwicklung vom ersten und zweiten Maximum soll die zu erwartende CO-Emission in l/min abgeleitet werden. Der niedrigste Wert vom ersten Maximum liegt bei 0,37 Volt. Der Messbereich des Messgerätes beträgt 6 Vol%, was einer Anzeige von 1 Volt entspricht. 0,37 Volt ergeben einen Wert von 2,22 Vol%. In die Versuchsanlage werden 8 l/min. eingebracht, was zu einer entsprechenden Verdünnung der Abluft und zur Reduzierung des CO-Wertes führt. Vom Produkt werden unter den gegebenen Temperaturen und Versuchsbedingungen beim ersten Maximum 0,178 l CO/min erzeugt und beim zweiten Maximum – mit einer Anzeige von 0,39 Volt – 0,187 l CO/min. Bei der Rechnung wird davon ausgegangen, dass sowohl die eingebrachte Luft als auch das abgesaugte Gas-Luft-Gemisch bei der Analyse im Messgerät in etwa die gleiche Temperatur (Raumlufttemperatur) aufweisen.

Zum Vergleich sei auf einen orientierenden Versuch mit Magermilch hingewiesen, der unter den gleichen Versuchsbedingungen stattfand. Im Gegensatz zu Mais beginnt der Selbstentzündungsprozess des Magermilchpulvers schon bei ca. 160 °C. Die Weiterführung der Aufheizung über den Bereich der Selbstentzündung hinaus dürfte die Reaktion beschleunigen und zumindest einen Einfluss auf die Ausbildung des ersten Maximums haben.

Der Maximalwert für CO beträgt bei diesem Versuch 0,62 Volt; dies entspricht 0,298 l CO/min.



CO-Messung mit Magermilch im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C)

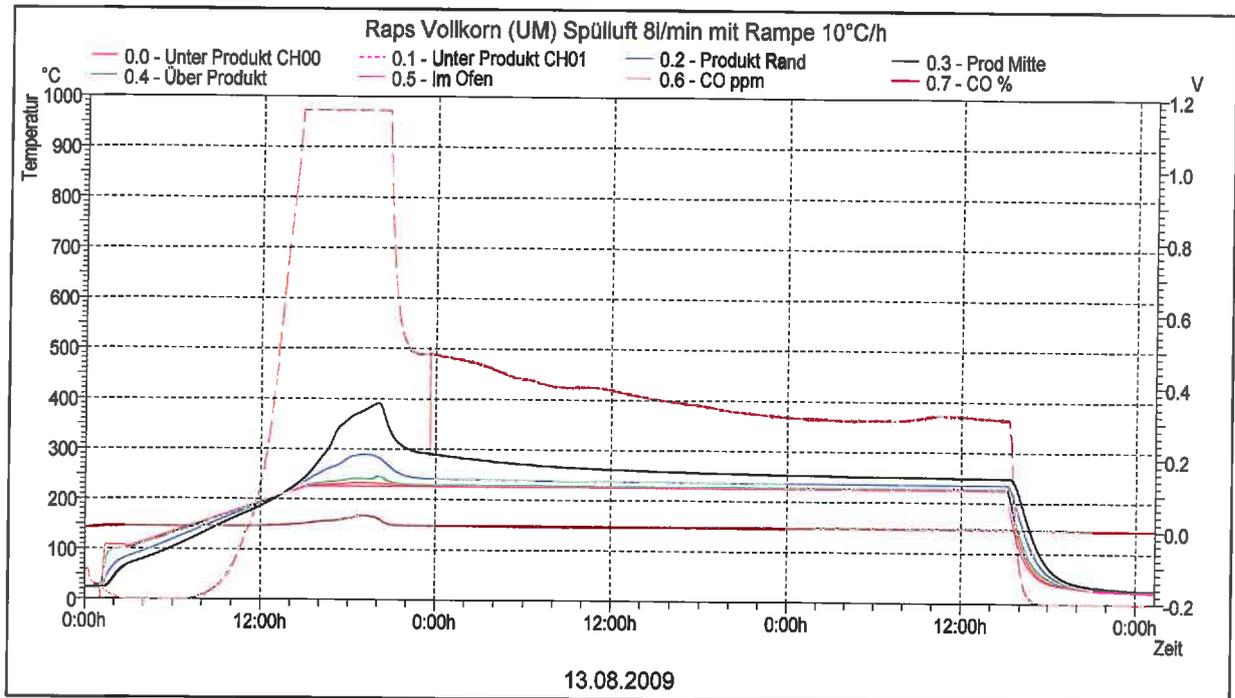
Eine Detektion von Mais-Glimmnestern in Getreidetrocknern ist nach diesen Ergebnissen mit der CO-Detektion grundsätzlich möglich. Gegenüber der schon früher untersuchten Magermilch müssen diese Glimmnester aber größer sein, um die gleiche CO-Emission zu erreichen.

4.3 CO-Emissionen von Raps

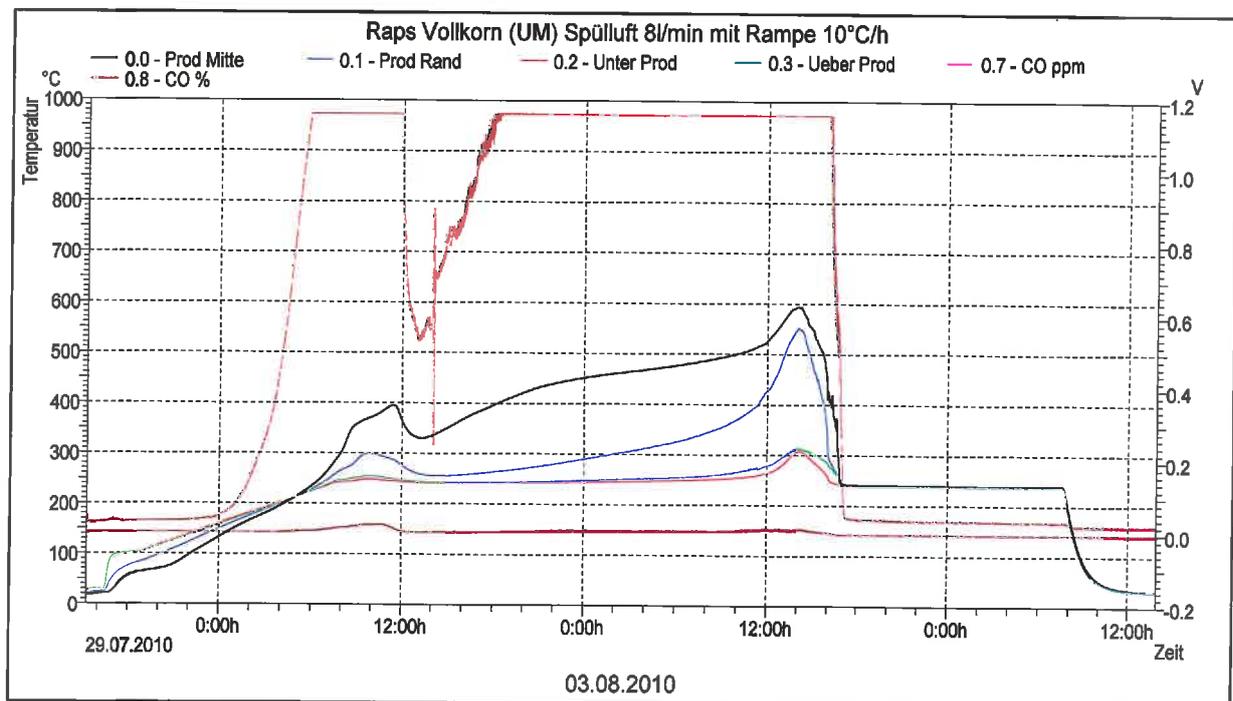
Die unter den bisherigen Bedingungen durchgeführten Versuche (8l/min Spülluft, Rampe ab 105 °C mit 10°C/h bis 225 °C) ergaben bei Raps nur eine geringe CO-Emission. Der sehr langsam anlaufende Selbsterhitzungsprozess erreichte zwar einen Maximalwert von 390 °C, die CO-Messung führte aber nur zu einem Spitzenwert von 0,04 Vol% (0,019 l CO/min). Nach diesem Ergebnis erfolgten zwei weitere Versuche mit Endtemperaturen der Rampe von 235 °C und 245 °C bei ansonsten gleichbleibenden Versuchsbedingungen.

Eine wesentliche Änderung der CO-Emission trat auch bei diesen Versuchen nicht auf (Höchstwerte von 0,01 l CO/min bei 235 °C und 0,029 l CO/min bei 245 °C), obwohl die Maximaltemperaturen im Produkt etwa die gleiche Höhe wie beim Mais aufwiesen. Auch der Beginn des Erhitzungsprozesses, bei dem die Temperatur in der Produktmitte die Ofentemperatur überschreitet, setzt bei beiden Produkten in dem gleichen Temperaturbereich ein (ca. 220 °C).

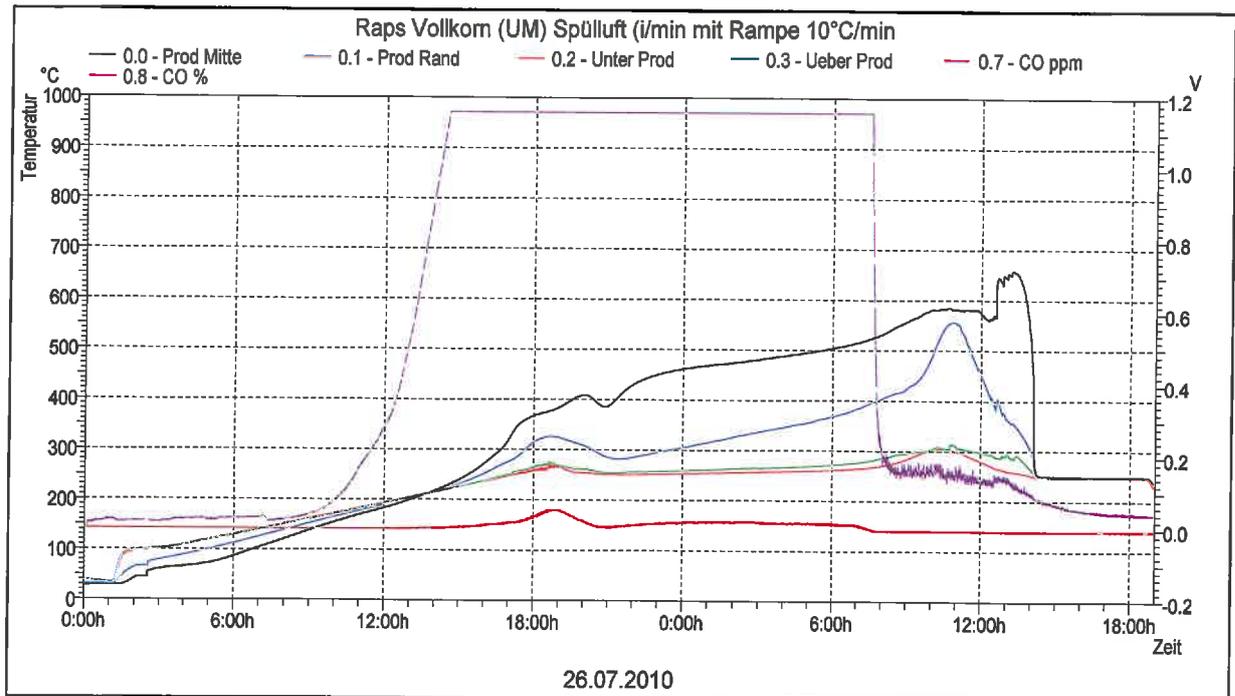
Der gesamte Prozess – vom Überschreiten der Ofentemperatur bis zum Abfall der Produkttemperatur auf die Ofentemperatur – dauert bei den Versuchen mit Raps aber erheblich länger als bei denen mit Mais. Selbst der kürzeste Versuch mit Raps bei 245 °C (ca. 24 h) benötigt mehr als die doppelte Zeit als der Versuch mit Mais bei 225 °C (ca. 11 h).



CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C)



CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 235 °C)



CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 245 °C)

Einen Eindruck von der Rapsprobe nach dem Versuch mit 245 °C gibt das Bild 3.

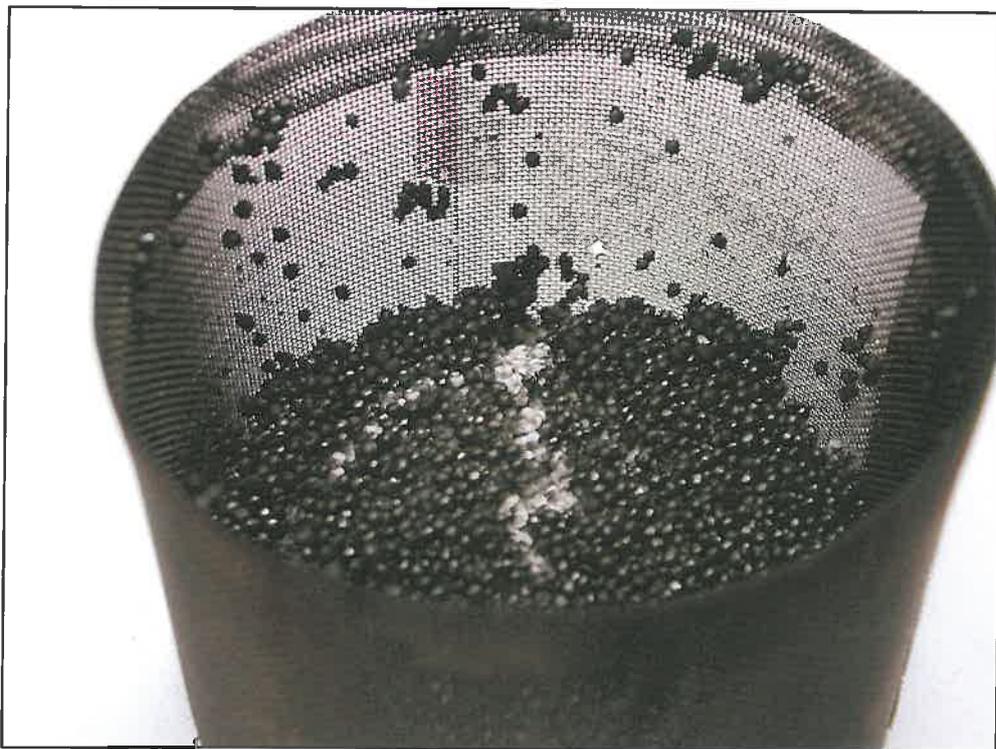


Bild 3 Rapsprobe nach dem Versuch mit 245°C

Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die CO-Emission bei dem Selbstentzündungsprozess von Raps so gering, dass eine Brandfrüherkennung mit CO-Detektion erst dann wirksam werden kann, wenn größere Rapsmengen betroffen sind.

4.4 CO-Emission von Weizen

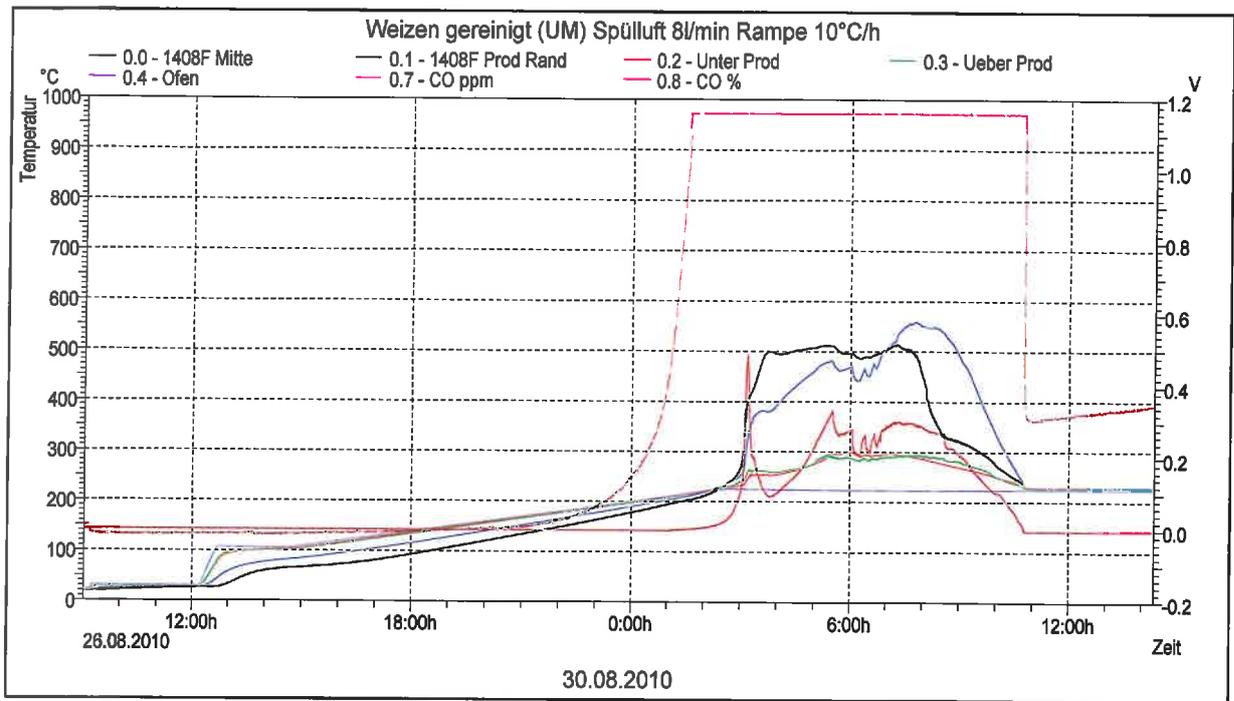
Auch diese Versuche erfolgten unter den gleichen Bedingungen wie bei Mais und Raps (8 l/min Spülluft, Rampe ab 105 °C mit 10 °C/h bis 225 °C).

Die errechneten CO-Mengen liegen für das erste Maximum bei 0,235 l CO/min (1. Versuch) und 0,230 l CO/min (2. Versuch). Für das zweite Maximum ergeben sich 0,163 l CO/min (1. Versuch) und 0,144 l CO/min (2. Versuch).

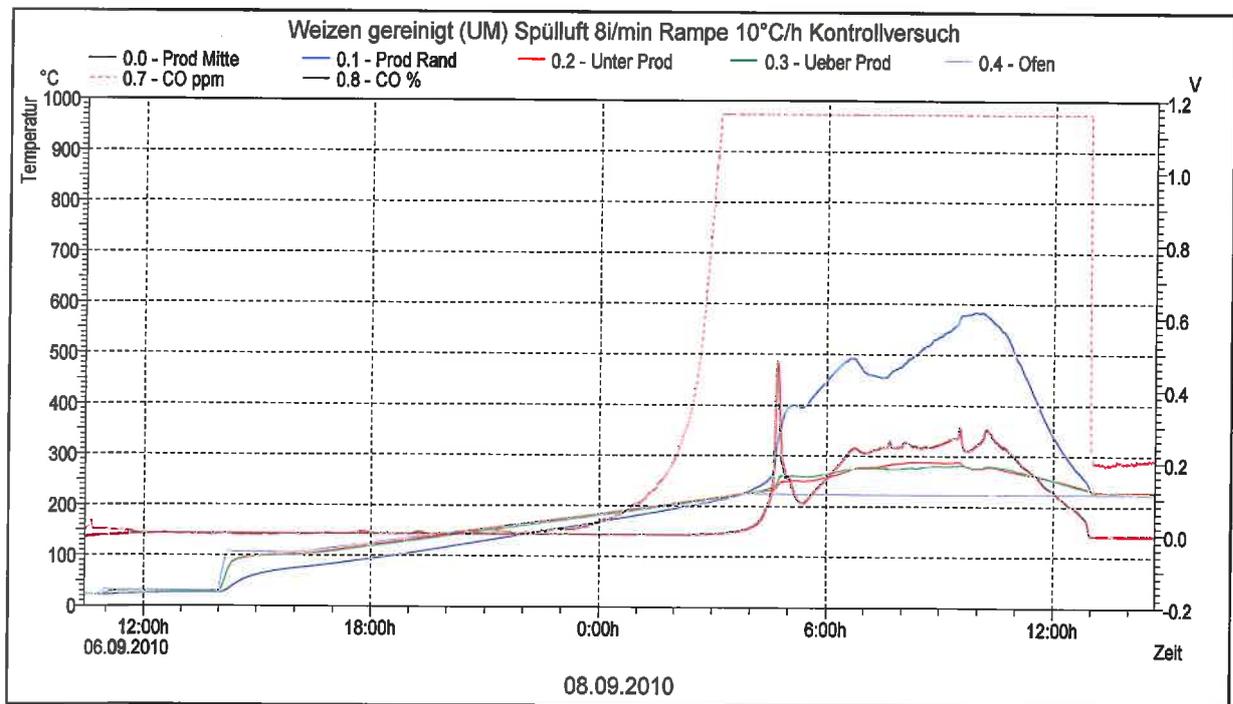
Der Vergleich mit Mais soll wie in Punkt 4.2.2 über die jeweils niedrigsten Werte erfolgen. Danach ergibt sich für das erste Maximum ein höherer Wert für Weizen mit 0,230 l CO/min (Mais 0,178 l CO/min) und für das zweite Maximum ein höherer Wert für Mais mit 0,187 l CO/min (Weizen 0,144 l CO/min).

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei der Selbstentzündung von Weizen CO in ausreichender Menge emittiert wird. Der zeitliche Ablauf bis zur Selbstentzündung entspricht dem von Mais. Der Abbrand erfolgt allerdings etwas schneller.

Eine CO-Detektion von Glimmnestern ist demnach – wie beim Mais - grundsätzlich möglich.



CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C)



CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C)

5. Versuche über eine CO-Belastung beim Betrieb bestehender Durchlauf-trockner für Getreide (Dächerschachttrockner)

In der Trocknungskampagne 2009 konnten durch Vermittlung der R+V Versicherung – Herrn Brüning – zwei Betriebe gefunden werden, die während des Trocknungsprozesses Messungen an der Anlage gestatteten

5.1 Grundsätzliches zum Aufbau der Trockner

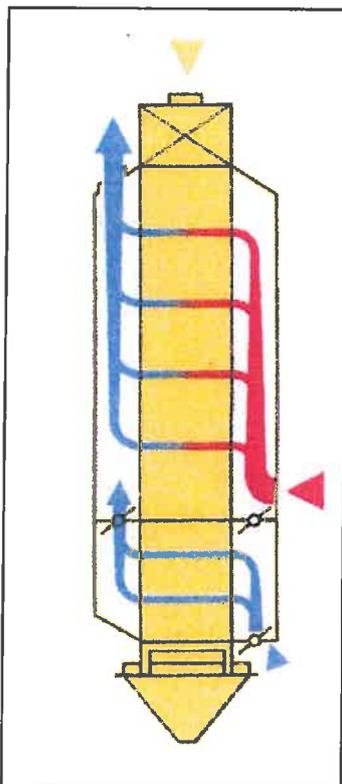


Bild 4 zeigt das Funktionsprinzip eines Durchlauf-trockners. Das Produkt bewegt sich durch Schwerkraft in dem Trockner nach unten. Warmluft und Kühlluft werden quer zur Bewegungsrichtung durch das Produkt geführt. Nach der Trocknung im oberen Teil der Anlage gelangt das warme Korn in die Kühlzone und wird dort mit Außenluft gekühlt, bevor es über eine Austragseinrichtung abgefördert wird.

Der Name „Dächerschachttrockner“ ergibt sich aus dem inneren Aufbau und der Luftführung durch das Produkt (Bild 5).

Bild 4 Funktionsprinzip eines Durchlauf-trockners

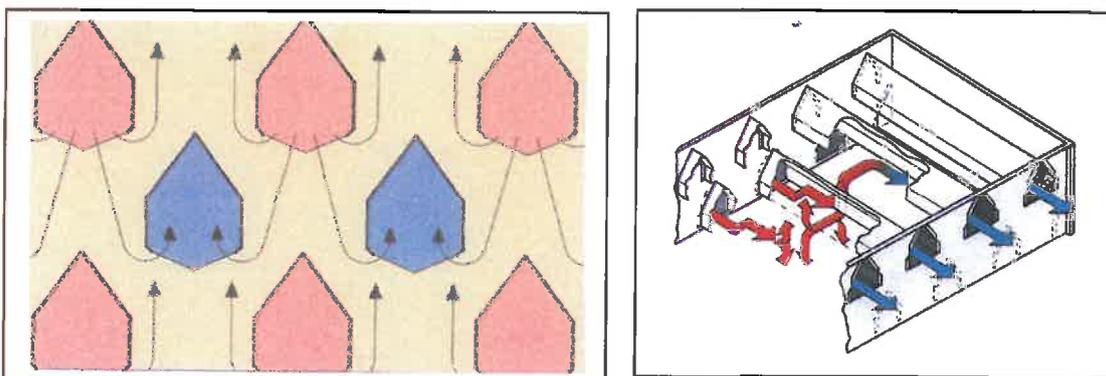


Bild 5 Schematische Darstellung der Luftführung durch das Produkt (rot entspricht Warmluft – blau entspricht Abluft)

Das dargestellte Funktionsprinzip eines Durchlauftrockners (Dächeschachttrockners) kann auf unterschiedlichste Weise variiert werden, z. B.:

- Durch Blechwände im Zuluftbereich wird die Warmluft so geführt, dass dem oberen Bereich der Trocknungszone – also dem frischen Produkt – die wärmste Luft zugeführt wird.
- Die bei der Kühlung des warmen Produktes anfallende warme Luft wird zur Energieersparnis in den Prozess zurückgeführt.
- Die Anlage wird statt für Saugbetrieb für Druckbetrieb konzipiert.
- Die Reinigung der Abluft wird über Zyklone oder Filter vorgenommen.
- Zur Energieersparnis wird die Abluft über Wärmetauscher geführt usw.

Alle diese Varianten verändern den Trockner. Luftströme werden anders gelenkt. Teile des Luftstromes können wieder durch das Produkt gefahren werden. Auch Größe, Form und Zuordnung der Kaskaden können in einem gewissen Rahmen differieren.

Jeder Trocknerhersteller versucht seine Anlagen zu optimieren und den Kundenwünschen anzupassen. Das gilt auch für die Warmlufterzeugung. Die Warmluft kann indirekt über Wärmetauscher durch z. B. Ölbrenner oder Dampf erzeugt werden oder direkt über gasbefeuerte Warmlufterzeuger oder offene Gas-Flächenbrenner.

Die wesentlichen Regelgrößen für den Betrieb des Trockners sind die Temperaturen der Zuluft und des Kornes, wobei die Bedienungsperson vor allem die Korntemperatur beachten muss. Sie sollte sicherstellen, dass das Produkt möglichst schonend getrocknet wird, d.h., das Korn soll nicht geschädigt werden. Die zulässige Belastung hängt sowohl von der Getreideart, z. B. Mais, Weizen, Gerste, als auch vom Verwendungszweck, z. B. Saatgut, Futtergetreide, ab. Die Trocknerhersteller geben für ihre Anlagen entsprechende Empfehlungen über zulässige Temperaturen.

Anlagen können auch weitgehend automatisiert werden. Dazu werden die Feuchtigkeit des Produktes im Einlaufbereich und die vom Betrieb gewünschte Feuchtigkeit am Ende der Trocknungszone über Widerstandsfühler gemessen. Über die Regelung der Trockneraustragseinrichtung kann dann die Durchlaufgeschwindigkeit des Produktes durch den Trockner entsprechend verändert werden.

5.2 Versuche an einer Anlage im Saugbetrieb während der Trocknung von Raps

Die Anlage ist ein einfacher Trockner ohne Luftrückführungen. Der wesentliche Unterschied zum Funktionsprinzip (s. Punkt 5.1) ist die Zuführung der Warmluft von oben.

Zur Reinigung der Abluft ist dem Trockner ein Zyklonabscheider nachgeschaltet. In der Abluftleitung befindet sich noch eine von Hand einstellbare Drosselklappe, mit der Einfluss auf die Abluftleistung des Ventilators genommen werden kann.

Auf dem Typenschild ist die Abluftleistung mit einem Volumenstrom von 70.000 m³/h angegeben. Das Δp beträgt 18.000 Pa.

Der Ölbrenner hat eine Leistung von mind. 320 KW, max. 1965 KW.

Der Trocknerinhalt beträgt ca. 38 t. Nach Angaben der Beschäftigten unterschieden sich die Rapsanlieferungen in Menge und Feuchtigkeit erheblich. Die Feuchtigkeiten lagen zwischen 9,7 – 12,3 %. Vor dem Transport ins Zwischenlager wird die Feuchtigkeit auf < 9 % abgesenkt.

Die Leistung des Trockners betrug – je nach Feuchtigkeit – ca. 12 – 17 t/h, die Zulufttemperatur ca. 63 °C, die Korntemperatur ca. 39 °C.

Eine Untersuchung auf CO-Emissionen bei der Warmlagerung von Raps war zum Zeitpunkt der Versuche noch nicht erfolgt.

5.2.1 Versuchsaufbau

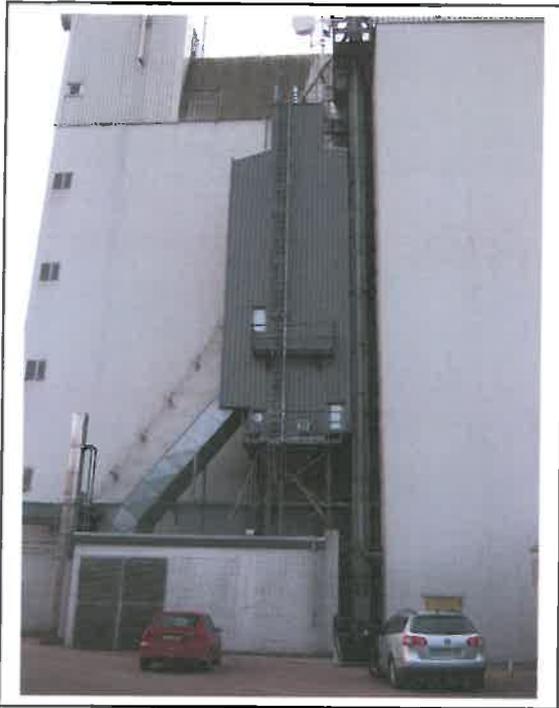


Bild 6 Trockner



Bild 7
Trockner mit Zuluftkanal und Abluftrohr

Der Trockner, an dem die Messungen vorgenommen wurden, ist direkt vor ein Silogebäude gesetzt worden (Bild 6). Die hinter dem silberfarbenen Pkw zu erkennende Tür ist der Zugang zu einem ebenerdigen „Silokeller“. In dem Gebäude, vor dem der rote Pkw steht, befindet sich der Warmlufterzeuger (indirekte Heizung mit Ölbrenner).

Durch die Lamellenwand wird die Außenluft in den Wärmetauscher eingesaugt. Die Warmluft wird dem Trockner über den rechteckigen Kanal zugeführt.

Der Kanal ist so weit nach oben gezogen, dass das feuchte Produkt, welches aus dem Vorratsbehälter in den Trockner läuft, mit der wärmsten Luft in Kontakt kommt. Die Warmluft wird dann über einen Schacht nach unten geführt. Der Schacht endet vor der Kühlzone. Über die linke Tür ist er zu begehen. Die Breite des Durchlauftrockners entspricht in etwa der Breite des Vorratsbehälters.

Nach dem Durchströmen des Dächer-schachttrockners gelangt die Luft in den Abluftschacht, der durch die Tür unten rechts begangen werden kann. Abluft und Kühlluft werden über das Abluftrohr (Bild 7) auf den obersten Siloboden geführt. Dort stehen der Zentrifugalabscheider und der Saugventilator.

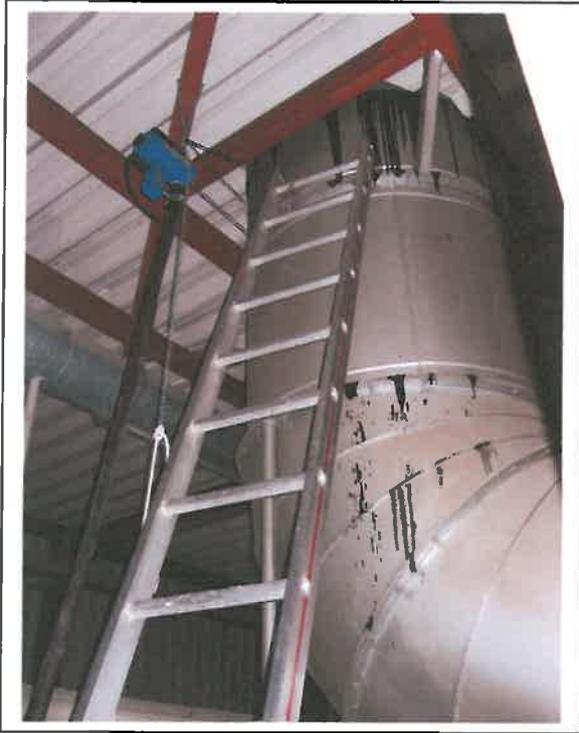


Bild 8 Entnahme des Messgases

Kurz vor dem Austritt ins Freie wurde das Messgas aus dem Abluftrohr entnommen (Bild 8). Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen wurde das Gas über eine beheizte Messgasleitung dem Messgaskühler (Bild 9) zugeführt. Anschließend erfolgte die Weiterleitung in einer Teflonleitung bis zum Aufstellungsort des Messgerätes (Bild 10) im Silokeller.

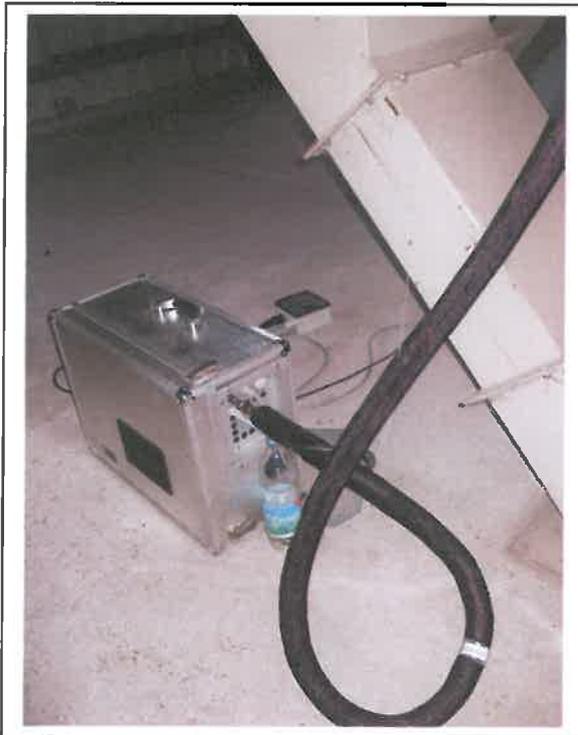


Bild 9 Messgaskühler



Bild 10 Messgerät

Um eventuelle CO-Belastungen der Umwelt bei der Messung auszuschließen, wurde ein Differenzmessverfahren (Cross-flow-Verfahren) angewendet. Als Referenzgas diente die vor dem Wärmetauscher der Ölheizung angesaugte Außenluft. Sollte CO in der Außenluft vorhanden sein, wird sie durch die Differenzmessung im CO-Messgerät gleich von dem Wert des CO in der Abluft subtrahiert.

Verwendete Messgeräte

Gasentnahmesonde-	Typ PSP 4000-H	Fa. M&C Products
Heizschlauch-	Typ PSP 4N 4/6	
	Länge 5 m, 500 Watt	Fa. M&C Products
Gasaufbereitung-	Typ PSS 5	Fa. M&C Products
CO-Analysator-	Modell APMA-370	Fa. Horiba
Datenlogger-	Almeno 2590-9V5	Fa. Ahlborn

Stecker Almeno 2A 9602-Fs/H
Spg +/- 26 Volt

Software
AMR WinControl 6
akrobit software GmbH

Schreiber-	Kompensograph Typ C1015	Fa. Siemens
------------	-------------------------	-------------

5.2.2 Messergebnisse

Gaslaufzeiten: Zeit von der Eingabe des Prüfgases bis zum Beginn des CO-Anstieges am Messgerät
Versuche mit Prüfgas (30 ppm) und einem Durchflussmesser mit ca. 2,5 l/min

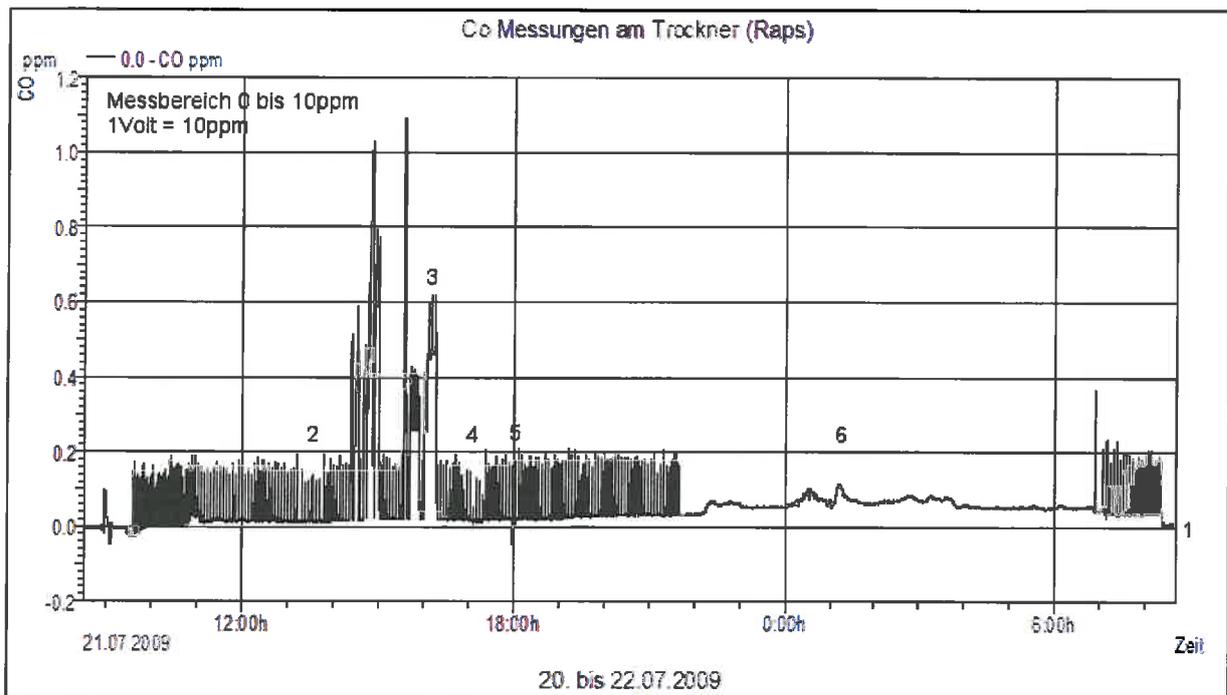
1. Ansaugstelle Referenzluft bis zum Messgerät
(20,6 m Teflonschlauch, Innendurchmesser 4 mm) ca. 8 s
2. Messgassonde Siloboden bis zum Messgerät
(Sonde – Heizschlauch – Messgasaufbereitung – Teflonschlauch 48 m) ca. 18 s

3. Aufgabe CO-Gas durch den Ölbrenner, d.h. Gesamtlaufzeit der Luft durch den Trockner und das Messsystem ca. 33 s
4. Aus der Differenz von 2 und 3 ergibt die Laufzeit des Gases durch den Trockner ca. 15 s

Auf eine genaue Abstimmung der Laufzeiten zwischen dem Referenzgas und dem Messgas wurde verzichtet. Die Ansaugpumpe des Messgerätes war nicht in der Lage, über eine entsprechende Schlauchlänge die Luft anzusaugen. Bei der Messsonde spielt das keine Rolle, weil die stärkere Pumpe des Messgaskühlers das Messgas bis zum Aufstellungsort des Messgerätes drückt.

Außerdem werden alle CO-Emissionen in der Referenzluft, die länger als 25 Sekunden dauern, auch wieder von dem System verarbeitet. Auf einen Versuch, der das darstellt, wird später noch eingegangen.

Der Ausdruck aus dem Datenlogger gibt einen Überblick über die CO-Emissionen während des ganzen Tages. Ausgenommen sind die Zeiten von 14:30 Uhr bis 16:30 Uhr und um 18:00 Uhr, in denen Versuche gefahren wurden. Außerdem soll noch auf die weiteren gekennzeichneten Bereiche näher eingegangen werden (Messschrieb mit den Daten des Versuches mit Raps).



Daten des Versuches mit Raps

Grundsätzlich ist das Ergebnis überraschend. Bei einem indirekt beheizten Wärmetauscher ist eine intermittierend auftretende CO-Belastung der Abluft nicht zu erwarten. Fremdgasen konnten ausgeschlossen werden, da die Anlage – mit Ausnahme der Förderwege für das Produkt – keine Verbindung mit anderen Anlagenteilen aufwies. Deshalb stand der Ölbrenner im Vordergrund des Interesses.

Durch Zeitmessung wurde festgestellt, dass der Beginn des jeweiligen CO-Anstiegs mit der Zündung des Brenners übereinstimmte. Heftigere Zündungen, bei denen die Überdruckklappe der Brennkammer etwas weiter aufging, waren eindeutig den höheren CO-Spitzen zuzuordnen.

Anmerkungen zu den gekennzeichneten Bereichen:

1. Über den Tag ist beim Messgerät eine Drift des Nullpunktes aufgetreten. Die Ursache konnte im Nachhinein nicht geklärt werden. Normalerweise ist dieser Gerätetyp nullpunktstabil. Bei den im Folgenden angegebenen Messwerten ist die Drift jeweils subtrahiert worden.
2. Nach Rücksprache erklärte sich der Betrieb bereit, für mehrere Zyklen die Warmlufttemperatur von ca. 63 °C auf ca. 75 °C zu erhöhen. Dadurch verlängerte sich der bisherige Zyklus – Zündung des Brenners bis zur erneuten Zündung des Brenners – um ca. 20 % von durchschnittlich 238 s auf 285 s.

Die Höhe der CO-Peaks verringerte sich um ca. 27 % von durchschnittlich 1,45 ppm auf 1,14 ppm. Höhere Temperaturen und längere Laufzeiten wirken positiv auf das Zündverhalten des Brenners.

3. Durch die Zugabe von CO-Gas sollten

- die Laufzeit des Gases durch den Trockner kontrolliert
- die Höhe des CO-Wertes in der Abluft bestimmt werden.

Das CO-Gas wurde über einen Durchflussmesser direkt in den Warmluftkanal nach dem Wärmetauscher eingegeben (Bild 11).

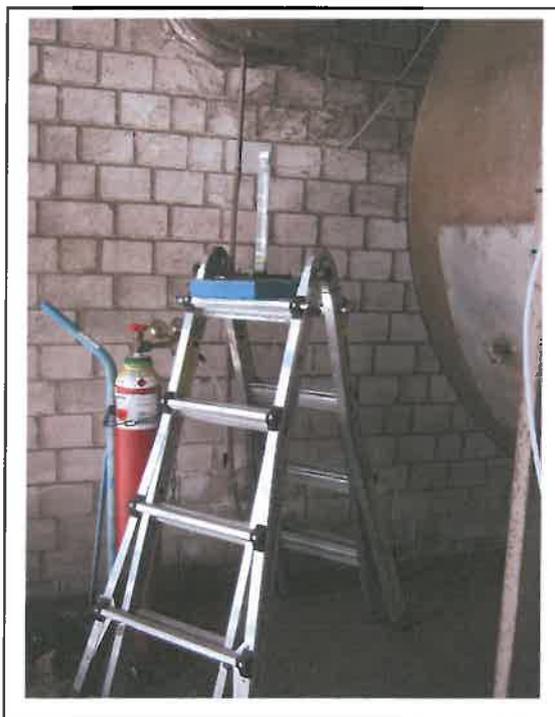


Bild 11 CO-Eingabe

Die Laufzeitmessung ergab 31 s und bestätigte den Wert, der durch die Auswertung der CO-Aufgabe durch den Ölbrenner ermittelt worden war.

Zur Bestimmung des CO-Wertes in der Abluft waren die ersten Versuche nicht geeignet, da der Durchflussmesser nicht stabil war. Danach wurden noch 2 Versuche mit 2 und 4 l CO/min gefahren, bei denen eine Person den Durchflussmesser bei Schwankungen nachregelte. Bei 2 l CO/min für den „Sockel“ ergibt sich ein Wert von ca. 2,3 ppm und bei 4 l CO/min von ca. 4,5 ppm. Über diese Werte lassen sich Rückschlüsse auf den Volumenstrom ziehen.

4. Dass das Zündverhalten des Brenners mit den CO-Peaks in Verbindung steht, wurde schon nachgewiesen. Für das CO gab es zwei mögliche Erklärungen:

- Die Brennkammer ist defekt.
- Das aus der Entlastungsklappe der Brennkammer austretende Rauchgas gelangt bis zur Ansaugöffnung des Wärmetauschers.

Um zum zweiten Punkt eine Aussage machen zu können, wurde die Entnahme der Referenzluft in die Nähe der Entlastungsklappe gebracht (Bild 12).



Bild 12 Referenzluftabsaugung an der Entlastungsklappe



Bild 13 Eingabe von Nebel in die Brennkammer



Bild 14 Austritt von Nebelschwaden

Unter solchen Bedingungen kann das Rauchgas tatsächlich den Messwert beeinflussen, aber nicht immer gänzlich unterdrücken. In der Praxis dürfte der Einfluss keine Rolle spielen. Der Abstand zwischen der Entlastungsklappe und der Ansaugstelle für die Referenzluft, die der Zuluft für den Wärmetauscher entnommen werden muss, beträgt mindestens mehrere Meter.

Vor der Kampagne des Jahres 2010 konnte der Defekt in der Brennkammer nachgewiesen werden. Herrn Brüning war es möglich, eine Nebelmaschine zu

beschaffen. Vor dem Versuch wurde der Abgaskanal zum Kamin mit Planen notdürftig verstopft. Danach erfolgte die Flutung der Brennkammer mit dem Nebel (Bild 13). Dabei konnte beobachtet werden, wie Nebelschwaden in den Ansaugbereich der Zuluft für den Wärmetauscher gelangten (Bild 14).

5. Durch kurze CO-Impulse können Probleme bei der CO-Detektion auftreten, wenn die Gaslaufzeiten nicht genau abgestimmt sind. Bei dem Versuch stand ein Auto mit dem Auspuff Richtung Referenzluftansaugung. Die kurzzeitig durch das Abgas eingeleitete CO-Menge überstieg die CO-Menge, die beim Anspringen des Brenners austrat. Es entwickelte sich kurzzeitig ein negatives Signal.
6. Über Nacht war die Anlage abgestellt. Der warme Raps verblieb im Trockner. Auf diese Weise wird das morgendliche Anfahren mit frischem Produkt für das Bedienungspersonal einfacher. Der warme Raps gab etwas CO ab, das aufgrund der Kaminwirkung in das Abluftrohr gelangte. Der maximale Messwert beträgt 0,7 ppm.

5.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Vorbelastung durch CO bei der Trocknung von Raps ist auf einen Defekt in der Brennkammer des indirekt beheizten Wärmetauschers zurückzuführen. Nach jedem Zünden des Ölbrenners wurde Rauchgas der Warmluft beigemischt. Während der Trocknung wurden Werte bis zu 1,8 ppm CO in der Abluft des Trockners gemessen. Beim morgendlichen Anfahren des Trockners stieg der Wert kurz auf ca. 3,3 ppm.

Der Abluftventilator der Anlage ist mit einem Volumenstrom von 70000 m³/h angegeben. Während des gemessenen Trocknungsprozesses war der Volumenstrom gedrosselt. Der eingestellte Volumenstrom ist dem Betrieb nicht bekannt.

Eine Abschätzung lässt sich mit Hilfe der gemessenen Werte bei der Eingabe von CO-Gas vornehmen. Nach dem Wärmetauscher wurden 2 und 4 l/min CO in die Warmluft eingegeben. 2 l/min CO führten zu einem Messwert von ca. 2,3 ppm CO, 4 l/min. zu ca. 4,5 ppm. Bezogen auf 1 min hat der Abluftventilator einen Volumen-

strom von 1.167 m³. Um 1 l/min CO auf 1 ppm zu verdünnen, benötigt man 10⁶ l/min Luft.

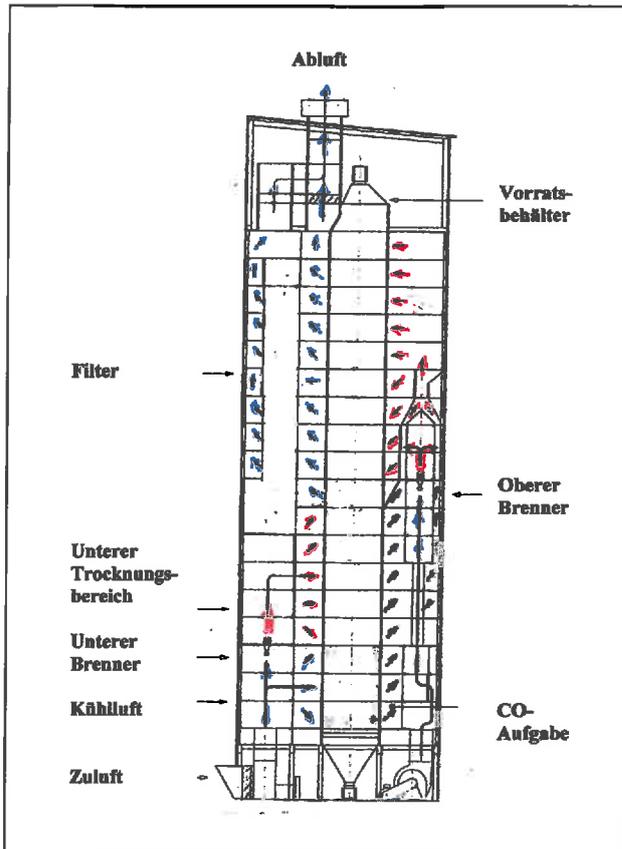
Um 2 l/min auf 2,3 ppm zu verdünnen sind ca. 870 m³/min Luft erforderlich. Bezogen auf eine Stunde ergeben sich 52200 m³; für 4 l/min und einen Messwert von 4,5 ppm 53340 m³/h.

Dass die Werte unterschiedlich ausfallen, hängt vor allem mit den leicht schwankenden CO-Mengen bei der Eingabe in den Durchflussmesser zusammen. In der Größenordnung stimmen sie aber gut überein. Die Abschätzung bezieht sich auf eine Raumtemperatur von 20 °C. Das war die Temperatur, die für das CO-Gas bei der Eingabe und bei der Messung angenommen werden kann.

Der höchste Wert eines CO-Peaks betrug ca. 3,3 ppm, was einer CO-Menge von ca. 2,9 l/min entspräche. Legt man den Höchstwert von 0,029 l/min zugrunde, der bei 400 cm³ Raps im Versuch ermittelt wurde (s. Punkt 4.3), dann würde eine Emission von 40 l Raps benötigt, um die Vorbelastung zu erreichen. Auf der anderen Seite würde die Messtechnik Fehler an der Feuerungsanlage schnell erkennen. Abgase einer Ölfeuerung durch das zu trocknende Produkt zu schicken, dürfte nicht im Sinne der Qualitätssicherung sein.

5.3 Versuche an einer Anlage im Druckbetrieb während der Trocknung von Mais

Der Dächerschachttrockner entspricht auch dem Funktionsprinzip (s. Punkt 5.1), nur wird in diesem Fall die Warmluft durch das Produkt gedrückt. Die Warmluftherzeugung erfolgt direkt mit zwei gasbefeueten Flächenbrennern. Der untere Flächenbrenner trocknet das Produkt im unteren Teil des Trockners. Die Abluft aus diesem Bereich und die Kühlluft aus der darunter liegenden Kühlzone werden als Mischluft für die Heißluft des oberen Flächenbrenners genutzt. Mit dieser Luft wird im oberen Teil des Trockners das frisch eingebrachte Produkt vorgetrocknet. Die gesamte Abluft kann über ein Filtersystem gefahren werden, bevor sie in den Abluftschacht gelangt. Der Abluftschacht erstreckt sich über die gesamte Abluftseite des Trockners. Auf dem Siloboden teilt er sich in 2 Abluftschächte auf, die in der Mitte der Trocknerkonstruktion ca. 1 m Abstand haben.



Schema des Trockners

Der Trockner hat einen Inhalt von 250 t. Aufgrund der günstigen Wetterverhältnisse betrug die Feuchte des Mais bei Anlieferung 25 – 26 %, nach der Trocknung 15 %. Damit ist das Produkt lagerfähig. Die Leistung der Anlage betrug 45 t/h. Bei einer Feuchte von 32 % würde sich die Leistung auf ca. 40 t/h reduzieren. Die Leistungsminderung führt zu einer längeren Trocknungszeit. Die Abzugmenge des Produktes wird über die Austragseinrichtung geregelt..

Nach Angaben der Beschäftigten werden aus Qualitätsgründen die Warmlufttemperaturen nicht über 90 °C (unterer Brenner) und 100 °C (oberer Brenner) gefahren. Die Regelung erfolgt über die Ablufttemperatur. Diese lag bei ca. 70 °C, die Korn-temperatur zwischen 55 und 60 °C. Die maximale Korntemperatur ist aus Qualitätsgründen auf 60 °C festgelegt.

In der Anlage sind 3 Ventilatoren installiert. Die Typenschilder enthalten keine Angaben zum Volumenstrom und dem Förderdruck. Nach betrieblichen Unterlagen ist ein Ventilator mit 62665 kg/h und zwei sind mit je 98760 kg/h angegeben, insgesamt also 260185 kg/h. Bei einer Abluft mit 70 °C und 80 % Luftfeuchte ist von einem Volumen – auch bei unbekanntem Druckverhältnissen – von weit über 300000 m³ /h auszugehen.

5.3.1 Versuchsaufbau

Auch bei diesem Trockner wurde das Messgas aus der Abluft und die Referenzluft vor einer Ansaugöffnung für die Frischluft angesaugt. Bild 15 und 16 geben einen Eindruck vom Trocknergebäude, Bild 17 und 18 von der Gasentnahmestelle aus dem Abluftschacht und dem Aufstellungsort für den Messgaskühler.

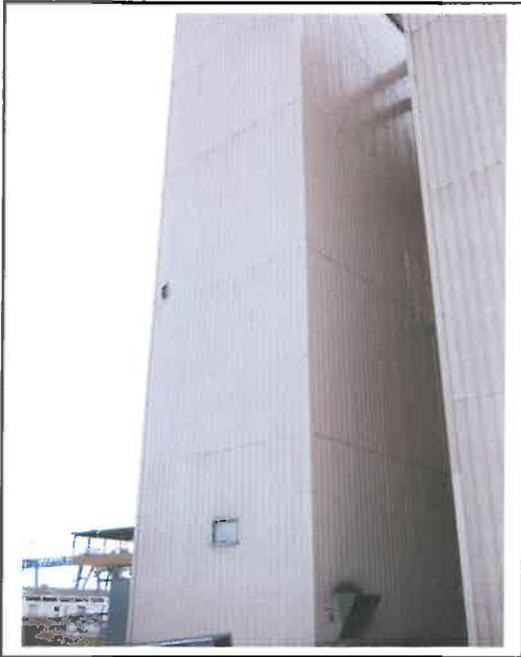


Bild 15 Trocknergebäude mit einer Ansaugstelle für Zuluft

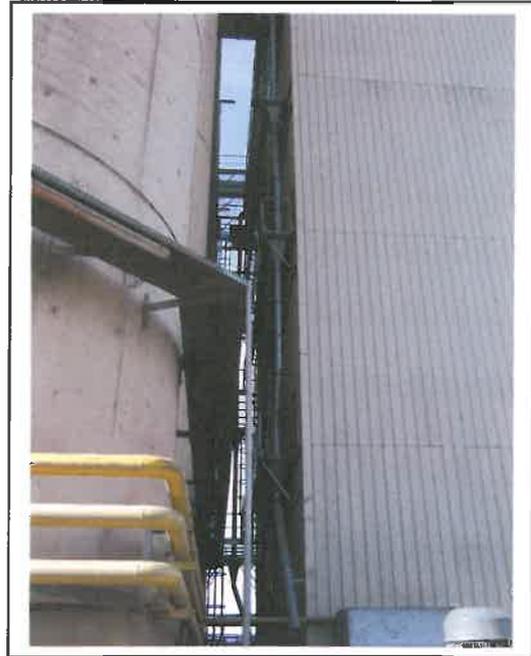


Bild 16 Trocknergebäude mit Zugangsebenen



Bild 17 Messgasentnahmestelle



Bild 18 Aufstellungsort Messgaskühler

Die auftretende Raumverstaubung gestattete nur eine Aufstellung des Messgaskühlers in der Nähe des Eingangs. Die Messtechnik (verwendete Geräte wie unter 5.2.1) stand in einem Container neben dem Trocknergebäude.



Bild 19 Messgerät

5.3.2 Messergebnisse

Gaslaufzeiten: Zeit von der Eingabe des Prüfgases bis zum Beginn des CO-Anstieges am Messgerät.

Versuche mit Prüfgas (30 ppm)

- | | |
|--|----------|
| 1. Ansaugstelle Referenzluft – Messgerät | ca. 8 s |
| 2. Messgassonde Siloboden – Messgerät | ca. 23 s |

Aufgabe von CO-Gas im Trockner (s. Schema des Trockners)

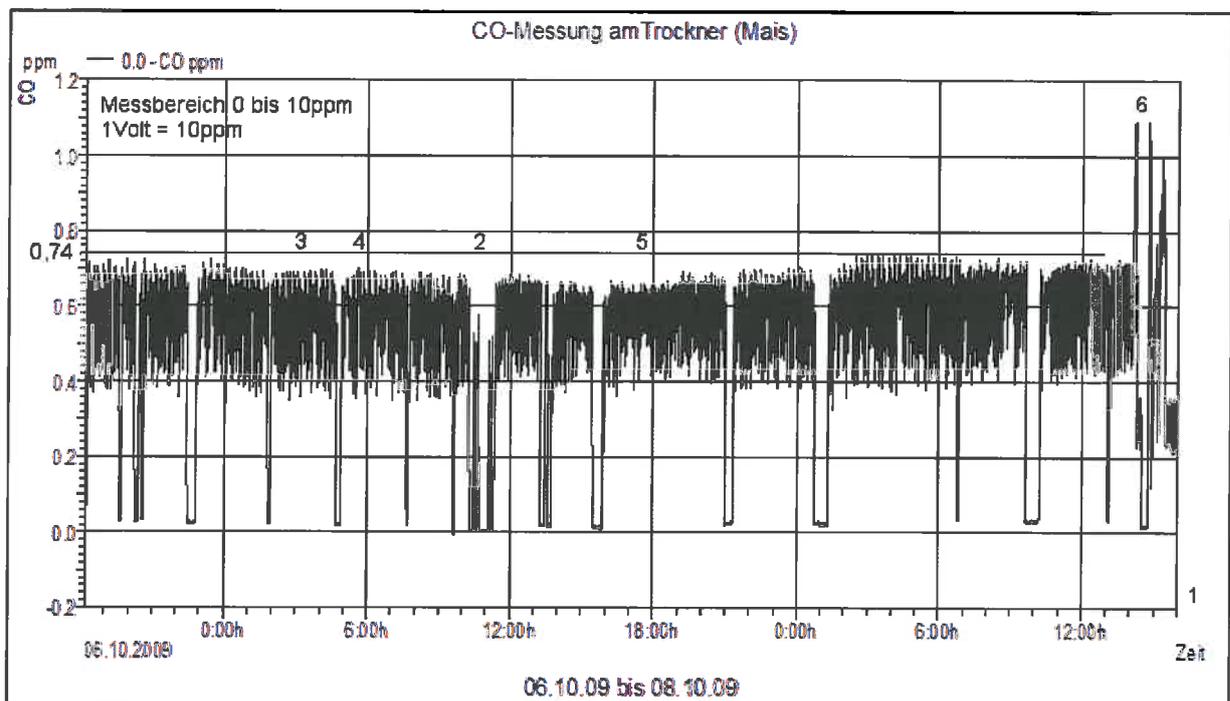
- | | |
|---|----------|
| 3. Aufgabestelle im Bereich der Abluft nach der Kühlung | ca. 32 s |
|---|----------|

Die Aufgabestelle musste so gewählt werden, dass kein CO über den Brenner gefahren wird und verbrennt. Mit dem CO sollte in erster Linie die Abluftmenge kontrolliert werden.

Die Luftführung in der Anlage ist nicht kontinuierlich. Vor dem Austrag des Produktes werden die Zuluftöffnungen durch Lamellenklappen schlagartig geschlossen. Die Gaszufuhr wird unterbrochen. Die Brenner erlöschen. Lediglich die Pilotflammen brennen. Die Ventilatoren laufen in dieser Zeit weiter. Während der Messungen betrug die Austragszeit des Produktes ca. 25 s. Nach dem Öffnen der Zuluftklappen

fahren die Brenner wieder hoch. Über die Regelung der Gasmenge werden die eingestellten Temperaturen erreicht. Nach ca. 255 s beginnt der Zyklus neu.

Der Ausdruck aus dem Datenlogger vom 06. – 08.10.2009 gibt einen Überblick über die CO-Emissionen der kontinuierlich laufenden Anlage für einen Zeitraum von 46 h. Die direkte Feuerung mit Gas erzeugt eine ständige CO-Belastung, die aber aufgrund der Verfahrenstechnik schwankt. Während die Zuluftkanäle geschlossen und die Brenner – bis auf die Pilotflamme – ausgestellt werden, sinkt die CO-Belastung. Nach dem Öffnen der Zuluftkanäle und dem Anfahren der Brenner steigt sie wieder an. Kommt es zu Störungen in der Produktzufuhr – Leerfahren des Vorbehälters – oder beim Austrag des Produktes – Defekt an der Austragseinheit, Abtransport nicht möglich – wird auch die Pilotflamme ausgeschaltet.

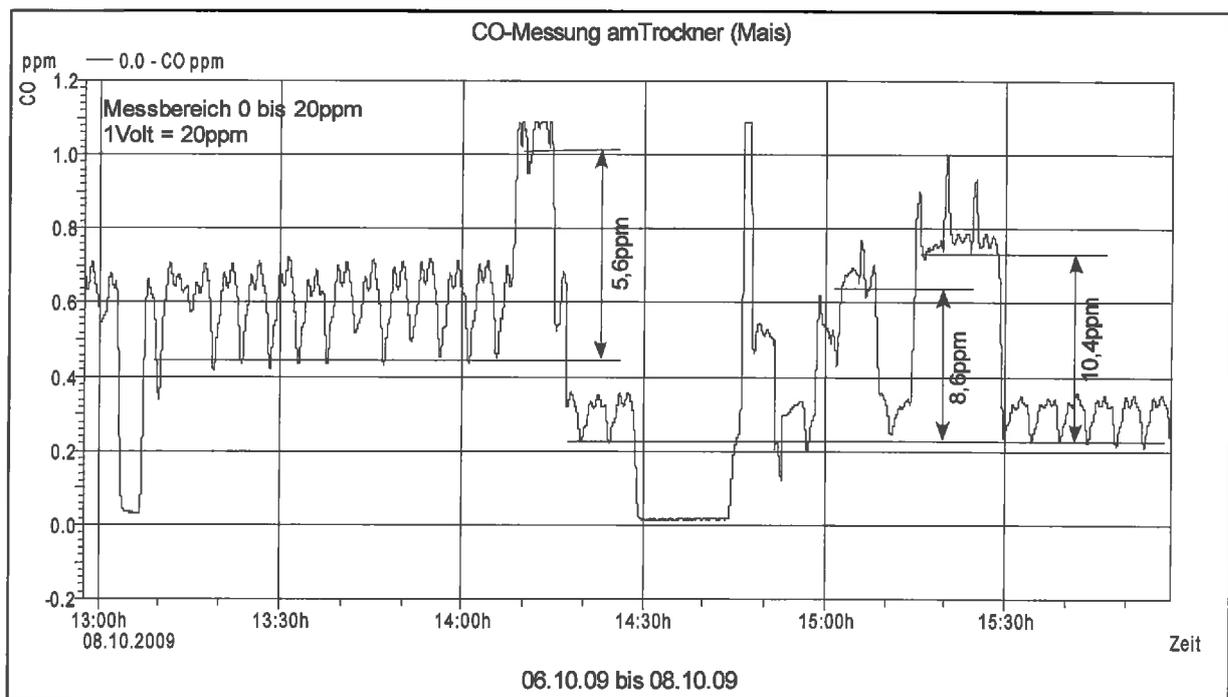


Daten des Versuches mit Mais

Zu den auf dem Messschrieb eingetragenen Ziffern noch einige Anmerkungen:

1. Die Differenzen zur Nulllinie sind bei dieser Messung auf CO-Gase zurückzuführen, die sich nach dem Abschalten noch im System befinden. Die angegebenen Messwerte sind von der Nulllinie aus gemessen.
2. Zu diesem Zeitpunkt trat eine größere Störung auf, die wiederholt zu Abschaltungen führte. Die Anlage musste begangen werden.

- 3.- 5. Der optische Eindruck auf dem Messschrieb erweckt den Anschein, als wenn die beschriebenen Zyklen unterschiedlich seien. Anhand der Messschriebe des mitlaufenden Schreibers wurden die Zeiten analysiert. Die Zeitunterschiede waren gering (278 – 282 s) und lassen sich auf den relativ kleinen Maßstab zurückführen (Geschwindigkeit des Schreibers 6 cm/h). Auffallender ist, dass im Bereich 5 der CO-Anstieg deutlich geringer ist. Das deutet auf eine bessere Verbrennung des Gases hin. Wahrscheinlich ist dies auf höhere Temperaturen zurückzuführen (s. auch Punkt 5.2.2). Eine Überprüfung im Nachhinein ist nicht möglich, da die Temperaturen der Anlage nicht aufgezeichnet werden.
6. Mit der Zugabe von CO sollten neben der Laufzeitmessung auch Rückschlüsse auf den Volumenstrom der Abluft gezogen werden. Die ersten Versuche mit 6 l/min zeigten, dass das Ergebnis über den Messbereich von 10 ppm hinaus führte. Der Messbereich wurde nach der Messung auf 20 ppm erhöht. Will man über die Erhöhung des Messwertes die Zugabe von CO beziffern, muss man zuerst die Grundlast annehmen. Als Grundlast wurde der mittlere Wert der CO-Absenkung der letzten Versuche vor der Zugabe von CO angesehen. Die Zunahme nach oben begrenzte der mittlere Wert der Absenkungen während der CO-Zugabe.



Auszug aus dem Datenlogger

Der erste Versuch mit 6 l/min und die Versuche mit 10 l/min und 12 l/min erfüllen in etwa die Vorgaben.

Die Zunahme beträgt bei

6 l/min - 5,6 ppm, bei

10 l/min - 8,6 ppm und bei

12 l/min - 10,4 ppm.

5.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Verbrennungsprozess des Gases bei der direkten Feuerung führte unter den Produktionsbedingungen (Leistung der Anlage 45 t/h, Abgastemperatur ca. 70 °C, Korntemperatur 55 – 60 °C) zu einer CO-Belastung von max. 7,4 ppm. Eine eventuelle Luftbelastung durch CO in der Umwelt wurde durch die Differenzmessung (Luft als Referenzgas) ausgeschlossen.

Die Luftbelastung kann der Messdatei des Landes Baden-Württemberg am Standort Kehl-Hafen entnommen werden. Für das Jahr 2009 ist der max. 8 h-Wert mit 2,2 mg/m³ angegeben. 1 ppm entspricht 1,16 mg/m³ bei 20 °C und 1,013 bar. Der max. 8 h-Wert würde demnach zu einer Vorbelastung von 2,55 ppm führen. Der max. 8 h-Wert ist die kleinste Einheit, die in Baden-Württemberg bei Umweltbelastungen ausgewiesen wird. Schwankungen innerhalb der 8 h können weit über den angegebenen Mittelwert hinausgehen.

Verteilt sich die eingegebene CO-Menge gleichmäßig in der Abluft, lässt sich die Abluftmenge abschätzen. Wie unter 5.2.3 schon erläutert, können die Messwerte in Volumenströme umgerechnet werden.

Bei der Zugabe von 6 l/min CO und einem Messwert von 5,6 ppm errechnet sich ein Abluftvolumen von 64286 m³/h,

bei 10 l/min und 8,6 ppm – 69767 m³/h,

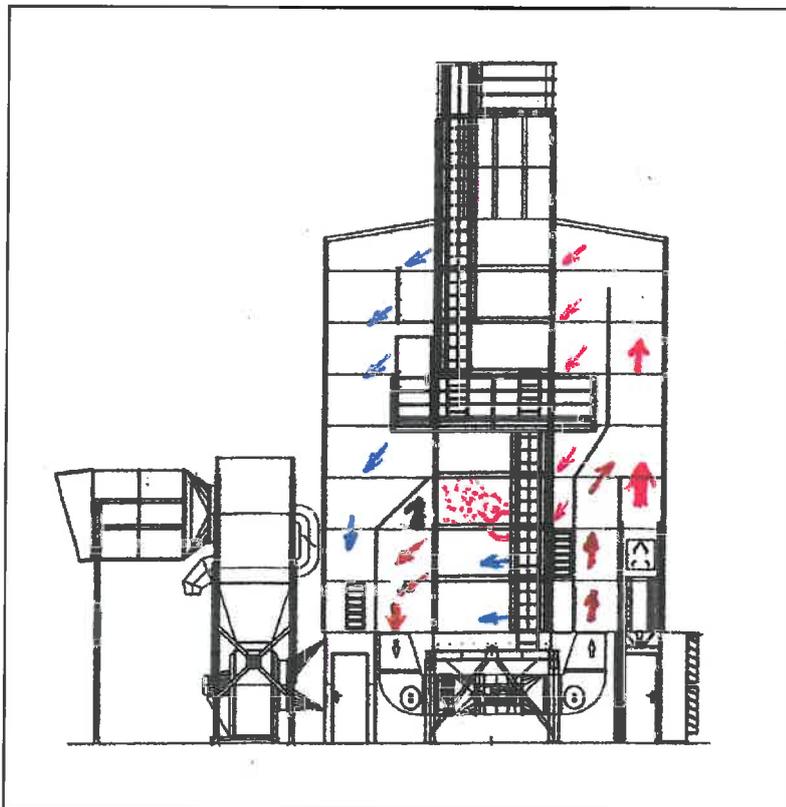
bei 12 l/min und 10,4 ppm – 69230 m³/h.

Das Verfahren kann sicher keinen hohen Anspruch auf Genauigkeit erheben. Es ergeben sich aber in allen Fällen Werte, die weit von dem entfernt sind, was zum Abluftvolumen vom Hersteller gesagt wurde. Betrachtet man die Bauweise des Trockners, das Verfahren der Warmlufterzeugung durch Flächenbrenner, die Luftverteilung und den Aufgabepunkt des CO (s. Schema des Trockners), dann wird klar, dass eine Strahlenbildung vorliegt. Die Messgasentnahme aus dem Abluftschacht lag direkt über der CO-Eingabestelle und wurde nur mit einem Teil des Abluftstroms verdünnt. Trockner dieser Größe und Bauart benötigen mehrere Ansaugstellen, um Schadensfälle sicher erkennen zu können.

Nach den bisherigen Erkenntnissen über die CO-Emissionen von Mais (s. Punkt 4.2.3) ist bei der 400 cm³-Probe mindestens ein Wert von ca. 0,18 l CO/min zu erwarten. Rechnet man den Wert hoch, kann man bei der Größe eines Glimmnestes von 10 l von einer CO-Emission von 4,5 l/min ausgehen. Würden die beiden Abluftkamine jeweils mit 2 Ansaugstellen ausgerüstet, könnte die CO-Emission sicher erkannt werden. Eine Zusammenführung der 4 Ansaugstellen mit der entsprechenden Verdünnung ließe den Messwert sinken. Bei einer Abluftmenge von 350000 m³/h und gleichmäßiger Verteilung erbrächten 4,5 l/min einen erkennbaren Anstieg von 0,77ppm.

6. Ein Schadensfall aus der Praxis

Im Herbst 2009 wurde der R+V Versicherung ein Schaden an einem Dächerschacht-trockner gemeldet. Die Herren Brüning und Zockoll hatten 18 Tage nach dem Ereignis die Gelegenheit, diesen Schaden zu besichtigen. Die Abbildung zeigt die schematische Darstellung des 2008 gebauten Trockners.



Darstellung des Trockners mit Schadensfall

Der Trockner hat einen Inhalt von 80 t. Als Leistung für den Trockner gibt der Hersteller 18 t/h bei Mais mit 35 % Feuchte an, als Nennleistung für die Abluft 112.000 m³/h. Die Warmluft wird mit einem Gasflächenbrenner erzeugt. Der Brand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit im Übergangsbereich von der Trocknungs- zur Kühlzone entstanden. Die Schadensbilder wurden vom Punkt 1 aus fotografiert. Aufzeichnungen über Temperaturverläufe in der Anlage liegen nicht vor. An der SPS waren die Sollwertstellungen für die Warmluft mit 135 °C und die Korntemperatur mit 80 °C angegeben.

An dieser Stelle soll keine detaillierte Unfalluntersuchung durchgeführt werden. Es sollen nur Aussagen über den zeitlichen Schadensablauf und die aufgetretenen Schäden mit den Erkenntnissen aus Warmlagerversuchen in Zusammenhang gebracht werden.

Der Brandschaden wurde gegen 7:30 Uhr entdeckt. Die Temperaturüberwachungsanlage – 12 Temperaturfühler, gleichmäßig auf der Abluftseite verteilt – schaltete die komplette Trockneranlage ab. Die Abschalttemperatur ist nicht bekannt, auch der Sachverständige macht dazu keine Aussage. Das Bedienungspersonal stellte fest, dass an der Aluminiumwand des Trocknergehäuses und an der Wand des Umluftschachtes schon Schäden aufgetreten waren. Die Mitarbeiter setzten die Feuerlöschanlage am Kopf des Trockners in Gang, mussten aber anschließend das Trocknergehäuse zum Teil aufschneiden, um den Brand löschen zu können.

Nach Angaben des Betriebes wurde auf der Anlage bisher nur Mais gefahren. Am Tag vorher sei die Anlage komplett leergefahren worden. Danach habe eine Sichtkontrolle stattgefunden, u. a. im Auslauf. Um 6:00 Uhr morgens sei die Anlage wieder angefahren worden. Nach 1:30 Std. schaltete sich die Anlage ab.

Der Brand muss sich nach seinem Ausbruch sehr schnell ausgebreitet haben, denn das Trocknergehäuse war auf seiner ganzen Breite zerstört (Bilder 20, 21, 22).



Bild 20



Bild 21



Bild 22



Bild 23 Warmluftseite

Bild 23 wurde vom Warmluftschacht aus aufgenommen. Am unteren Bildrand erkennt man die durchgebrannte Trocknerwand. Auf Bild 22 ist diese Stelle mit der Taschenlampe angeleuchtet.

Das gesamte Schadensbild deutet darauf hin, dass der Brand sich aus diesem Bereich in Richtung Abluft ausgebreitet hat. Die auftretenden Temperaturen waren so hoch, dass das Aluminium des Dächerschachttrockners geschmolzen ist. Ausgetragene Teile sind auf Bild 24 zu erkennen.



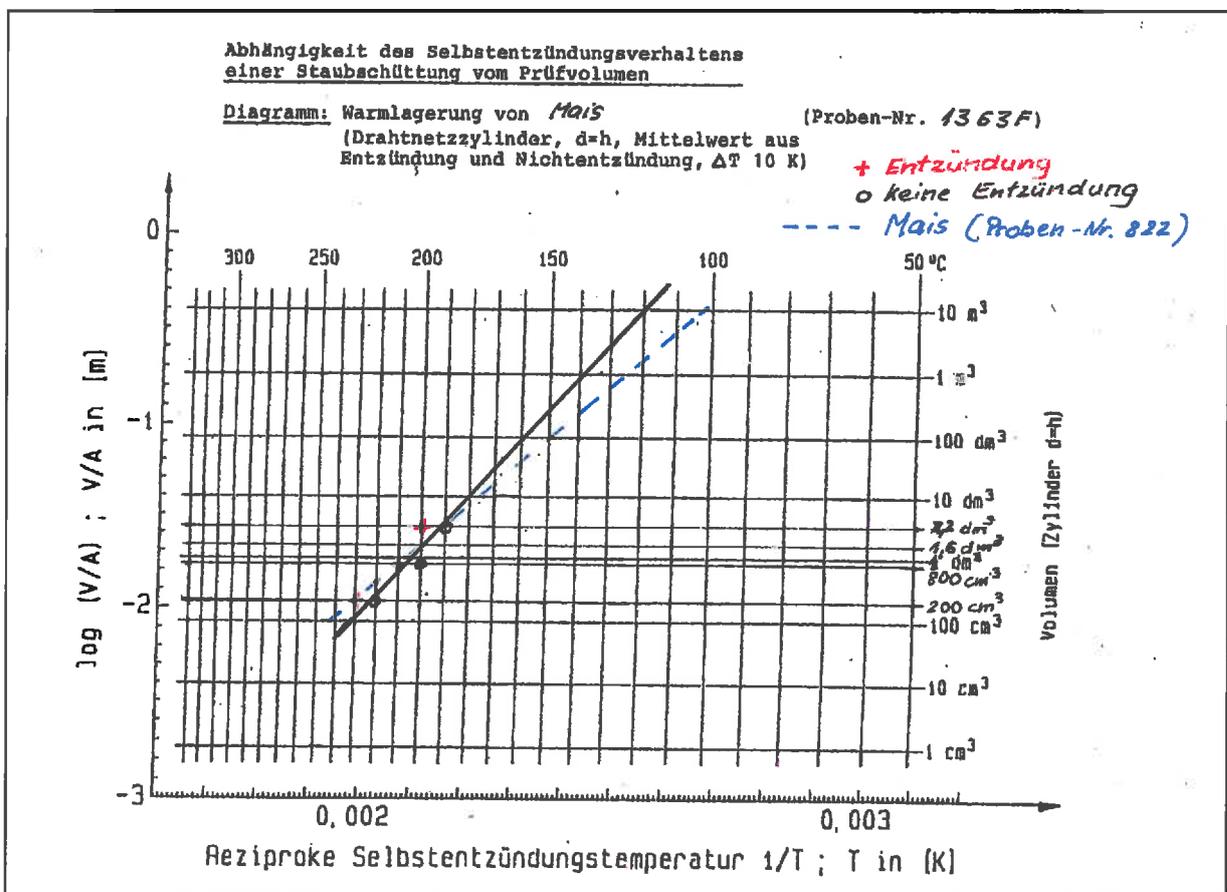
Bild 24 zum Teil geschmolzene Aluminiumteile

Im Punkt 4 wurde schon Grundsätzliches zu Warmlagerversuchen ausgeführt und auf die Volumenabhängigkeit der Selbstentzündungstemperatur hingewiesen. Um die Abhängigkeit vom Volumen darstellen zu können, wurden Warmlagerversuche mit den Volumina 200 cm^3 , 800 cm^3 und 3200 cm^3 im Wärmeschrank gefahren.

Die Ergebnisse kurz zusammengefasst:

Volumen [cm ³]	Temperatur, bei der keine Selbstentzündung auftrat [°C]	Temperatur, bei der Selbstentzündung auftrat [°C]
200	220	230
800	200	210
3200	190	200

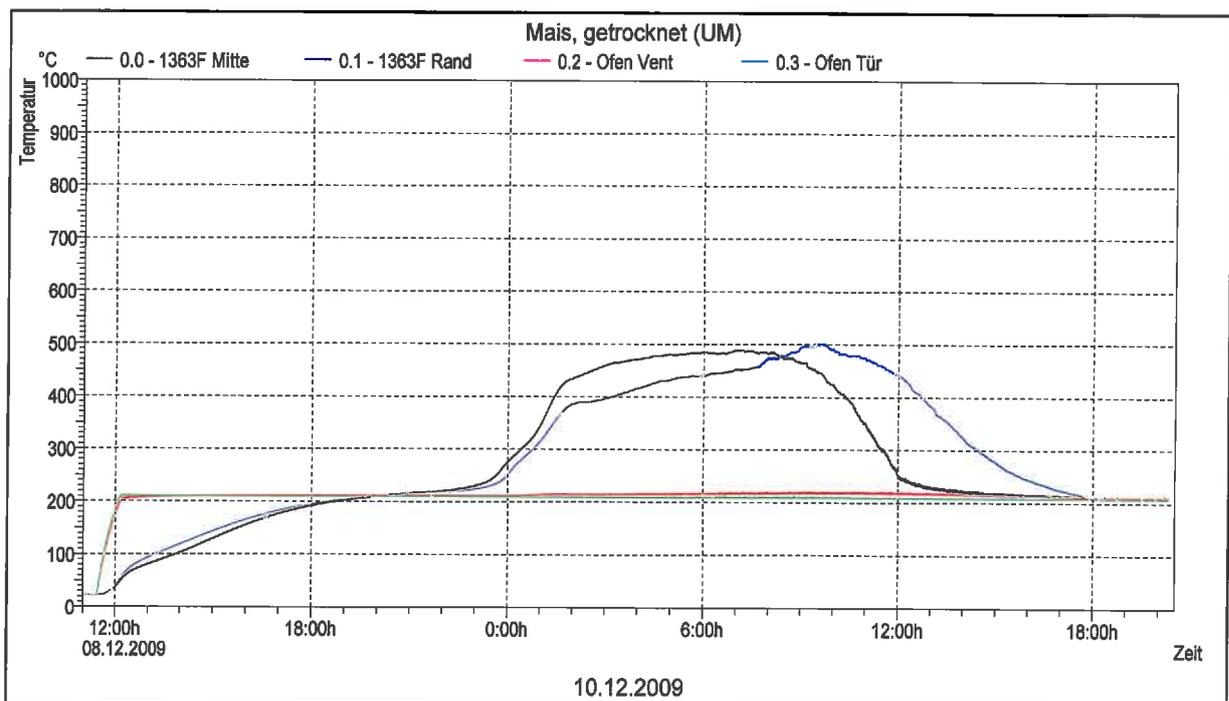
Man braucht normalerweise mehr als 2 Versuche, bis man die Temperaturen gefunden hat. Aus Sicherheitsgründen ist die Temperatur als Selbstentzündungstemperatur definiert, bei der keine Entzündung stattfindet. Die Abhängigkeit der Selbstentzündungstemperatur vom Volumen ergibt bei Auftragung log. Volumenprobe über 1/Selbstentzündungstemperatur in °K in der Regel eine Gerade (VDI 2263 Blatt 1).



Darstellung der Warmlagerversuche

Auf diese Weise lässt sich die zu erwartende Selbstentzündungstemperatur von größeren Volumina abschätzen. Die Untersuchungen wurden nicht mit dem Mais durchgeführt, der zum Zeitpunkt des Schadensfalls getrocknet wurde. Dieses Produkt war durch die Löschaktion und die zweiwöchige Lagerung im Freien verdorben. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass Warmlagerversuche mit Mais zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Bei früheren Versuchen, die im Anschluss an einen Schadensfall erfolgten, ergab sich eine andere Steigung der Geraden.

Einen Eindruck über den zeitlichen Ablauf eines Warmlagerversuches mit 800 cm³ gibt der Messschrieb:



Messschrieb 800 cm³ Mais beim Warmlagerversuch mit 210 °C

Bis das Produkt die Ofentemperatur erreicht, dauert es ca. 9 h (bei dem Versuch mit 3200 cm³ und 200 °C ca. 18 h),
 bis zum Beginn der Selbsterhitzung ca. 2,5 h (bei 3200 cm³ ca. 4 h),
 von dem Beginn der Selbsterhitzung bis zum Erreichen der 400 °C-Linie (Selbstentzündung) nochmals ca. 2,5 h (bei 3200 cm³ ca. 4 h).

Wie die Maisproben nach einem Warmlagerversuch aussehen, zeigen die folgenden 2 Bilder:



Bild 25 800 cm³ Mais – 200 °C keine Selbstentzündung



Bild 26 800 cm³ Mais – 210 °C Selbstentzündung

Die Untersuchungen machen deutlich, dass die Angaben zum Schadensfall und seinem Ablauf und die Ergebnisse der Warmlagerversuche nicht zusammenpassen.

7. Grundsätzliche Unterschiede bei der Entwicklung von Glimmnestern durch Warmlagerung und beim Betrieb von Dächerschachttrocknern

Zur Warmlagerung wird eine Probe bestimmter Größe in einen Wärmeschrank eingebracht und bei eingestellter Temperatur mindestens 48 h gehalten. Kommt es zu keiner Reaktion, wird eine frische Probe einer höheren Temperatur ausgesetzt usw. bis eine Selbstentzündung eintritt. Die Zufuhr vorgeheizter Luft beträgt in der Regel 2l/min. Der in unserem Labor verwendete Wärmeschrank hat einen Versuchsraum

von 53 l. Die eingebrachte Luft erzeugt praktisch keine Strömung. Die Selbsterhitzung tritt auf, wenn durch exotherme Reaktionen im Innern der Schüttung die produzierte Wärme nicht mehr an die Umgebung abgegeben werden kann.

Im Dächerschachttrockner sind die Verhältnisse mit dem Wärmeschrank nicht vergleichbar. Zur Trocknung wird das Produkt mit warmer Luft durchströmt. Mit welcher Luftgeschwindigkeit dies stattfindet, wird offensichtlich bei den Herstellern als ein Betriebsgeheimnis angesehen. Offizielle Auskünfte waren dazu nicht zu bekommen. Inoffiziell wurde ein Wert von 0,2 m/s genannt. Die begrenzende Größe für die Luftgeschwindigkeit im Dächerschachttrockner ist die Anströmgeschwindigkeit vom Warmluftschacht in den Trockner. Hier werden 6 – 8 m/s genannt. Dieser Wert soll nicht überschritten werden, weil sonst die Gefahr besteht, dass das Produkt „gefördert“ wird und dabei entweder den Warmluftschacht verstopft oder aus dem Abluftkanal ausgetragen wird. Die Luftgeschwindigkeit muss auch dem Produkt angepasst werden, d. h. Mais kann mit einer höheren Luftgeschwindigkeit als Raps gefahren werden.

Die Konstruktion der Dächer, die Querschnitte der Zuluftöffnungen sowie die Austrittsöffnungen unterhalb der Dächer sind bei den Herstellern sehr unterschiedlich. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 6 – 8 m/s im Zuluftbereich erscheinen Werte von 0,3 m/s und höher als Anströmgeschwindigkeit realistisch.

Solange das Produkt durchströmt wird, ist der Effekt der Selbsterhitzung nicht so leicht zu erreichen wie bei der Warmlagerung. Treten dagegen größere Ablagerungen im Trockner auf und entwickeln sich durch Selbsterhitzung Glimmnester, dann wird die Anströmung den Abbrandprozess beschleunigen.

8. Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung

Der Bau einer Versuchseinrichtung, die die Verhältnisse in einem Dächerschachttrockner genau nachbildet, war aus Kostengründen unrealistisch. Außerdem deutet der Schadensfall darauf hin, dass ein „erfolgreicher Versuch“ schnell zum Totalverlust führen kann.

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Versuchseinrichtung wurde deshalb die Mindestgröße eines möglichen Glimmnestes in Dächerschachttrocknern genommen. Mit einer Maisprobe dieser Größe sollten dann Durchströmungsversuche gemacht

werden. Die Untersuchung der Abmessungen unterschiedlicher Trockner ergab, dass sich eine Ablagerung mit einem Durchmesser von 20 cm nicht mehr durch die Trockner fördern lässt.

Mit dem Wärmeschrank in Kappelrodeck stand eine Anlage zur Verfügung, die für die Aufheizung der Warmluft, die durch die Maisschüttung gesaugt werden sollte, ausreichend Energie erzeugen konnte. Die vorhandene Raumluftabsaugung ließ sich in eine „Absaugung“ für den Versuchsbehälter umgestalten. Um die Zuluft (Warmluft) möglichst gleichmäßig in den Versuchsbehälter zu bringen, wurde die Luftführung strömungsgünstig gestaltet. Die innere Bauhöhe des Wärmeschrankes und die Anordnung und Größe des vorhandenen Abluftrohres aus dem Wärmeschrank limitierten die Gestaltungsmöglichkeiten für die Versuchseinrichtung.



Bild 27 Versuchseinrichtung



Bild 28 Wärmeschrank und Abluftleitungen

Bild 27 zeigt die Versuchseinrichtung im Wärmeschrank. Der Behälter hat einen Innendurchmesser von 21,3 cm (Vorgabe durch den verwendeten Flansch) und im zylindrischen Teil zwischen den Flanschen eine Höhe von 32 cm. Die Luftführung außerhalb des Wärmeschrankes ist auf Bild 28 zu sehen. Die Abluftleitung der Versuchseinrichtung (Innendurchmesser 47 mm) wird in eine 100 mm-Leitung geführt, die mit einem Schieber versehen ist. Mithilfe dieses Schiebers kann sowohl die

Falschlufzufuhr zur Kühlung der Verbrennungsgase aus der Versuchseinrichtung als auch die Luftgeschwindigkeit in der Versuchseinrichtung beeinflusst werden. Die 100 mm-Leitung mündet in eine 150 mm-Leitung, die die Abluft in einen Nassabscheider führt (Bild 29).



Mit dem hinter der 150 mm-Leitung liegenden Schieber kann ebenfalls Falschluf zur Regelung der Luftgeschwindigkeit in der Versuchseinrichtung eingesaugt werden.

Bild 29 Nassabscheider

8.1 Einfahren der Versuchseinrichtung mit dem Produkt Mais und Messergebnisse

Für den ersten Versuch wurde Mais in einer Höhe von 20 cm in die Versuchseinrichtung eingebracht. Wegen der begrenzten Kapazität des Datenloggers konnten nur 9 Messstellen angeschlossen werden – eine für CO und 8 Temperaturmessstellen.

Die Temperaturmessstellen verteilen sich wie folgt:

6 Messstellen in der Versuchseinrichtung

1 Messstelle in der Abgasleitung (47 mm) direkt außerhalb des Wärmeschrankes

1 Messstelle in der 150 mm-Leitung vor dem Nassabscheider

Wie die Messstellen innerhalb der Versuchseinrichtung platziert sind, ist Bild 30 zu entnehmen (s. hierzu auch Tabelle der Messpositionen auf Seite 51).

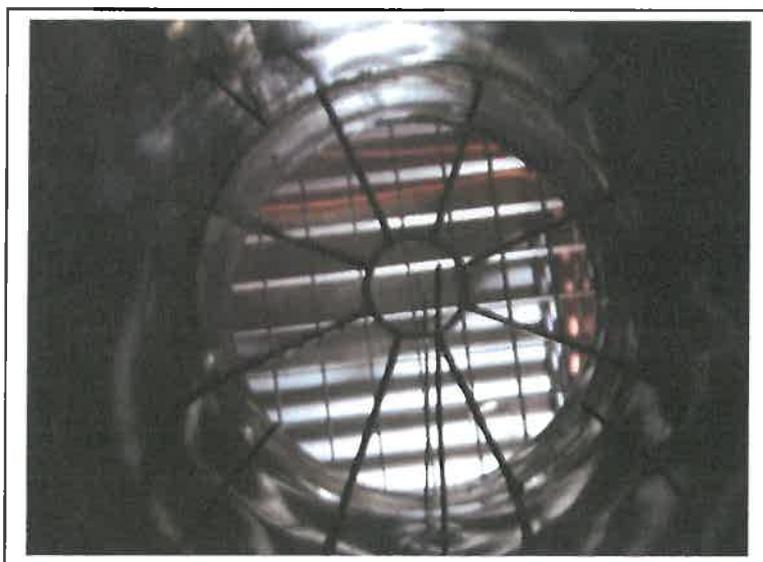


Bild 30 Messstellen in der Versuchseinrichtung

Unterhalb der Produktauflage und in 10 cm Höhe (Mitte der Maisprobe) sind die Messfühler in der Mitte angebracht. Die anderen vier Messfühler sind in 10 cm Höhe auf dem Halbkreisbogen im Winkel von jeweils 90 ° angeordnet.

Mit dieser Messanordnung sollte überprüft werden, ob sich die Temperatur beim Aufheizen gleichmäßig in der Schüttung verteilt. Sollte sich das bestätigen, würden beim nächsten Versuch die Temperaturfühler in der Mitte der Schüttung übereinander angeordnet.

Das Messgas wurde direkt oberhalb des Wärmeschrankes der Abgasleitung der Versuchseinrichtung entnommen und über eine Kupferleitung dem temperierten Vorabscheider aus Glas und dem Messgaskühler zugeführt.

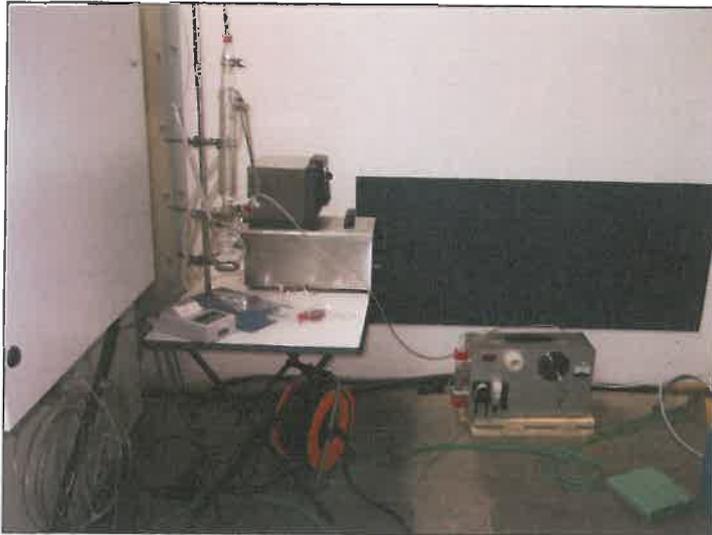


Bild 31 Messgasaufbereitung

Der Messgaskühler pumpt das Messgas zu der Messtechnik, die direkt neben dem Aufstellungsraum für den Wärmeschrank aufgebaut war.



Bild 32 Messtechnik und Datenverarbeitung

Bei der Messtechnik wurde auf das Labormessgerät mit dem Messbereich von 6 Vol% zurückgegriffen. Rechnet man die Versuchsergebnisse für Mais mit dem ersten Maximum von ca. 0,18 l CO/min (s. Punkt 4.2.2) für 400 cm³ auf das höhere Volumen von 7,12 l Mais um, ergibt sich ein Wert von 3,2 l CO/min. Um eine Strömung von 0,3 m/s in der Versuchseinrichtung zu erreichen, ist eine Luftmenge von 641 l/min erforderlich. Unter diesen Bedingungen sind 0,5 Vol% CO zu erwarten.

Zur Aufheizung wurde eine Rampe bis 230 °C mit einer Steigung von 10 °C/h gewählt. Sollten Reaktionen im Produkt auftreten, könnte man sie direkt den entsprechenden Temperaturen zuordnen. Wegen der Differenzen zwischen der vom Wär-

meschrank angegebenen und der in der Versuchseinrichtung gemessenen Temperatur erfolgte im Laufe des Versuchs eine Anhebung der Rampe auf 260 °C.

Unter den Bedingungen der Warmlagerversuche wäre mit 7,12 l Mais nach langer Aufheizzeit eine Selbstentzündung im Bereich von 190 °C zu erwarten gewesen (siehe Punkt 6).

Der Einfluss der Durchströmung auf das Messergebnis konnte noch nicht abgeschätzt werden. Aus früheren Versuchen zum Explosionsschutz in Silofahrzeugen (siehe Literatur) war bekannt, dass es beim Durchströmen von Stäuben mit heißer Druckluft zu schnellen Temperaturanstiegen in den 400 cm³-Proben kam.

Der Wärmeschrank besitzt einen Anschluss und ein Verteilsystem für Inertgas. Da der Ausgang des Versuches nicht vorhersehbar war, wurde eine 200 l-Gasflasche mit Stickstoff angeschlossen, um im Fall einer Gefahr die Reaktion zu beeinflussen. Außerdem ist der Wärmeschrank mit einer Druckentlastung versehen.

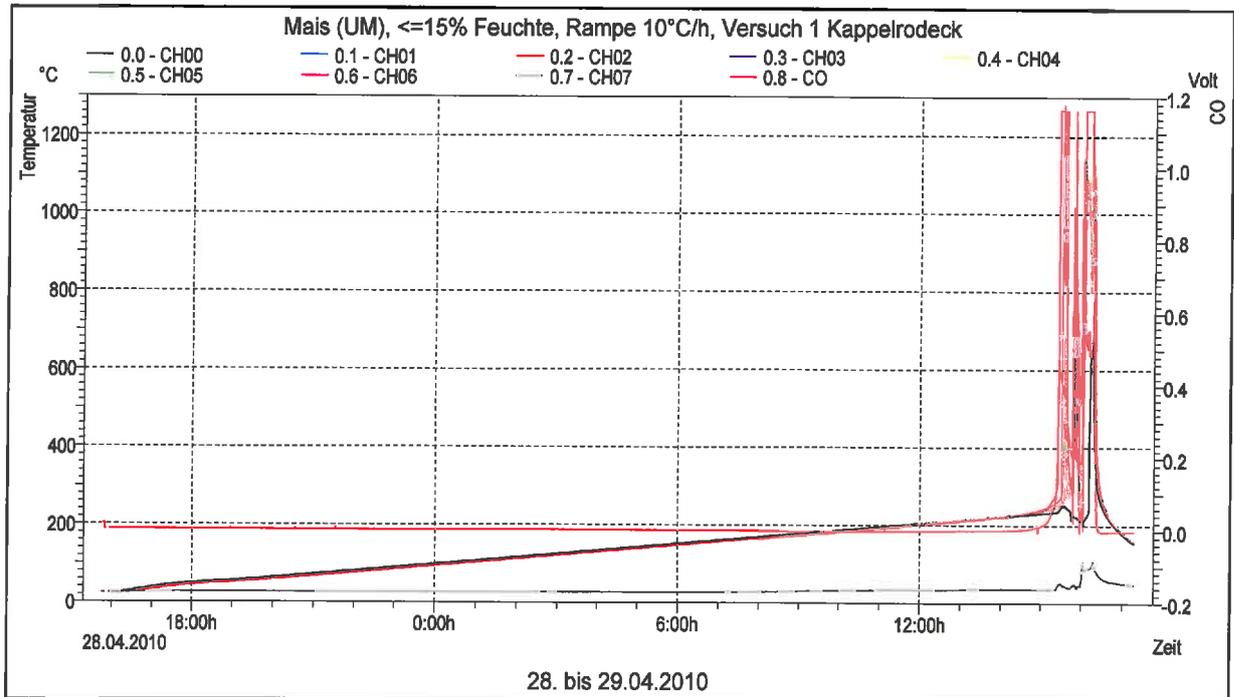
Die Luftgeschwindigkeit sollte auf 0,3 m/s eingestellt werden. Um das Absaugsystem möglichst turbulenzfrei zu halten, wurde die Geschwindigkeitseinstellung nur mit dem Schieber vor dem Nasswäscher vorgenommen. Die Luftgeschwindigkeitsmessungen erfolgten mit einem thermischen Kugelsensor 4 mm Typ Testo 452. Versuche mit der Prandtl-Sonde wurden wegen der zu geringen Drücke aufgegeben. Gemessen wurde die Luftgeschwindigkeit beim Abgasrohr der Versuchseinrichtung mit drei Messpunkten, ansonsten mit fünf Messpunkten (jeweils in der Mitte und auf den Schwerkreisen der flächengleichen Kreisringe).

Aufgrund des kurzen Einlaufbereiches erfolgte die Messung der Luftgeschwindigkeit oberhalb der Schüttung. Die Messungen können im Hinblick auf die Randbedingungen und mit dieser Messtechnik nicht den Anspruch hoher Präzision erheben. Die Schwankungsbreite der Messungen in der Abgasleitung (Messpunkt im Bereich der Messposition T12) vor dem Beginn des Versuches lag – umgerechnet auf die Versuchseinrichtung – zwischen 0,28 – 0,32 m/s.

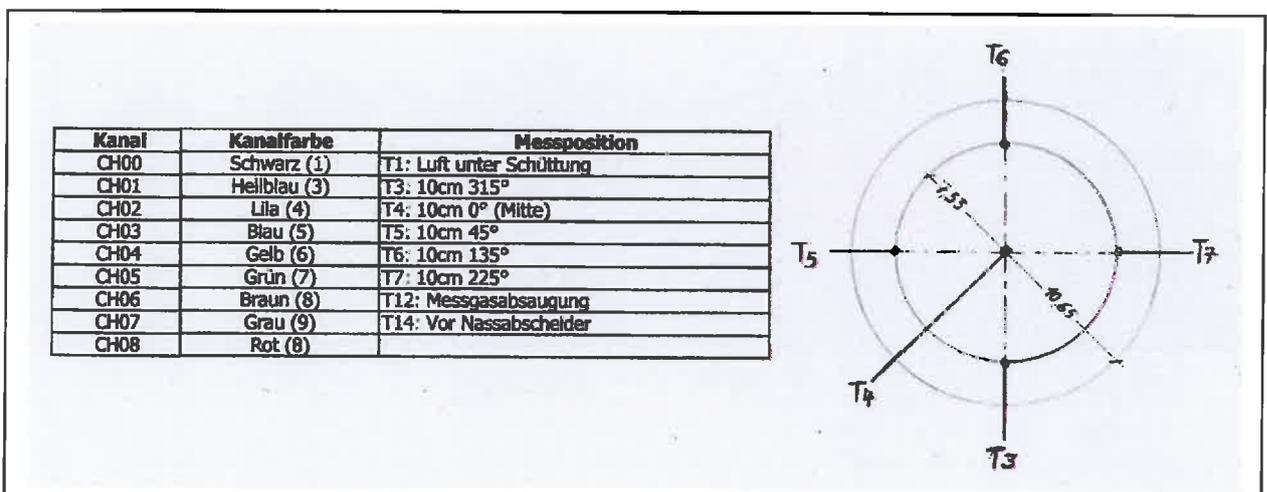
Nach dem Beginn der Beheizung der Versuchseinrichtung stand der Messpunkt im Bereich der Messposition T12 nicht mehr zur Verfügung, da die zulässige Temperatur für den thermischen Kugelsensor max. 70 °C beträgt. Es wurde auf den Mess-

punkt vor dem Nassabscheider (s. Bild 29) ausgewichen. Die Messungen erfolgten bei Abgastemperaturen an der Messposition T12 von 70, 120, 170 und 220 °C. Die Mittelwerte schwankten zwischen 7,25 – 7,4 m/s. Eine Temperaturabhängigkeit konnte nicht festgestellt werden.

Einen Überblick über das Ergebnis des Versuches vom 28. – 29.04.2010 gibt der folgende Messschrieb:



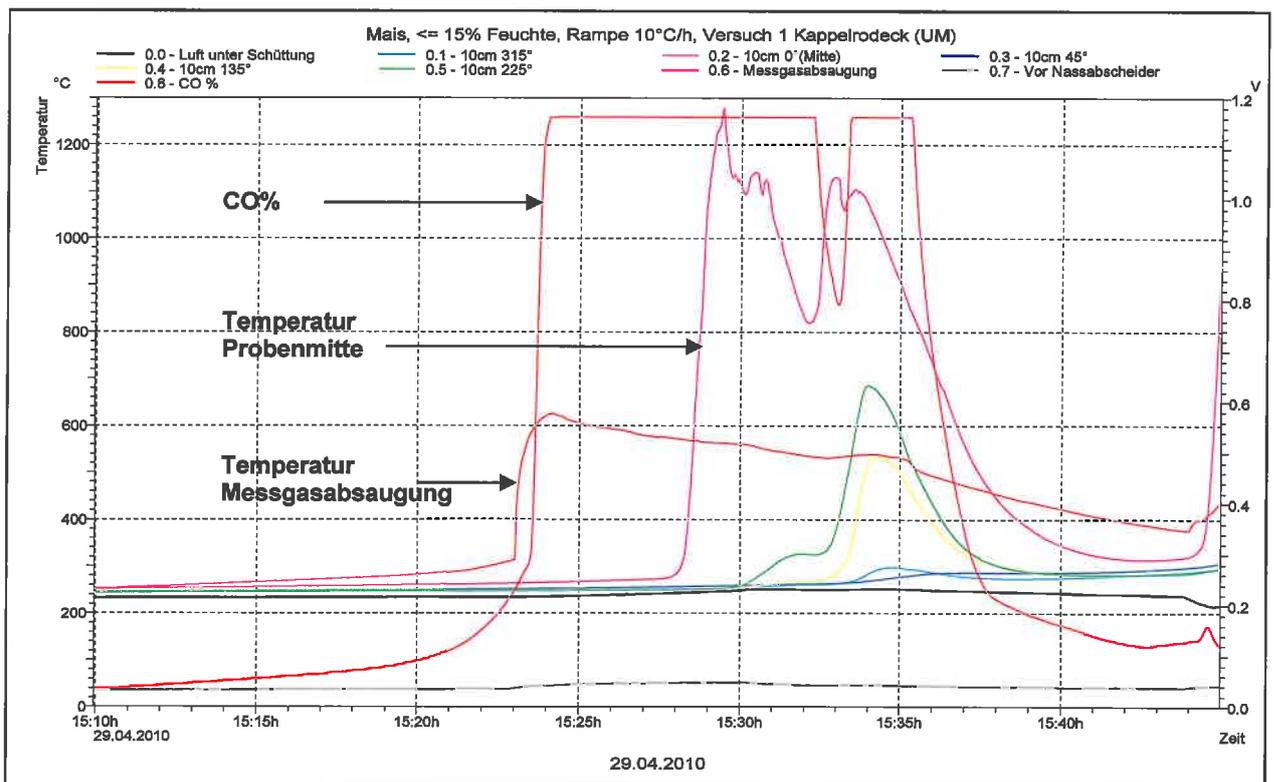
Die einzelnen Messpositionen und ihre farbliche Kennzeichnung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:



Wie zu ersehen ist, steigt die Aufheizphase bis ca. 225 °C gleichmäßig (14:20 h). Alle Messpunkte innerhalb der Versuchseinrichtung stimmen gut überein. 50 Minuten später (15:10 h) liegen die Temperaturen noch eng beieinander (ca. 234 °C– 250 °C). Wegen des in der Folge auftretenden schnellen Ablaufs der Ereignisse wird zuerst der Zeitraum zwischen 15:10 h – 15:45 h gesondert dargestellt.

An dieser Stelle einige Angaben zu den T_{90} -Zeiten:

CO-Messgerät		22 s
Temperaturfühler: Wärmeübergang im Wasser		2,6 s
Wärmeübergang in der Luft		34 s

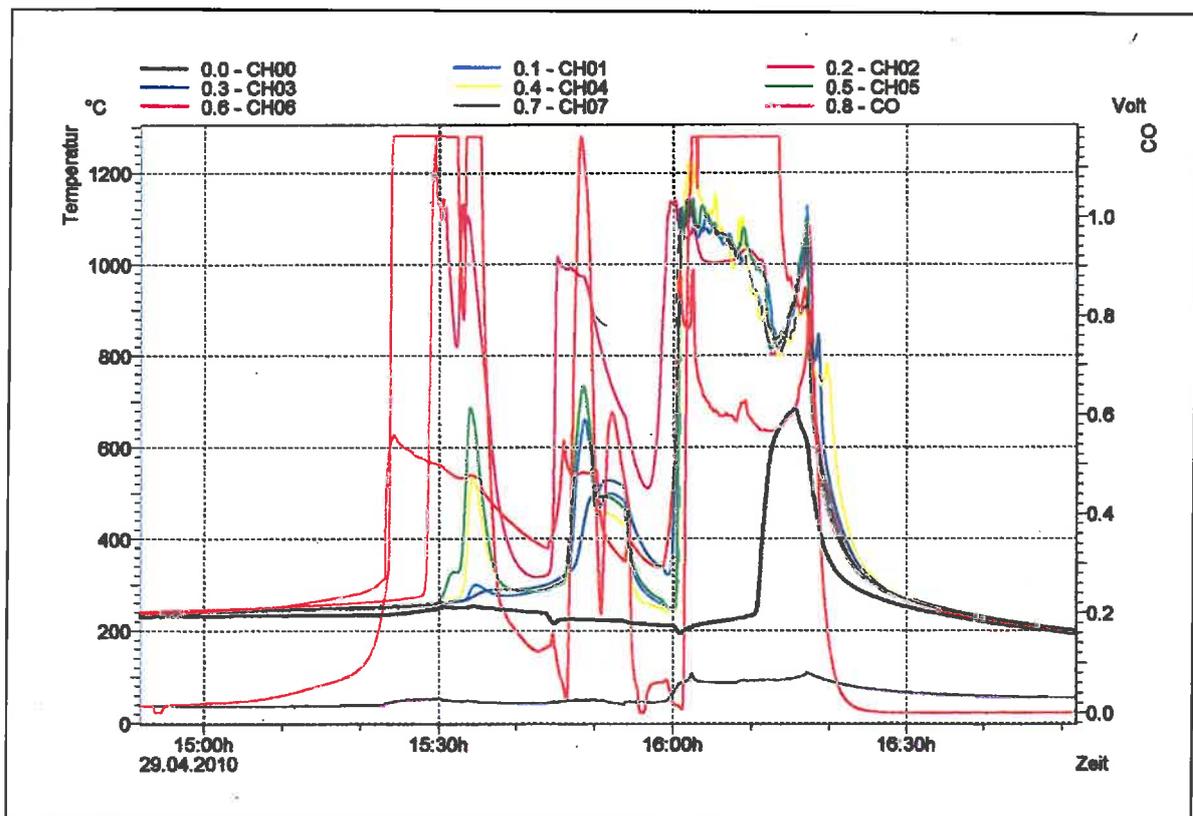


In den ersten 10 Minuten steigt die Abluft fast linear um 24 °C, die anderen Temperaturen um 4 – 6 °C. Der CO-Wert liegt zu diesem Zeitpunkt – unter Abzug der Laufzeit des Messgases – bei ca. 0,48 Vol%. Aufgrund der Laufzeit von 30 s verschiebt sich der CO-Schrieb um 30 s nach links. Damit liegt er im Bereich der Ablufttemperatur. Der scharfe Knick in der Temperaturkurve deutet darauf hin, dass die Rauchgasentwicklung (CO-Entwicklung) die Temperatur steil ansteigen lässt. Nach dem Erreichen des Maximum sind die CO-Werte außerhalb des Messbereiches. Die fallende Abgas-temperatur lässt auf einen hohen Peak schließen, der langsam fällt. Nach 5 Minuten steigt die Temperatur des in der Mitte der Schüttung platzierten Temperaturfühlers

(T₄) sprunghaft (innerhalb 1 Minute) von 280°C auf 1280°C (Messbereich bis 1200°C)

Um die durchgehende Reaktion zu beherrschen, wurde um ca. 15:30 h der Wärmeschrank abgestellt und mit Stickstoff geflutet.

Der gesamte Vorgang vom Beginn bis zum Ende der Reaktion ist dem folgenden Messschrieb zu entnehmen:



Messschrieb von 14:40 – 17:00 h

Nach dem ersten Stickstoffeinsatz war klar, dass die Stickstoffmenge nicht ausreicht, um die Reaktion abubrechen. Deshalb wurde der Stickstoff in Intervallen zugegeben, um die CO-Entwicklung und die Temperaturen zu reduzieren. Vor dem Ende des Stickstoffvorrates nach ca. einer halben Stunde wurde der Bunker geschlossen, die Durchströmung der Versuchseinrichtung aber aufrecht erhalten. Alle Temperaturfühler innerhalb der Versuchseinrichtung erreichten danach – mit Ausnahme des Fühlers in der Zuluft - maximale Temperaturwerte über 1100 °C. Der Zuluftfühler (in der Versuchseinrichtung 2 cm unterhalb des Produktes positioniert) erreichte eine maximale Temperatur von 680 °C. Innerhalb einer halben Stunde fielen die Tempe-

raturen auf 280 – 255 °C. Die Mischlufttemperatur vor dem Nasswäscher stieg während dieser Zeit für 20 Minuten auf Werte bis zu 100 °C. Die Versuchsanlage kühlte in ca. 8 h auf Raumtemperatur ab. Danach konnte sie problemlos geöffnet werden. Das Produkt war vollständig verbrannt und die Asche mit der Abluft ausgetragen.

Die Bilder zeigen die Versuchseinrichtung nach dem Versuch. Sie hat die hohen Temperaturen gut überstanden.

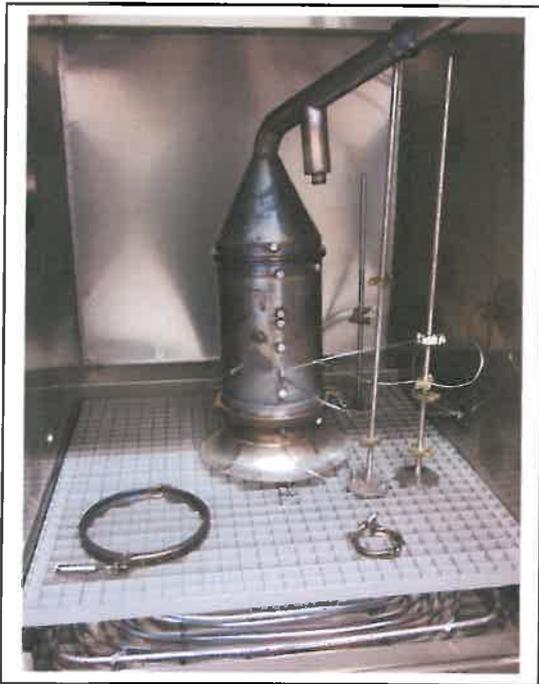


Bild 33 Nach dem Versuch



Bild 34 Nach dem Versuch



Bild 35 Aschereste nach dem Versuch

8.2 Diskussion der Ergebnisse

Auch bei den Warmlagerversuchen mit Innenbehälter und 8 l/min Luftzufuhr lagen CO-Anstieg und Temperatur des Produktes bei den Versuchen mit Mais nahe beieinander. Berücksichtigt man die größere Gaslaufzeit von 2:30 min, sind die Verhältnisse dem jetzigen Versuch ähnlich.

Für das spätere Auftreten des Temperaturanstiegs kann eine Glimmnestbildung oberhalb des mittig angebrachten Temperaturfühlers angenommen werden. Für diese Vermutung sprechen

- der Einfluss der Strömung,
- die T_{90} -Zeit des Messfühlers,
(Beim Temperaturanstieg ist – zumindest anfangs – von einer Wärmestrahlung auszugehen und nicht von einem direkten Kontakt.)
- die Temperatur des Messfühlers unterhalb der Schüttung
(Sie zeigt keine Veränderung).

Außerdem scheint das Glimmnest nicht genau in der Mitte, sondern etwas in Richtung der Messpunkte T_6 und T_7 versetzt. Als gegen 15:30 h Stickstoff in den Wärmeschrank eingebracht wurde, waren diese beiden Messstellen im Anstieg begriffen. Der Zeitabstand zu T_4 betrug 2 Minuten.

Trotz der Stickstoffzufuhr zeigen 3 Minuten später auch die Temperaturfühler T_3 und T_5 eine Tendenz zum Temperaturanstieg.

Die Temperaturanstiege geben Hinweise auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Die Abstände der Fühler zur Mitte betragen 7,5 cm. Ausgehend von dem ersten Signal dauert es – trotz des Stickstoffeintrags – nur ca. 11 Minuten, bis sich die Reaktion quer durch die Schüttung ausgebreitet hat. Und nach dem Ausfall des Stickstoffs erreichen alle Temperaturfühler noch Temperaturen über 1100 °C.

Die höchste Temperatur bei den Warmlagerversuchen mit Mais betrug 620 °C.

Die Unterschiede bei der Temperatur und dem CO-Anstieg sind in Bezug auf die Warmlagerversuche so gravierend, dass ein anderer Reaktionsablauf in Betracht gezogen werden muss.

Der Versuch gibt auch einen Hinweis darauf, wie der Schaden (Punkt 6) abgelaufen sein könnte. Über einen langen Temperatureinfluss hat sich in einem entsprechend

großen Volumen ein Glimmnest gebildet. Das umgebende Produkt trocknet aus und nach der Selbstentzündung des Glimmnestes kommt – unter dem Einfluss der Durch- und Umströmung – eine schnelle Reaktion in Gang.

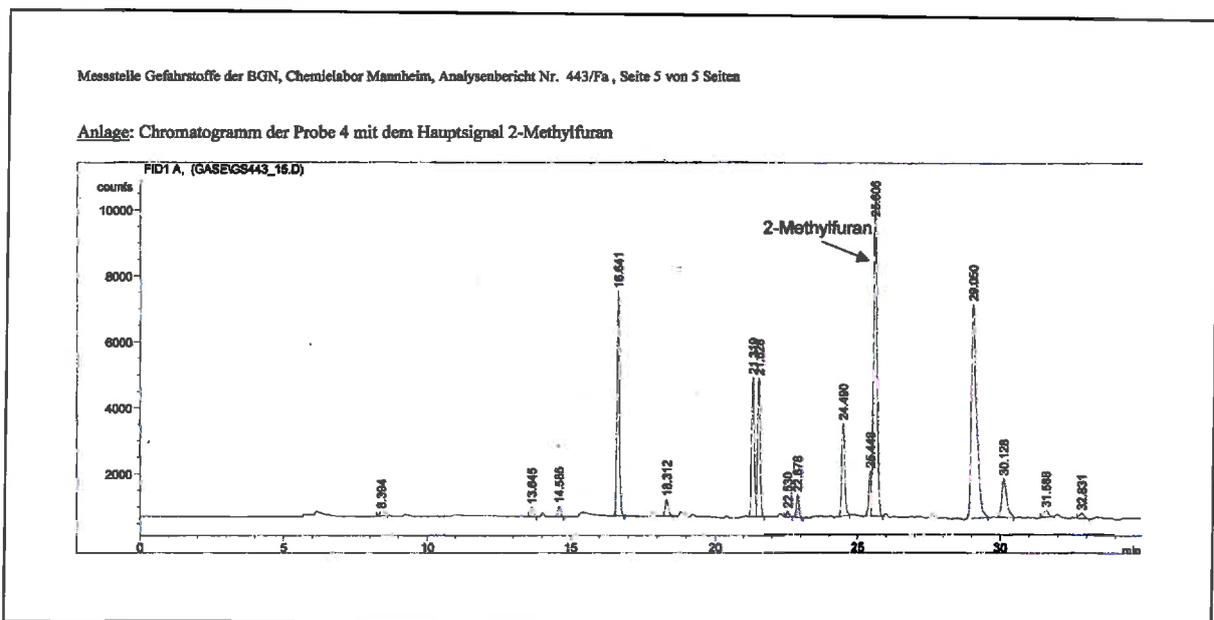
9. Versuche mit Mais zur Identifikation weiterer flüchtiger Stoffe

Im Labor der BGN Mannheim wurden bei einem Versuch mit 400 cm³ Mais im Wärmeschrank (mit Innenbehälter) Abluftproben genommen und im Chemielabor analysiert. Die Probenahme erfolgte in dem für die Brandföherkennung besonders wichtigen Temperaturbereich bis 300 °C.

Dabei zeigte sich CO als der dominierende Stoff.

Aliphatische Kohlenwasserstoffe (Methan – Heptan) wurden nicht nachgewiesen.

Die sonstigen flüchtigen Stoffe können in einem Temperaturbereich (Probe 4) zwar als Summe den CO-Wert übersteigen (CO = 2,44 mg/l; Σ flüchtige organische Stoffe 4,7 mg/l) bieten aber als einzelne Stoffe nur theoretische Chancen für eine relevante messtechnische Erfassung. Für die Probe 4 wurde der herausragende Stoff 2-Methylfuran bestimmt. Aus dem Chromatogramm ist ersichtlich, wie gering der Anteil des Stoffes bezogen auf die Summe der Stoffe ist.



Probe 4 Analyseberichte s. Anhang.

10. Möglichkeiten des Einsatzes der CO-Detektion in Dächerschachtrocknern

Grundsätzlich ist die CO-Detektion geeignet, Glimmnester in Dächerschachttrocknern zu erkennen, wobei – wie die Versuche von Raps zeigen – die zu erwartende CO-Emission stark von dem jeweiligen Produkt beeinflusst wird.

Für einen erfolgreichen Einsatz der CO-Detektion in der Praxis scheint eine Auseinandersetzung mit nachfolgend kurz skizzierten Problemen erforderlich:

- **Die Vorbelastung durch CO**
Direkte Feuerungen, z. B. Gas-Flächenbrenner, oder defekte indirekte Feuerungen heben die Alarmschwellen stark an.
Der Dächerschachttrockner im Druckbetrieb hatte schon eine gemessene Vorbelastung bis zu 7,4 ppm. Ob das aber die obere Grenze über die gesamte Trocknungskampagne war, ist nicht sicher.
- **Probleme bei der Aufstellung**
Im Bereich der Dächerschachttrockner gibt es kaum geeignete Aufstellräume für eine so empfindliche Messtechnik. Wie sich bei den Versuchen gezeigt hat, machen Staubablagerungen den Betrieb von beheizten Probenahmeleitungen und Messgaskühlern zu einem nicht kalkulierbaren Risiko, insbesondere wenn die Kontrollen solcher Räume erschwert sind (keine Aufzüge, Zugang über Steigleitern).
- **Probleme bei der Probenahme**
Bei größeren Anlagen wird die Abluft über mehrere Kamine verteilt, die in die Probenahme mit eingebezogen werden müssen.
Das Problem der Strähnenbildung in den Abluftkanälen kann nicht nur bei Anlagen im Druckbetrieb eine Rolle spielen.

Auf der anderen Seite haben Dächerschachttrockner den Vorteil, dass entstehende Glimmnester nicht innerhalb des Trockners als Zündquelle für Staubexplosionen auftreten. Um dieses Risiko zu minimieren, wurden die Alarmschwellen in der Milchindustrie bis in Bereiche von 0,3 ppm herabgesetzt.

Literaturverzeichnis

- [1] Beschreibung der Forschungszusammenarbeit der FSA e. V. mit der R+V Allgemeine Versicherung AG
- [2] Zockoll, C. – Früherkennung von Bränden durch CO-Detektion. VDI-Berichte 1272, Sichere Handhabung brennbarer Stäube 1996
- [3] VDI 2263 Blatt 1: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben
- [4] Fa. Goldsaat Agrartechnik GmbH – Bedienungs- und Wartungsanleitung für Körnertrockner
- [5] G. Beck, S. Kleinhans – Explosionsschutz an Silofahrzeugen für Nahrungs- und Futtermittel, VDI-Berichte 1272, Sichere Handhabung brennbarer Stäube 1996

Anhang

Messpositionen und Farben bei den Laborversuchen

Warmlagerversuche im Wärmeschrank

Messposition	Farbe
Temperatur in der Mitte der Produktprobe (Mitte)	schwarz
Temperatur am Rand der Produktprobe (Rand)	blau
Lufttemperatur im Ofen im Bereich des Ventilators gemessen (Ofen Vent)	rot
Lufttemperatur im Ofen im Bereich der Tür gemessen (Ofen Tür)	grün

Warmlagerversuche mit CO-Messung im neuen Versuchsbehälter (Innenbehälter)

Messposition	Farbe
Temperatur in der Mitte der Produktprobe (Produkt Mitte)	schwarz
Temperatur am Rand der Produktprobe (Produkt Rand)	blau
Lufttemperatur im Innenbehälter unterhalb des Produktes (Unter Prod)	rot
Lufttemperatur im Innenbehälter oberhalb des Produktes (Über Prod)	grün
Lufttemperatur im Ofen (Ofen)	lila
CO-Messung in ppm (Messbereich 0 – 300 ppm)	braun (gestrichelt)
CO-Messung in Vol% (Messbereich 0 – 6 Vol%)	braun

BGN
Geschäftsbereich Prävention
Messstelle Gefahrstoffe
Dynamostraße 7-11
68165 Mannheim



BGN
Berufsgenossenschaft
Nahrungsmittel
und Gaststätten

Chemielabor Mannheim
Tel.: 0621 4456 3495
Fax: 0621 4456 3499
E-Mail des Verfassers: Juergen.Fauss@bgn.de

Analysenbericht

Analysenbericht Nr.: 443/Fa Datum: 12.08.2010

zum FSA-Projekt F 05-0803
(„Brandfrüherkennung bei der Getreide-
trocknung durch CO-Detektion)

Verfasser des Analysenberichts: Dr. Fauss

Auftraggeber: Herr Zockoll, Herr Kleinhans

Betrieb: BGN – Abteilung 8 (Staublabor)
Dynamostr. 7-11
68165 Mannheim

Produkt-Nr.: 1363F (Maiskörner, getrocknet)
Herkunft des Produkts: Raiffeisen-Kraftfutterwerk Kehl

Probenahmen/Messungen durchgeführt von: Dr. Fauss

am: 13.07.2010

Analysen durchgeführt von: Dr. Fauss

Datum der Analysen: 13. & 15. 07.2010

Probe-Nr. / Probenahme-Zeitraum	Probeluft- volumen	korrespondierende		Probenträger	emittierter Gefahrstoff ¹	BG _{rel} / mg/l Luft	Konz./ mg/l Luft
		Temperatur	CO-Konz.				
Probe 1 13.7.10 / 07:18 - 07:21	ca. 3 l	207 °C	270 ppm	Tedlar® Gassammel- sack 5 Liter, Fa. Supelco	niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe, Σ	0,015	n.n.
			≅ 0,31 mg/l		sonstige flüchtige organische Stoffe, Σ		< 0,015
Probe 2 13.7.10 / 07:48 - 07:49	ca. 0,8 l	216 °C	0,06 %	Tedlar® Gassammel- sack 1 Liter, Fa. Supelco	niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe, Σ	0,015	n.n.
			≅ 0,70 mg/l		sonstige flüchtige organische Stoffe, Σ (Acetaldehyd, Furan, 2-Methylfuran, Furfural 3-Methylbutanal, Butyrolacton)		0,040
Probe 3 13.7.10 / 08:18 - 08:19	ca. 0,5 l	228 °C	0,10 %	Tedlar® Gassammel- sack 1 Liter, Fa. Supelco	niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe, Σ	0,015	n.n.
			≅ 1,16 mg/l		sonstige flüchtige organische Stoffe, Σ		0,40

¹ Das Analysesystem wurde auf den Nachweis von niedrigsiedenden aliphatischen Kohlenwasserstoffen (Methan => Heptan) eingestellt

Probe-Nr. / Probenahme-Zeitraum	Probeluft- volumen	korrespondierende		Probenträger	emittierter Gefahrstoff ¹	BG _{rel} / mg/l Luft	Konz./ mg/l Luft
		Temperatur	CO-Konz.				
Probe 4 13.7.10 / 08:45 - 08:48	ca. 3 l	240 °C	0,21 %	Tedlar® Gassammel- sack 5 Liter, Fa. Supelco	niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe, Σ sonstige flüchtige organische Stoffe, Σ (Ameisensäure, Essigsäure, Acetamid, Propionsäure, Furfural, 2-Methylfuran, Phenol, 3-Methylbutanal, Propionamid, Butyrolacton)	0,015	n.n.
			≅ 2,44 mg/l			0,015	4,7
Probe 5 13.7.10 / 09:13 - 09:14	ca. 0,8 l	300 °C	0,75 %	Tedlar® Gassammel- sack 1 Liter, Fa. Supelco	niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe, Σ sonstige flüchtige organische Stoffe, Σ (Acetaldehyd, Furfural, 2-Methylfuran, Phenol, Furan, 3-Methylbutanal, 2-Methylbutanal, Furan, 2-Butanon, 2,5-Di- methylfuran, 2-Methyl- propanal, Butyrolacton)	0,015	n.n.
			≅ 8,73 mg/l			0,015	2,8

Konz. Konzentration der Gefahrstoffe; BG_{rel} relative Bestimmungsgrenze des Messverfahrens
n. n. nicht nachweisbar; die relative Nachweisgrenze beträgt 30 % der relativen Bestimmungsgrenze des Messverfahrens

Messverfahren[†] und BGN-Methoden-Nr.:

Niedrigsiedende aliphatische Kohlenwasserstoffe

Ableitung der Emissionen in Gassammelsack, Druckluftfluss ca. 1 l/min, manuelle Injektion eines Probeluft-Aliquots, GC/FID, Hausmethode*

Flüchtige organische Stoffe in Materialproben

Schüttelinkubation eines Probeluft-Aliquots bei 70 °C für 30 min, Injektion eines Teils der Dampfphase, GC/MSD, AA 7.1.2, Nr. 66*

Bemerkungen:

Die Messungen erfolgten im Rahmen eines Versuchsaufbaus, der die parallele Bestimmung von Kohlenmonoxid und flüchtigen organischen Stoffen im Emissionsstrom einer Maisprobe, die einem kontinuierlichen Temperaturanstieg ausgesetzt war, erlaubt.

Die Gassammelsäcke wurden vor der Verwendung mehrfach mit reinem Stickstoff gespült.

In Vorversuchen wurden bei Produkttemperaturen < 200 °C keine Signale am FID erhalten.

Injiziert wurden jeweils 250 – 500 µl im split-Modus mit einem split flow von 12 ml/min.

Es konnten keine kurzkettigen aliphatische Kohlenwasserstoffe im Abluftstrom nachgewiesen werden. Zu Vergleichszwecken wurden die Kohlenwasserstoffe von Petroleumbenzin sowie Feuerzeuggas chromatografiert.

Die Bestimmungsgrenze wurde anhand des Signal/Rausch-Verhältnisses abgeschätzt. Die Quantifizierung erfolgte über eine definierte Hexan-Konzentration (Gasmaus).

Die Identifizierung der am FID erhaltenen Signale erfolgte beispielhaft in den Luftproben 2, 4 und 5 über einen massenselektiven Detektor im Head Space-Verfahren (MSD; Methode 66).

Es handelt sich bei den identifizierten Emittenten in der Hauptsache um kurzkettige Aldehyde (z.T. verzweigt), kurzkettige organische Säuren und deren Amide sowie Furan zusammen mit verschiedenen Abkömmlingen. Alle genannten Stoffe sind sauerstoffhaltige, organische Moleküle mit einem relativ geringen Molekulargewicht.

Die angegebenen Konzentrationen der Nichtkohlenwasserstoffe verteilen sich im höheren Temperaturbereich auf etliche Signale, wobei 2-Methylfuran als eines der Hauptsignale identifiziert werden konnte (s. Anlage).

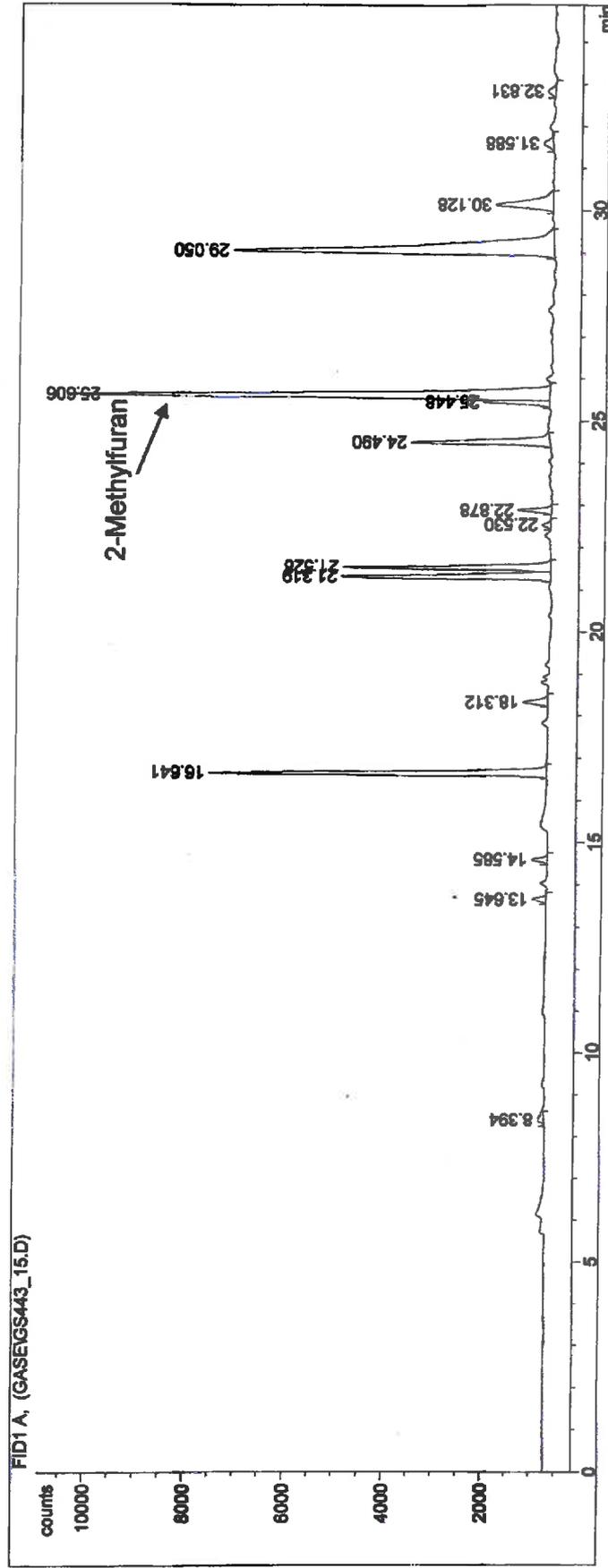
Mannheim, 12.08.10

Dr. Jürgen Fauss, stv. Laborleiter / verantwortlicher Prüfer

Anlage: Chromatogramm

[†] die Messstelle der BGN ist für die mit Sternchen (*) gekennzeichneten Messverfahren nicht akkreditiert

Anlage: Chromatogramm der Probe 4 mit dem Hauptsignal 2-Methylfuran



BGN
Geschäftsbereich Prävention
Messstelle Gefahrstoffe
Dynamostraße 7-11
68165 Mannheim



Chemielabor Mannheim
Tel.: 0621 4456 3495
Fax: 0621 4456 3499
E-Mail des Verfassers: Juergen.Fauss@bgn.de

Analysenbericht

Analysenbericht Nr.: 441/Fa Datum: 13.08.2010

zum FSA-Projekt F 05-0803
(„Brandfrüherkennung bei der Getreide-
trocknung durch CO-Detektion)

Verfasser des Analysenberichts: Dr. Fauss

Auftraggeber: Herr Zockoll, Herr Kleinhaus

Betrieb: BGN – Abteilung 8 (Staublabor)
Dynamostr. 7-11
68165 Mannheim

Probenahme/Messung durchgeführt von: Herrn Kleinhaus

Datum des Probeneingangs: 17.06. & 13.07.10

Analysen durchgeführt von: Herrn Dr. Fauss

Datum der Analysen: 21.06.10, 05. & 14.07.10

Probenbezeichnung	Probenein- gangs-Nr.	Lagerart	Lagerdauer/ Tage	Material, Bezeichnung	Aussehen/Form	Identifizierter emittierter Gefahrstoff ¹	Relative Intensität ²
1363F	13494	kühl	4 - 18	Mais, getrocknet; Kondensat nach Kühler, WLV Kappelrodeck	braungelbe Flüssigkeit, mit dunkelbraunen Partikeln durchsetzt (ca. 1 ml im Head Space- Glas)	Essigsäure Phenol Propionsäure 4-Hydroxybuttersäure 4-Methylphenol Cyclohexanon 3-Methyl-2-cyclopenten-1-on Buttersäure Acetaldehyd 3-Furanmethanol 3-Methylbuttersäure 2,3-Dihydro-2,5-dimethylfuran Methylthiocyanat 3-Methyl-2-Furanon 2-Methylphenol Aceton Pyridin Tetramethylpyrazin 2,3-Dimethyl-2-cyclopenten-1-on	100 53 39 24 16 16 10 9 8 7 6 5 5 5 4 4 3 3 3

¹ Inkubation bei 120 °C für 30 min

² TIC-Signale des GC/MSD im SCAN-Modus (Hauptsignal = 100), jeweils normiert auf das größte Signal (Essigsäure)

Probenbezeichnung	Probenein- gangs-Nr.	Lagerart	Lagerdauer/ Tage	Material, Bezeichnung	Aussehen/Form	Identifizierter emittierter Gefahrstoff ¹	Relative Intensität ²
1363F	13519	kühl	1	Mais, getrocknet; Kondensat nach Kühler, Staublabor Mannheim	orangerote, klare Flüssigkeit (ca. 2 ml im Head Space- Glas)	Furfural 5-Methyl-2-furfural Essigsäure 2,3-Butandion (Diacetyl) 1-Acetoxy-2-Butanon 2-Acetyl-furan Methylisobutylketon Aceton Hydroxyacetone Propionsäure 2-Butanon Acetoxyacetone Acetaldehyd 3-Methyl-3-buten-2-on 3-Methyl-butanal	100 44 28 14 13 12 12 10 8 6 5 5 5 4 3

¹ Inkubation bei 120 °C für 30 min

² TIC-Signale des GC/MSD im SCAN-Modus (Hauptsignal = 100), jeweils normiert auf das größte Signal (Furfural)

Messverfahren[‡] und BGN-Methoden-Nr.:

Flüchtige organische Stoffe in Materialproben
Schüttelinkubation bei 120 °C für 30 min, Injektion eines Teils der Dampfphase, GC/MSD,
AA 7.1.2, Nr. 66*

Bemerkungen:

Identifizierung der flüchtigen organischen Komponenten im SCAN-Modus durch
Bibliotheksvergleich der zugehörigen Massenspektren.

Das angewendete Analyse-Verfahren bestimmt die Emissionen von Materialproben, welche
Rückschlüsse auf deren Zusammensetzung erlauben, diese aber nicht 1:1 widerspiegeln.

Diese Vorgehensweise ist angesichts des Projektzieles - Charakterisierung von Brenngasen -
m. E. sinnvoller als die Analytik der tatsächlichen Zusammensetzung der Kondensate.

Beide Proben emittieren in der Hauptsache leichtflüchtige organische Stoffe, die Sauerstoff im
Molekül enthalten. Es sind dies kurzkettige organische Säuren (Essigsäure, Propionsäure),
Aldehyde (Furfural, Methylfurfural, Acetaldehyd, Methylbutanal), Ketone (Diacetyl, Aceton,
2-Butanon, Methylisobutylketon, Cyclohexanon), Furane (Furfural, Acetylfuran, Furanmethanol)
und Phenole (Phenol, Methylphenol).

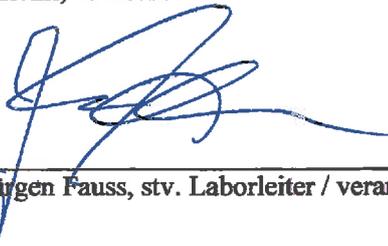
Kohlenwasserstoffe wurde lediglich in vernachlässigbaren Mengen nachgewiesen.

Das Spektrum der im neueren Kondensat (Probe 13519) nachgewiesenen Verbindungen enthält
weitgehend die Stoffe, welche auch im gasförmigen Zustand an derselben Versuchsanordnung
nachgewiesen wurden (s. Bericht 443/Fa vom 12.8.10).

Im Rahmen der Untersuchung der Emissionen beim Trocknen / Rösten von Gerste im
Labormaßstab wurden ähnliche Ergebnisse wie die hier beschriebenen erzielt (s. die an Herrn Dr.
Kroder gerichteten Analysenberichte 220a/Fa vom 24.1.08 sowie 220b/Fa vom 26.3.08).

Unter den angewendeten Bedingungen können sehr leichtflüchtige organische Verbindungen wie
Methan bis Propan oder Formaldehyd nicht nachgewiesen werden; ebenso Gase wie Kohlen-
oder Stickoxide.

Mannheim, 13.08.10



Dr. Jürgen Fauss, stv. Laborleiter / verantwortlicher Prüfer

[‡] die Messstelle der BGN ist für die mit Sternchen (*) gekennzeichneten Messverfahren nicht akkreditiert