



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Analyse der Brandgefährdungsprozesse und Synthese eines risikobasierten Brandsicherheitskonzeptes für Anlagen zum Trocknen von Cerealien im industriellen Mengenmaßstab

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Torge Brüning

Wuppertal 2022

Name: Dipl.-Ing. Torge Brüning
Geburtstag / -ort: 03.07.1979 / Herford

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske
Bergische Universität Wuppertal

Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing. Uli Barth
Bergische Universität Wuppertal

Gutachter: Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Roland Goertz
Bergische Universität Wuppertal

Mitglied: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause
Otto von Guericke Universität Magdeburg

Promotionskolloquium: 19.10.2022

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die eingereichte Arbeit selbstständig verfasst habe. Ich habe nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche gekennzeichnet.

Ich erkläre ferner, dass keine früheren Promotionsanträge erfolglos gewesen sind.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Hiddenhausen, im März 2022

- Torge Brüning -

Gender-Disclaimer:

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten sind dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit dies für die Aussage erforderlich ist.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt den Personen, die mich fortwährend bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt und ermutigt haben das Promotionsvorhaben erfolgreich abzuschließen.

Mein besonderer Dank gilt

- Herrn **Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth** für die engagierte, fachliche und menschliche Betreuung als „Doktorvater“ dieser Arbeit mit vielzähligen förderlichen Anregungen und Ideen, die mich fortwährend motivierten, die Arbeit voranzubringen.
- Herrn **Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Roland Goertz** für die Übernahme des Korreferates und Unterstützung bei Versuchen unter Laborbedingungen.
- Herrn **Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske** für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.
- Herrn **Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause** (Otto von Guericke Universität Magdeburg) für die Bereitschaft als Mitglied in meinem Promotionskolloquium mitzuwirken.
- Herrn **Dipl.-Ing. Clemens Zockoll** für die wertvolle Unterstützung bei den Laborversuchen zum Entzündungsverhalten durchströmter Trocknungsgüter und die umfangreichen Versuche zur CO-Detektion im Labor und an Trocknungsanlagen im Realbetrieb.
- Herrn **Dr. Jörg Kelleter** der Firma GTE Industrieelektronik GmbH für die produktive Entwicklung einer alltagstauglichen Brandgasdetektion in Getreidetrocknungsanlagen und dem immensen Wissensaustausch.
- Herrn **Günter Weinschenk** sowie den Kolleginnen und Kollegen der R+V Allgemeine Versicherung AG, die mich an die interessante Themenstellung herangeführt haben und mir mit praktischem Rat zur Seite standen.
- meinen ehemaligen Kommilitonen (FDA), Freunden, jedoch insbesondere meiner Frau Miriam und meiner Familie, die mich stetig motiviert haben, berufsbegleitend diese Arbeit fortzuführen und abzuschließen.

Zusammenfassung / Summary

Im Bereich der Getreidewirtschaft werden Trockner eingesetzt, um das einzulagernde Gut durch Warm- bzw. Heißluftzuführung in seinem Feuchtigkeitsgehalt zu reduzieren. Dieser Vorgang ist zum Erhalt der Produktgüte notwendig, da Feuchtigkeit während der Einlagerung organischer Stoffe die biologische Aktivität fördert, die mögliche Einlagerungszeit reduziert und Ursache von Fermentation bzw. Selbstentzündungen in Siloanlagen oder Schüttungen ist.

Bei diesen Trocknungsvorgängen kommt es regelmäßig zu sogenannten Trocknerbränden.

Als Mitarbeiter eines genossenschaftlichen Versicherers war die Kenntnis über regelmäßig eintretende Schäden und der Zugriff auf brandgeschädigte Anlagen gegeben.

Literaturgenannte Schadenursachen wurden anhand der analysierten Schadenereignisse diskutiert und mittels Versuchen validiert.

Hierfür wurde zur realitätsnahen Ermittlung des Selbstentzündungs- und Abbrandverhaltens luftdurchströmter Trocknungsgüter eine neue Prüfapparatur im Labormaßstab entwickelt und damit nachgewiesen, dass mittels Warmluft durchströmte Trocknungsgüter sich selbst entzünden können. Dies ist jedoch nur in Abhängigkeit einer verlängerten Verweilzeit und Überschreitung üblicher Trocknungstemperaturen zu erwarten. Nach der Entzündung konnte ein rasantes Abbrandverhalten beobachtet werden.

Der Nachweis des Auftretens von Zündinitialen über die Zuluft wurde durch die Installation einer Funkenerkennung im Zuluftschacht geführt.

Hierdurch lässt sich ableiten, dass als wesentliche Ursachen sowohl „Übertrocknung“ wie auch Zündquelleneintrag als Faktoren der Brandentstehung zu werten sind, jedoch die Interaktion mit weiteren Entzündungsfaktoren erforderlich ist, um einen Brand entstehen zu lassen. Schutzmaßnahmen oder Einrichtungen, die einen gemäß der Gebrauchsanleitung konformen Betrieb an den betrachteten Trocknungsanlagen ermöglichen und eine Vermeidung von begünstigenden Faktoren erleichtern, sind nicht durchgängig gegeben. So führen unterschiedliche Faktoren (wie Kernfluss, Fremdguteintrag, Verklumpung während Standzeiten) zu einer „ungewollten“ Verlängerung der Verweilzeit von Trocknungsgütern.

Die Schadenanalyse zeigt ferner auf, dass Explosionsereignisse an den betrachteten Trocknungsanlagen nicht eingetreten sind und anhand der konventionellen Beurteilungs-

systematik eine Entzündung explosionsfähiger Gemische nicht zu erwarten ist. Unbermerkte Glimmnester können jedoch nach dem Austrag aus der Trocknungsanlage eine Zündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären in nachgeschalteten Anlagenteilen zur Folge haben.

Durch die Analyse der rechtlichen Anforderungen an Hersteller und Betreiber von Getreidetrocknungsanlagen sowie Ermittlung des derzeitigen Normungsstandes und weiterer Regelwerke wird aufgezeigt, dass zwar gesetzliche Sicherheitsanforderungen gegeben sind, jedoch bei dem normativen Detailierungsgrad und deren Umsetzung konzeptionelle Defizite vorliegen, wodurch die Entwicklung eines neuen Stands der Technik erforderlich wird.

Mittels des entwickelten Ansatzes der Beurteilungsmatrix interagierender Entzündungsfaktoren lässt sich methodisch herleiten, welche begünstigenden Bedingungen einen Brand entstehen lassen können, um hieraus, und aus den Erkenntnissen der analysierten Schäden, erforderliche Schutzmaßnahmen ableiten zu können.

Diese Maßnahmen umfassen bauliche, technische und organisatorische Maßnahmen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Brandes zu reduzieren oder Kenntnis über einen Entstehungsbrand zur Einleitung schadenmindernder Maßnahmen zu erlangen. Hierzu zählt insbesondere die Entwicklung einer alternativen Branderkennung mittels Brandgasdetektion, deren Wirksamkeit während des Betriebs von Trocknungsanlagen nachgewiesen wurde.

Zur Synthese des ganzheitlichen Brandsicherheitskonzeptes werden ferner Aspekte der Notfallplanung für Trocknungsanlagen beleuchtet, die spezielle präventive und kurative Maßnahmen beinhalten.

Die risikobasierte Umsetzung des Brandsicherheitskonzeptes an Trocknungsanlagen erfolgt mittels eines neu entwickelten Duktus pränormativ in Abhängigkeit der Beheizung und des Trocknungsgutes in drei Brandgefährdungsklassen. Diesen Brandgefährdungsklassen sind Schutzstufen zugeordnet und mit konkreten Schutzmaßnahmen belegt.

Zusammenfassend ermöglicht die Synthese des risikobasierten Brandsicherheitskonzeptes für Anlagen zum Trocknen von Cerealien im industriellen Mengenmaßstab Herstellern und Betreibern die Umsetzung geltender Rechtsvorschriften, eine Verringerung der Brandgefährdung und stellt den Stand der Technik dar.

Summary

In the cereal processing industry, dryers are used to reduce the moisture content of the material to be stored by the supply of hot air. This process is necessary in order to maintain product quality, as during storage of organic matter moisture promotes biological activity, reduces possible storage time and is the cause of fermentation or spontaneous combustion in silos or bulk storage.

These drying processes regularly lead to so-called dryer fires.

As employees of a co-operative insurer, knowledge about regular instances of damage and access to fire-damaged equipment was available. In the associated literature causes of damage were discussed on the basis of the analysed loss events and validated by means of testing.

For this purpose, a new test apparatus was developed, on a laboratory scale, for the realistic determination of the self-ignition and spontaneous combustion behaviour of air-dried products. It was possible to demonstrate that the drying of goods by use of the throughflow of warm air can cause the goods to self-ignite. However, this is only to be expected by extended standing time and the exceeding of normal drying temperatures. After ignition, a rapid burning behaviour was observed.

The proof of the occurrence of ignition sparks via the supply of air was carried out by installing spark detection in the supply duct.

In this way it can be deduced that the fundamental causes are "overdrying" and the introduction of an ignition source as factors for an initial fire. However, interaction with other ignition factors is necessary in order to cause a fire. Protective measures or devices, which function in accordance with the operating procedures manual of the manufacturer to avoid contributing factors, are not continuously in use.

Therefore, different factors (such as core-flow, foreign material input, clumping during service life) lead to an "unwanted" extension of the standing time of drying goods.

The damage analysis further showed that explosion events at considered drying plants did not occur and that the conventional evaluation system did not expect an ignition of explosive mixtures. However, undetected pockets of embers may result in ignition of hazardous explosive atmospheres in subsequent equipment after their discharge from the drying plant.

From analysing the legal requirements for manufacturers and operators of cereal drying plants, as well as determining the current state of standardization and other regulations, it has been shown that although legal security requirements are met, there are conceptual deficits in the standardised level of detail and their implementation, which leads to the requirement of the development of a new level of technology.

By means of a developed approach to the assessment matrix of interacting inflammatory factors, it is possible to methodically deduce which contributive conditions can cause a fire. Therefore, the necessary protective measures can be derived from this and from the insights of the analyzed damages.

These measures include structural, technical and organizational measures to reduce the likelihood of a fire or to reduce measures to impact the consequences of the incident. In particular, this includes the development of an alternative fire detection method by means of fire gas detection. The effectiveness of these measures has been demonstrated during the operation of drying plants.

For the synthesis of the holistic fire safety concept, further aspects of the emergency planning for drying plants have been highlighted, which include special preventive and curative measures.

For the risk-based implementation of the fire safety concept, drying systems are subdivided prenominally into three fire hazard classes. These classes depending on the heating and the material to be dried, by means of a newly developed duct. The associated protection levels provide explicit protective measures.

In summary, the synthesis of the risk-based fire safety concept for drying cereals on an industrial scale enables manufacturers and operators to adhere applicable legislation, reduce the risk of fire and represents the latest level of technology.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung / Summary	III
Glossar	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Veranlassung und Motivation.....	1
1.2 Wissenschaftliche Verortung.....	3
1.3 Aufgaben- und Zielstellung	3
1.4 Herangehensweise	3
2 Stand der Wissenschaft	6
3 Brandereignisse an Trocknungsanlagen	9
3.1 Aufbau/Funktionsbeschreibung von Getreidetrocknungsanlagen	9
3.2 Schadenhöhe analysierter Trocknerschäden.....	14
3.3 Validierung literaturgenannter Brandursachen.....	16
3.4 Trocknerbrände (Ablauf und Problemfelder).....	29
4 Rechtliche Anforderungen an Trocknungsanlagen	35
4.1 Rechtsvorschriften des Herstellers / Inverkehrbringers.....	36
4.2 Rechtsvorschriften des Betreibers	45
4.3 Deutsche Industrienorm (DIN) 3379.....	48
4.4 Diskussion der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen und Normungsstand.....	49
4.5 Ausblick auf Vorschriften anderer Nationen: NFPA 61.....	51
5 Ansatz zur Beurteilung interagierender Entzündungsfaktoren	58
6 Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen an Trocknungsanlagen	68
6.1 Bauliche Brandschutzmaßnahmen	69
6.2 Technische Brandschutzmaßnahmen.....	71
6.3 Organisatorische Brandschutzmaßnahmen	84
7 Ganzheitliches Sicherheitskonzept – Aspekte der Notfallplanung	87
8 Pränormative Schutzstufen von Trocknungsanlagen	94
9 Ergebnis und Diskussion	99
10 Ausblick	105
Literaturverzeichnis	107
Bildverzeichnis	118
Tabellenverzeichnis	127
Anhänge	129
Lebenslauf	236

Glossar

Die folgenden Begriffe werden im Sinne dieser Arbeit wie folgt verwendet:

Anerkannte Regeln der Technik	schriftlich fixierte oder mündlich überlieferte technische Festlegungen für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach herrschender Auffassung der beteiligten Kreise (Fachleute, Anwender, Verbraucherinnen und Verbraucher und öffentliche Hand) geeignet sind, das (gesetzlich) vorgegebene Ziel zu erreichen und die sich in der Praxis allgemein bewährt haben oder deren Bewährung nach herrschender Auffassung in überschaubarer Zeit bevorsteht [MDJ,2008]
atmosphärische Bedingungen	liegen vor bei einem Druck von 0,8 – 1,1 bar und Umgebungstemperaturen von -20 °C bis +60 °C [TRGS720,2020]
Bestimmungsgemäße Verwendung	Ist die Verwendung, für die ein Produkt nach den Angaben derjenigen Person, die es in den Verkehr bringt, vorgesehen ist oder die übliche Verwendung, die sich aus der Bauart und Ausführung des Produkts ergibt [PRODSG,2020]
Brand	<p>Ein in einem brennbaren System (brennbarer Stoff, Zündquelle und Sauerstoff) ungesteuert ablaufender stofflicher Umsatz, dessen wichtigster Teilvorgang, die Verbrennung der brennbaren Bestandteile, Energie liefert, die hauptsächlich in Wärme und Licht frei wird. Brände können nach der Art der Branderscheinung und der Verbrennungsreaktion unterteilt werden in</p> <ul style="list-style-type: none">• Schwelbrand: Brände mit unvollständiger Verbrennung infolge von Sauerstoffmangel bei niedriger Verbrennungstemperatur (ab ca. 150 °C)• Glimmbrand: Besondere Form des Glutbrandes, bei dem flüchtige Pyrolyseprodukte unterhalb des Zündpunktes entstehen

- Glutbrand: Brand fester Stoffe ohne Flammenbildung aber mit sichtbarer Strahlung aus der Verbrennungszone. Ein Glutbrand findet statt, wenn in festen brennbaren Stoffen keine flüchtigen, brennbaren Gase entstehen.
- Flammbrände: Brände mit vollständiger Verbrennung in der Gasphase bei Verbrennungstemperaturen bis ca. 1.200 °C

[LEHDER,2007]

Duktus	Federführende, leitende Systematik [LOTT,2012]
Entstehungsbrand	<p>Ist ein Brand mit so geringer Rauch- und Wärmentwicklung, dass noch eine gefahrlose Annäherung von Personen bei freier Sicht auf den Brandherd möglich ist. [ASR2.2,2018]</p> <p>Im Sinne des Sachwertschutzes: Durch die geringe Rauch- und Wärmeentwicklung ist ein Schadenumfang gegeben, der eine Wiederherstellung des Ursprungszustandes nach kurzzeitiger Reparatur erlaubt.</p>
Entzündung	Einleitung der Verbrennung [DIN19353,2016]
explosionsfähiges Gemisch	Ein explosionsfähiges Gemisch ist ein Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder aufgewirbelten Stäuben und Luft oder einem anderen Oxidationsmittel, das nach Wirksamwerden einer Zündquelle in einer sich selbsttätig fortpflanzenden Flammenausbreitung reagiert, sodass im Allgemeinen ein sprunghafter Temperatur- und Druckanstieg hervorgerufen wird. [GEFSTV,2017]
Gebrauchsanleitung	Ist vom Hersteller / Inverkehrbringer dem Betreiber mit der Bereitstellung zu liefern und beinhaltet zu beachtende Regeln für die Verwendung, Ergänzung oder Instandhaltung des Produkts, um den Schutz von Sicherheit und Gesundheit zu gewährleisten. [PRODSG,2020]
Gefahr	Zustand infolge eines Sicherheitsdefizits ohne augenblickliche Möglichkeit einer Schädigung [SKIBA,2000]

Gefährdung	Zustand infolge eines Sicherheitsdefizits mit augenblicklicher Möglichkeit einer Schädigung [SKIBA,2000]
Gemische	Unterschiedliche brennbare Gase, Dämpfe, Nebel die zusammen mit einem Oxidationsmittel (z. B. Luft) und Wirksamwerden einer Zündquelle selbsttätig abbrennen (modifiziert in Anlehnung an [GEFSTV,2017])
Grenzrisiko	Übergang vom vertretbaren / akzeptablen Risiko zum nicht vertretbaren / nicht akzeptablen Risiko. Das vertretbare / akzeptable Risiko stellt das Restrisiko dar [LEHDER,2007]
iterativ	(schrittweise) wiederholend
Normalbetrieb	Zustand, in dem die Arbeitsmittel oder Anlagen und deren Einrichtungen innerhalb ihrer Auslegungsparameter benutzt oder betrieben werden [TRGS720,2020]
Methode	Systematisiertes Verfahren zu Gewinnung von Erkenntnissen
Restrisiko	Risiko, das nach der Anwendung von Schutzmaßnahmen verbleibt [LEHDER,2007]
Risiko	Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Schadensausmaßes [LEHDER,2007]
Schutz	Maßnahmen, Mittel und Methoden zur Abwendung von Gefahren, Risiken, belastenden oder schädigenden Ein- / Auswirkungen für die Schutzobjekte Mensch, Umwelt und Sachwerte [LEHDER,2007]
Schutzmaßnahme	Maßnahme zur Minderung der Eintrittswahrscheinlichkeit und / oder des Ausmaßes von Schäden
Selbstentzündung	Entzündung von Materialien, die dadurch hervorgerufen wird, dass die Wärmeproduktionsgeschwindigkeit der Oxidations- und Zersetzungsreaktion größer ist, als die Wärmeverlustgeschwindigkeit an die Umgebung. (modifiziert in Anlehnung an [TRGS720,2020])

Selbsterhitzung	Temperaturanstieg in einem Material infolge einer exothermen Reaktion innerhalb des Materials [DIN19353,2016]
Sicherheit	gefahrenfreier Zustand [LEHDER,2007]
Sicherheitskonzept	auf Grundlage analysierter Gefährdungen festgelegte Gesamtheit aller Schutzmaßnahmen zur Erlangung eines gefahrenfreien Zustandes, bzw. eines angestrebten verbleibenden Restrisikos
Stand der Technik	Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der nach herrschender Auffassung führender Fachleute das Erreichen des (gesetzlich) vorgegebenen Zieles gesichert erscheinen lässt. Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen oder vergleichbare Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen müssen sich in der Praxis bewährt haben oder sollten – wenn dies noch nicht der Fall ist – möglichst im Betrieb mit Erfolg erprobt worden sein. [MDJ,2008]
Stand der Wissenschaft und Technik	Entwicklungsstand fortschrittlichster Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach Auffassung führender Fachleute aus Wissenschaft und Technik auf der Grundlage neuester wissenschaftlich vertretbarer Erkenntnisse im Hinblick auf das (gesetzlich) vorgegebene Ziel für erforderlich gehalten werden und das Erreichen dieses Ziels gesichert erscheinen lassen. [MDJ,2008]
Zündenergie	erforderliche Energie für eine Entzündung [DIN19353,2019]
Zündgrenztemperatur	Die Zündgrenztemperatur ist eine staubspezifische Temperatur. Sie beschreibt die niedrigste Temperatur eines inerten Partikels, bei der eine Entzündung eines Schwelbrandes innerhalb einer Staubschicht gerade noch erfolgt (möglich ist). [BECHEM,2020]
Zündquelle	Energiequelle, die verwendet wird, um das Brennen einzuleiten [DIN19353,2016]

1 Einleitung

In Betrieben der Getreidewirtschaft werden Trockner (größtenteils stationär) eingesetzt, um das einzulagernde Gut (z. B. Mais, Weizen, Raps) in seinem Feuchtigkeitsgehalt - durch Warm- bzw. Heißluftzuführung - zu reduzieren. Dieser Vorgang ist notwendig, da Feuchtigkeit in organischen Stoffen bei der Einlagerung die biologische Aktivität fördert und so die maximal mögliche Einlagerungszeit reduziert.

Regelmäßig kommt es bei diesen Trocknungsvorgängen zu sogenannten Trocknerbränden, bzw. zu Bränden des Trockengutes, in deren Verlauf die Trocknungsanlage und das Trocknungsgut Schaden nimmt.

Bedingt durch den hohen Neuwert solcher Getreidetrockner entstehen der Versicherungswirtschaft wiederkehrend hohe Entschädigungsleistungen. Ferner verursachen die Brände in Trocknungsanlagen Betriebsunterbrechungsschäden bei den einlagernden Betriebsstätten. Diese haben zumeist Abnahmekontrakte mit zuliefernden Landwirten, die während der Ernte die Ware auf dem Betriebsgelände anliefern. Eine Einlagerung kann jedoch auf Grund der fehlenden Trocknung (oder bei redundant angeordneten Trocknungsanlagen zumindest nur mit reduzierter Trocknungsleistung) nicht oder nur eingeschränkt erfolgen.

1.1 Veranlassung und Motivation

Resultierend aus dem genossenschaftlichen Verbund versichert die R+V Allgemeine Versicherung AG signifikant Betriebsarten, bei denen Getreidetrocknungsanlagen betrieben werden.

Als Risk Engineer bei der R+V Allgemeine Versicherung AG, mit dem Tätigkeitsschwerpunkt der Schadenverhütung in getreideverarbeitenden Unternehmen und der Hinzuziehung in die Schadenfallbearbeitung zur Ableitung künftiger Schutzmaßnahmen, fiel der wiederkehrend eintretende Brandschaden an Trocknungsanlagen auf.

Zur Klärung der Ursachen von Trocknerbränden herrschten zwischen Herstellern, Betreibern und eingeschalteten Sachverständigen im Rahmen der Schadenregulierung unterschiedliche Meinungen. In der Literatur konnten nur in geringem Umfang Aussagen zu Brandursachen an Trocknungsanlagen gefunden werden.

Die vorliegenden sicherheitstechnischen Kennwerte der Trocknungsgüter werden im sogenannten Warmlagerversuch im Labormaßstab ermittelt. Jedoch spiegelt diese Methode nicht die tatsächlichen Strömungsverhältnisse während der Trocknung wider.

Daher musste sich die Frage gestellt werden, welchen Einfluss die Durchströmung der Schüttung mit warmer Luft auf das Entzündungsverhalten der Trocknungsgüter hat. Ferner zeigten persönliche Erfahrungen beim Kunden, dass unter Herstellern und Betreibern die Gefahr einer Brandentstehung durchaus bekannt ist, jedoch Einrichtungen zum Schutz vor dem Ereignis „Brand“ nicht oder nur eingeschränkt vorhanden sind. Gefährdungsbeurteilungen, die das Ereignis „Brand an einer Trocknungsanlage“ und entsprechende Schutzmaßnahmen zum Inhalt haben, waren häufig nicht gegeben. Betrachtet man die Inhalte der herstellerseitigen Gebrauchsanleitungen, so muss sich darüber hinaus gefragt werden, wie der vorgeschriebene Betrieb an der zugehörigen Anlage mit dem effizienten Einsatz einer Trocknungsanlage vereinbar ist.

Kommt es zu einem Trocknerbrand, so besteht bei den derzeit üblichen Getreidetrocknern für das bedienende Personal und die alarmierte Feuerwehr, bedingt durch die geschlossene Bauweise, eigentlich keine Möglichkeit an den Brandherd zu gelangen und so eine Brandausbreitung innerhalb des Trockengutes zu verhindern. Ferner ist es für das bedienende Personal derzeit nur bedingt möglich, einen Entstehungsbrand zu erkennen, da keine Branderkennungseinrichtungen vorhanden sind, die den Brand in einem frühen Stadium detektieren können.

In vielen Fällen kam es zu einem Totalverlust des Getreidetrockners.

Insgesamt zeigten die persönlichen Erfahrungen, dass die Umsetzung von bestehenden rechtlichen Anforderungen für Trocknungsanlagen wenig oder keine Umsetzung finden und wissenschaftlich fundierte Aussagen zu Brandursachen an solchen Anlagen nicht zu ermitteln waren, sodass dies für mich die Motivation darstellte, ein risikobasiertes Brand-sicherheitskonzept für Trocknungsanlagen zu entwickeln.

Bei der Schadenanalyse traten zudem Anlagen in Erscheinung, die nach Aussage der Errichter über „ausreichende Schutzmaßnahmen“ verfügen, sodass dies eine weitere Motivation darstellte, die Brandgefährdungsprozesse wissenschaftlich zu analysieren.

1.2 Wissenschaftliche Verortung

Die Ermittlung relevanter Brandursachen sowie die Ableitung von risikoadäquaten Schutzmaßnahmen ist originär dem Themenfeld der Ingenieurwissenschaften zuzuordnen. Hinzu kommt, dass bei der Betrachtung des Systems „Trocknungsanlage“ Entzündungsvorgänge eine Rolle spielen (könnten), die bislang mittels genormter Prüfverfahren zum Entzündungsverhalten nicht betrachtet werden.

Der Ansatz zur Beurteilung der Wirksamkeit begünstigender Entzündungsfaktoren und deren Interaktion basiert auf sicherheitsingenieurwissenschaftlichen Entscheidungs-Abfrageschemata und wird am Beispiel Getreidetrockner validiert.

1.3 Aufgaben- und Zielstellung

Durch Untersuchung von realen Brandschäden und Abgleich mit wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie Validierung möglicher Brandursachen mittels Versuchen im Labor- und Realmaßstab, werden die Entzündungsvorgänge in Trocknungsanlagen analysiert. Hierauf basierend ist das Ziel die Überprüfung des Einflusses realer Durchströmungsverhältnisse gegenüber bestehender Versuchsmethoden zur Ermittlung der Selbstentzündungscharakteristik der Trocknungsgüter sowie die Schaffung einer Methodik zur Bewertung der Brandgefährdung von Getreidetrocknungsanlagen.

Da sich Trocknungsanlagen in der Verfahrenstechnik unterscheiden und auch die Eigenschaften der Trocknungsgüter variieren, ist es ferner das Ziel, risikobasierte Maßnahmen in einem Stufenkonzept für einen brandsicheren Betrieb darzulegen.

Mittels dieses Stufenkonzeptes soll die brandgefährdungsadaptive Auswahl von Schutzmaßnahmen ermöglicht werden und Grundlage zur Fortschreibung des Standes der Sicherheitstechnik bilden.

1.4 Herangehensweise

Im **Kapitel 2** werden die Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich des Entzündungsverhaltens von Schüttgütern sowie zu Brandverläufen an Trocknungsanlagen dargestellt. Ergänzend werden mögliche Beurteilungssystematiken zur Entwicklung des risikobasierten Brandsicherheitskonzeptes vorgestellt.

Im darauffolgenden **Kapitel 3** werden die in dieser Dissertation betrachteten Getreidetrockner in ihrer Funktion samt vorhandener Schutzeinrichtungen sowie den üblichen Trocknungstemperaturen beschrieben (Ist-Zustand). Ferner werden charakteristische

Analogien von Brandereignissen an Trocknungsanlagen aus dem zugehörigen *Anhang A – „Untersuchung Brandereignisse“* vorgestellt und analysiert. In Anlehnung an ESCIS [ESCIS6,2001] wird primär das verwendete Trocknungsverfahren (hier Trocknertyp) und das Trockengut betrachtet. Weitere Erkenntnisse aus den Schäden, wie die festgestellte Schadenursache des Sachverständigen, der Brandverlauf innerhalb der Trocknungssäule, bzw. Betrachtung des Brandausbruchsbereiches und die bei Branderkennung eingeleiteten Maßnahmen zur Schadenminderung bilden die Basis für die anschließende Validierung der Thesen zum Stand der Wissenschaft zu Brandursachen an Trocknungsanlagen. Da entgegen dem Warmlagerversuch das Trocknungsgut von Warmluft durchströmt wird, ist die Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Selbstentzündungscharakteristik durchströmter Schüttungen in *Anhang B – „Selbstentzündung durchströmter Schüttungen“* erforderlich. Zur abschließenden Validierung der Brandursachen erfolgt unter *Anhang C* der „*Nachweis des Eintrages von Zündinitiatoren*“ über die Zuluft.

Anschließend werden die geltenden Rechtsvorschriften der Hersteller und Betreiber im **Kapitel 4** und deren Umsetzung analysiert. Darüber hinaus werden die Inhalte der Vorschriften anderer Nationen beleuchtet und ihre Übertragbarkeit auf hiesige Anlagen diskutiert.

Nach der Analyse der Brandgefährdungsprozesse und dem Aufzeigen konzeptioneller Defizite gilt es zu klären, inwiefern es zu einer „positiven“ gegenseitigen Beeinflussung begünstigender Entzündungsfaktoren kommen kann.

Daher wird in **Kapitel 5** zur Synthese eines Brandsicherheitskonzeptes der Ansatz zur systematischen Beurteilung interagierender Entzündungsfaktoren dargestellt und am Beispiel einer Getreidetrocknungsanlage veranschaulicht.

Hierauf aufbauend werden in **Kapitel 6** die einzelnen Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen dargestellt, wobei die Entwicklung einer alternativen Branderkennungsmöglichkeit unter Beachtung des Einflusses der Trocknungsgutcharakteristika auf die Möglichkeit der Branderkennung in *Anhang D – „Entwicklung alternativer Branderkennungsmöglichkeiten“* und in *Anhang E* die „*Dimensionierung einer Löscheinrichtung an Trocknungsanlagen*“ beschrieben wird.

Zur Synthese des ganzheitlichen Brandsicherheitskonzeptes werden ferner Aspekte der Notfallplanung für Trocknungsanlagen in **Kapitel 7** beleuchtet, die spezielle präventive und kurative Maßnahmen beinhalten.

Zur risikobasierten Umsetzung des Brandsicherheitskonzeptes werden Trocknungsanlagen in **Kapitel 8** mittels eines neu entwickelten Duktus pränormativ in Abhängigkeit der Beheizung und des Trocknungsgutes in drei Brandgefährdungsklassen eingeteilt und zugehörige Schutzstufen mit konkreten Schutzmaßnahmen belegt sowie im *Anhang F* als Handblatt visualisiert.

Im Ergebnis ermöglicht die Synthese des risikobasierten Brandsicherheitskonzeptes für Anlagen zum Trocknen von Cerealien im industriellen Mengenmaßstab Herstellern und Betreibern die Umsetzung geltender Rechtsvorschriften, eine Verringerung der Brandgefährdung und stellt den Stand der Technik dar.

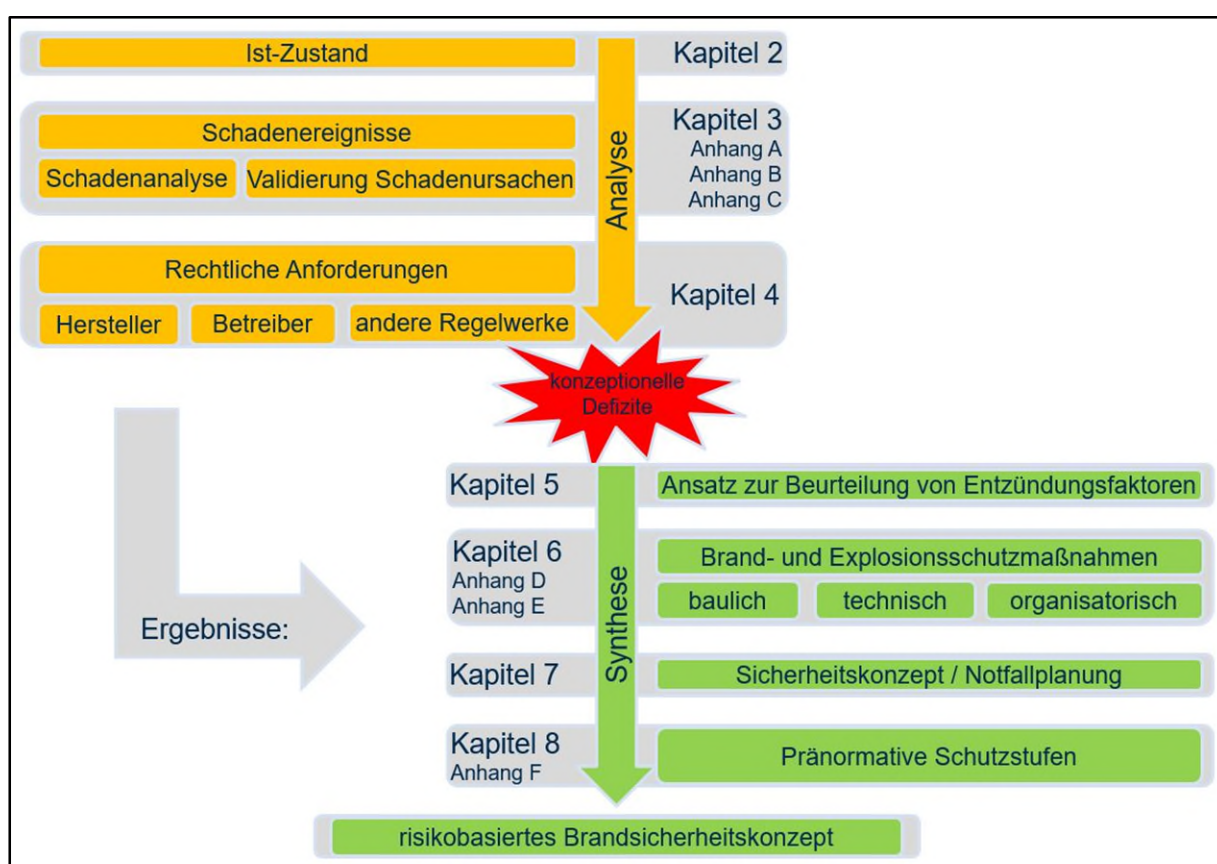


Bild 1.1: Fließschema der Arbeitsschritte und Herangehensweise

2 Stand der Wissenschaft

Getreidetrocknungsanlagen, wie in **Kapitel 3** näher beschrieben, werden in Ihrer Bauform seit Jahrzehnten baulich nahezu unverändert errichtet und betrieben.

Als anerkannte Regel der Technik beschrieb die Deutsche Industrienorm 3379 [DIN3379,1975] Anforderungen an die technische Ausstattung von Getreidetrocknungsanlagen. Diese Norm wurde zwischenzeitlich ersatzlos zurückgezogen.

Beim Betrieb von Trocknungsanlagen kommt es jedoch wiederkehrend zu Brandereignissen.

Die Recherche zum Stand der Wissenschaft ergab, dass zwar Forschungsarbeit und Publikationen bezüglich der Trocknung von unterschiedlichen Produkten sowie unterschiedlichen Trocknungsverfahren vorhanden sind, jedoch fokussieren diese primär auf die Auswahl geeigneter Verfahrenstechnik, um erwünschte Produkteigenschaften zu erhalten oder z. B. die Energieeffizienz zu steigern. Dies erklärt sich damit, dass industrielle Trocknungsvorgänge meist Interessenskonflikten unterliegen, wie etwa dem Erreichen eines reduzierten Produktfeuchtigkeitsgehalts bei möglichst geringen Kosten und gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer hohen Durchsatzrate bei definierter Produktqualität unter Wahrung der Betriebssicherheit [ERGUN,2006].

Darüber hinaus wird die grundsätzliche Gefahr von Brand-, bzw. Explosionsereignissen, beim Betrieb von Getreidetrocknungsanlagen vielfach genannt, da die Grundvoraussetzung für einen Brand, bzw. eine Explosion – das Zusammentreffen von Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle - gegeben sind. Häufig steht das Explosionsereignis beim Trocknen von Stäuben oder staubbelasteter Trocknungsprozesse im Fokus.

Als mögliche Ursachen und Folgen der Entzündung werden genannt [CICHA,2004], [HAUERT,2018], [MUEHL,2009], [MUJUM,2015]:

- Ungleichmäßige Warmluftdurchströmung,
- Staub-/Materialablagerung
- Zündinitialeintrag
- Schadhafte Elevatoren
- Ausfall von Thermostaten
- Ausgasung von Materialien
- Explosionsgefahr

Das (Selbst-)Entzündungsverhalten von organischen Materialien wird unter Laborbedingungen in der Regel auf Grundlage des Warmlagerversuches oder durch Anströmung

von Heißluft ermittelt [BABRAU,2014], [DRYS,2011], [HURLEY,2016], [YONG,2014]. Als Voraussetzung zur Selbstentzündung von organischen Stoffen werden große Volumen bei schlechter Belüftung genannt [FRANKE,1989], [MUJUM,2015].

Bei Versuchen zur Entzündung von Materialien durch Anströmung mit Heißluft konnte ferner nachgewiesen werden, dass eine Entzündung ab einer gewissen Anströmgeschwindigkeit nicht mehr erfolgt, da die durch thermische Beaufschlagung entstehenden Pyrolysegase vom Feststoff „weggetragen“ werden [BABRAU,2014], [YONG,2014].

Einen Überblick weiterer Untersuchungsmethoden zur Ermittlung sicherheitstechnischer Kenngrößen von Schüttgütern zur Beurteilung der Gefahren von Staubbränden und Staubexplosionen beschreibt die VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1 [VDI2263,2022] und die Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie in der Schweiz [ESCIS1,1998]. Hierbei wird zwischen der Verteilung des Staubes unterschieden, also ob dieser beispielsweise abgelagert oder aufgewirbelt ist. Sicherheitstechnische Kenngrößen von abgelagertem Staub sind z.B. das Brennverhalten (unter Ausweisung einer Brennzahl), die Mindestzündtemperatur (Glimmtemperatur), die Selbstentzündungstemperatur oder die Deflagrationsfähigkeit.

Diesen Untersuchungsmethoden ist gemein, dass keine signifikante Durchströmung der Probe erfolgt.

Durch Modifikation der Untersuchungsmethode zum Brennverhalten (Durchströmung abgelagerter Stäube im Fließbett und Überführung in einen quasi stationären Zustand) konnte der Nachweis erbracht werden, dass bei einigen Proben eine signifikante Erhöhung der Brennzahl zu verzeichnen war [LEKSIN/BARTH,2015].

Im Rahmen dieser Ausarbeitung gilt es am Beispiel der Selbstentzündungstemperatur zu evaluieren, inwiefern die Untersuchungsmethode des Warmlagerversuches zur Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur die Verhältnisse in Getreidetrocknungsanlagen in Form von durchströmten Schüttungen widerspiegelt.

Hinsichtlich der wissenschaftlichen Bewertung des Brandverlaufes, bzw. der Branddynamik stellen Berechnungsmodelle auf den Gebäude-, bzw. Raumbrand ab [DRYS,2011], [HURLEY,2016] [KARLS,1999], [VFDB41,2020].

Wissenschaftliche Abhandlungen zu Brandverläufen in den hier betrachteten Trocknungsanlagen konnten nicht identifiziert werden.

Demnach ist auch hier zu prüfen, inwiefern literaturgenannte Berechnungsverfahren auf Trocknungsanlagen Anwendung finden können.

Die Recherche zum Stand der Wissenschaft bezüglich der Brandentstehung und des Brandverlaufes in Getreidetrocknungsanlagen ergab somit zusammenfassend, dass zwar allgemeine Erkenntnisse zu Brand- und Explosionsgefahren an Getreidetrocknungsanlagen sowie zu Brandverläufen vorliegen, jedoch nicht im Speziellen zu den hier betrachteten Durchlauf Trocknern für Agrarprodukte.

Dieses Defizit soll im Rahmen dieser Dissertation geschlossen werden.

Darauf aufbauend soll mittels der gewonnenen Erkenntnisse und Anwendung von etablierten Beurteilungssystematiken [COMPES,1974], [LOTT,2012], [STEINB,2012] ein risikobasiertes Brandsicherheitskonzept für Getreidetrocknungsanlagen entwickelt werden.

3 Brandereignisse an Trocknungsanlagen

Zur Erreichung der Lagerfähigkeit und zum Erhalt der Produktgüte von Cerealien ist die Einhaltung einer spezifischen maximalen Produktfeuchte erforderlich. Diese Trocknungsgüter weisen jedoch das Gefährlichkeitsmerkmal der Brennbarkeit auf.

Es gibt Schätzungen, nach denen in Deutschland ca. 100 Trocknerbrände pro Jahr zu verzeichnen sind [HAUERT,2007].

Jedoch ist die tatsächliche Anzahl von Bränden an Trocknungsanlagen nicht verlässlich ermittelbar, da bei Bränden an Trocknungsanlagen zumeist kein Personenschaden eintritt und somit eine zuverlässige Erhebung nur seitens der Hersteller oder der Sachversicherer möglich ist.

Seitens der Hersteller waren jedoch keine Angaben zu der Anzahl von Bränden an Trocknungsanlagen in Erfahrung zu bringen.

Bei den Sachversicherern erfolgt i.d.R. die Erfassung von Schadenstatistiken betriebsartenbezogen. Diese Einstufung erlaubt zwar zu differenzieren, welche Schäden auf eine bestimmte Betriebsart entfallen und gibt auch eine Übersicht, welche Ursache der Brand hat (z. B. eine elektrische Ursache), jedoch wird keine Statistik über die Betriebseinrichtung „Trockner“ geführt, wodurch eine detaillierte Auswertung eines jeden in Erfahrung gebrachten Schadenfalles erforderlich wurde.

3.1 Aufbau/Funktionsbeschreibung von Getreidetrocknungsanlagen

Zur Erreichung der Lagerfähigkeit von Cerealien ist die Herabsenkung des Feuchtigkeitsgehaltes zum Erhalt der Produktgüte notwendig, da Feuchtigkeit in organischen Stoffen bei der Einlagerung die mikrobiologische Aktivität fördert, die mögliche Einlagerungszeit reduziert und Ursache von Fermentation, bzw. Selbstentzündungen in Siloanlagen und Schüttungen ist [RAMIR,2010]. Der Erntefeuchtigkeitsgehalt ist von diversen Faktoren abhängig, wie dem Produkt selbst, der Witterung während der Wachstumszeit der Pflanze und zum Erntezeitpunkt oder die Bodenbeschaffenheit.

So kann bei Getreide zum Erntezeitpunkt der Feuchtigkeitsgehalt nahe der verderbnisfreien Feuchtigkeitsgehalt von 17 – 18 % liegen, wobei bei Mais hingegen Erntefeuchtigkeitsgehalte von unter 30 % die Ausnahme darstellen.

Der Zielfeuchtigkeitsgehalt von organischen Stoffen zur Erlangung der Lagerfähigkeit liegt bei rund 15%.

Das Erfordernis der Trocknung zur Erhöhung der Lagerfähigkeit ist seit Jahrhunderten bekannt. Vor der technischen Trocknung wurde Getreide im Sommer in der Sonne getrocknet – ähnlich, wie es heute bei Heu noch häufig praktiziert wird.

Um den regionalen Ernteertrag heutiger schlagkräftiger Erntemaschinen zur Erreichung der Lagerfähigkeit trocknen zu können, kommen in deutschen Agrartrocknungsbetrieben vornehmlich sogenannte Durchlauf-, Kaskaden- oder Dächerschachttrockner, auch Getreide- oder Körnertrockner genannt, zum Einsatz. Trommeltrockner (oder auch Drehrohtrockner) sind in der Praxis für Cerealien eher nicht anzutreffen. Diese werden vornehmlich für die (Futter-)Grastrocknung verwendet.

Diese Dächerschachttrockner werden sowohl mobil als auch stationär errichtet, wobei der Fokus dieser Arbeit auf den stationären Durchlauftrocknungsanlagen liegen soll, da diese im Rahmen der Schadenfalluntersuchungen (*Anhang A*) nahezu ausschließlich von Brandschäden betroffen waren.

Die Verfahrenstechnik ist seit Einführung dieser Anlagen nahezu unverändert und wird im Folgenden samt dem Stand der (Sicherheits-)Technik beschrieben.

Grundsätzlich basieren viele Körnertrockner in der Getreideindustrie auf demselben Prinzip oder ähneln sich zumeist so sehr, dass anhand folgendem *Bild 3.1* die prinzipielle Funktionsweise der Körnertrockner erklärt wird:

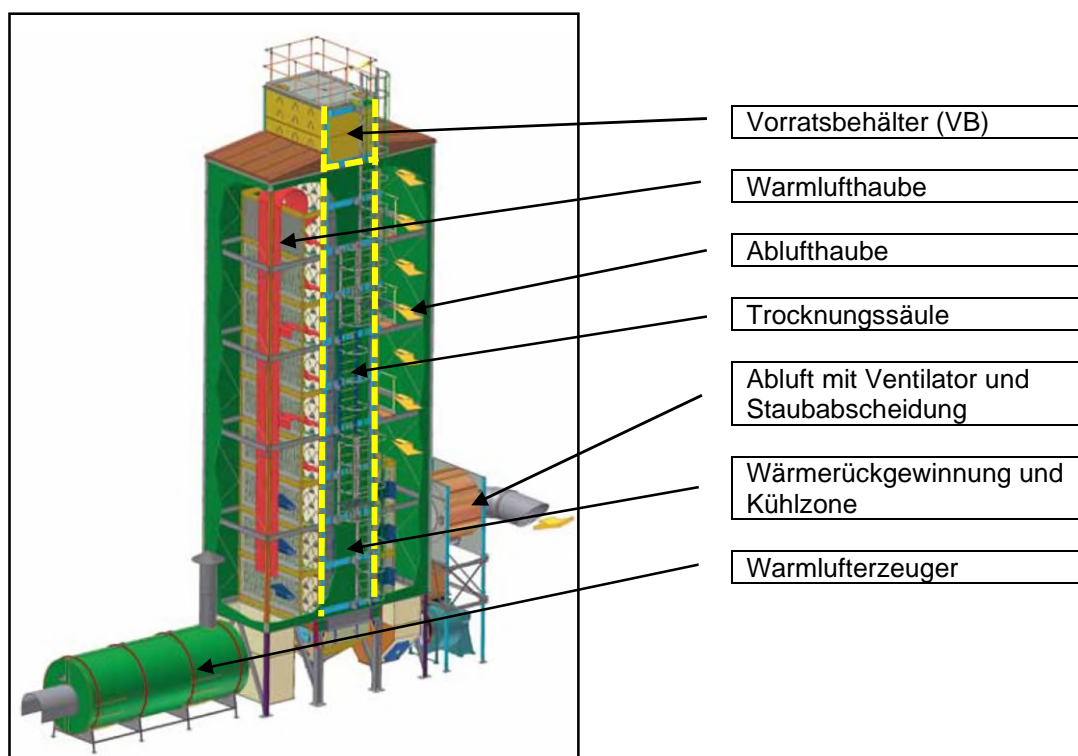


Bild 3.1: Schematische Darstellung einer Trocknungsanlage mit Wärmerückgewinnung
[NEUERO,2016]

Die in dieser Abhandlung betrachteten Getreidetrockner bestehen aus [STELA,2006]:

- einer Säule mit einer variablen Anzahl von Trocknungs- und Kühlelementen
- einer Zu- und Ablufführung
- einem Warmlufterzeuger
- Lufttechnik
- Steuerung und Regeltechnik

Grundsätzlich wird die gesamte Trocknungsanlage von einem (oder mehreren) Abluftventilatoren übersaugt.

Das zu trocknende Gut wird über den Nassgutelevator in den Vorratsbehälter oberhalb der Trocknersäule transportiert und rieselt durch Schwerkraft fortschreitend in deren Unterteil, aus dem es abgefördert wird. Die Trocknerbefüllung und –entleerung verläuft dabei diskontinuierlich in regelmäßigen, in Abhängigkeit von der Charakteristik des zu trocknenden Gutes, einstellbaren Intervallen.

Quer zur Bewegungsrichtung des Gutes (aus der Warmlufthaube in die Ablufthaube) wird mittels des Abluftventilators durch die Trocknersäule Luft angesaugt.

Die feuchte Abluft wird aus der Mündung des Ventilators außerhalb des Trockners der freien Luftströmung zugeführt. Der Luftdurchfluss kann auch mittels Regelklappen und Schieber der Sekundärluftregelung geregelt werden.

Schematische Darstellung der Luftführung durch die Produktschüttung (Rot: Warmluft; Grün: Abluft; Gelb: Produkt):

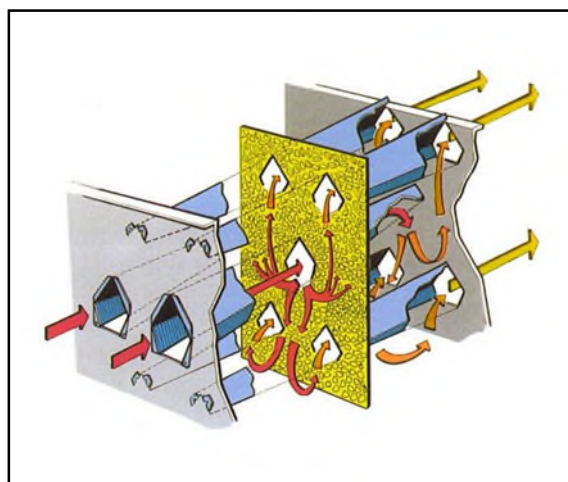


Bild 3.2: Luftwege innerhalb des Trockners [ROMBER,2006]

Das Trocknungsprodukt durchläuft den Trockner aufgrund der Schwerkraft von oben nach unten. Die senkrechten Produktschächte sind von waagrecht angeordneten Warm- und Abluftkanälen durchzogen. Die Dachform dieser Kanäle ermöglicht das gleichmäßige Nachsetzen des Produkts.

Die Dachkanäle sind nach unten auf gesamter Länge offen. Die Warmluft strömt auf der Stirnseite der Warmluftdächer in die Säule ein und durchflutet anschließend die anliegende Produktschüttung. Dabei erwärmt sich das Produkt und gibt seine Feuchtigkeit an die vorbeistreichende Luft ab und trocknet. Im Gegenzug kühlt sich die Luft ab und feuchtet sich je nach Produkt bis zur Sättigungsgrenze auf. Die feuchte Luft entweicht durch die benachbarten Abluftdächer. Durch den Abluftventilator wird diese Luft aus dem Trockner gesaugt.

Betrieb der Trocknungsanlage:

Vor Beginn der Trocknung wird mittels vorgeschalteter Fördertechnik (z. B. Elevator, Trogkettenförderer) die leere Trocknersäule mit dem Trocknungsgut aus einer sogenannten Nasszelle oder über eine Schüttgasse vollständig befüllt.

Im obersten Bereich der Trocknungssäule ist ein Vorratsbehälter vorhanden, der über „Voll-“ und „Leermelder“ verfügt. Wenn der Vollmelder anspricht, stoppt die Beschickung des Trockners und der Anlagenbediener kann den eigentlichen Trocknungsvorgang starten. Hierzu wird der Abluftventilator in Betrieb genommen und der Warmluftherzeuger eingeschaltet. Die so erwärmte Luft wird nun durch das Trocknungsgut gesaugt und erwärmt das Trocknungsgut. Durch die Erwärmung und die Feuchtigkeitsabgabe an die Warmluft wird das Trocknungsgut in seinem Feuchtigkeitsgehalt reduziert.

Nun öffnet und schließt in regelmäßigen Zeitabständen (z. B. alle 90 s) der Austragschieber, sodass das Produkt in den Austragstrichter fällt und von dort mittels Förderaggregaten in die Lagerstätten transportiert wird. Das Produkt rieselt dann der Schwerkraft folgend über die Dächer nach, bis sich wieder eine „stabile“ Schüttung in der Trocknungssäule ergibt.

Da jedoch zu Beginn der Trocknung die anfänglich eingegebene Ware noch nicht in seinem Feuchtigkeitsgehalt reduziert ist, muss anfänglich die Ware entweder „im Kreis“ gefahren werden – sprich: Nasse Ware wird oben wieder der Trocknungsanlage zugegeben oder die Trocknungssäule wird anfänglich mit zum Teil schon getrocknetem Material vorgefüllt. Leichte Differenzen im Feuchtigkeitsgehalt gleichen sich in den Lagerzellen während der Lagerzeit wieder aus.

Über die Einstellung des Austragtaktes des Austragschiebers wird der zeitliche Verbleib des Trocknungsgutes und damit auch der Feuchtigkeitsgehalt gesteuert.

In dem Trockner weist das Trocknungsgut nun durch seine unterschiedliche Verweilzeit im Trockner unterschiedliche Temperaturen auf. Diese nimmt von oben (Vorratsbehälter) bis zum Übergang in die Kühlzone stetig zu. In der Kühlzone wird das Produkt nun mittels Umgebungsluft abgekühlt, um ein „Nachschwitzen“ und somit weiteren Feuchtigkeitsverlust unter die Grenzlagerfeuchtigkeit von 15 % zu vermeiden. In den Kühlzonen nimmt dann die Temperatur wieder stetig ab.

Neuere Anlagen verfügen heute über Temperatur- und Feuchtigkeitsfühler in der Abluft, bzw. im Trocknungsgut, wodurch eine nahezu automatische Funktion der Anlage gegeben ist. Hier nimmt der Anlagenbediener nur noch Proben, um den Feuchtigkeitsgehalt zu ermitteln, bzw. zu verifizieren. In der Praxis werden Trocknungsanlagen aus diesem Grunde zum Teil ohne personelle Aufsicht betrieben.

Zum Ende der Trocknung wird erneut die Ware im Rundlauf betrieben und die Trocknungssäule anschließend leer gefahren.

Stand der Sicherheitstechnik an Getreidetrocknungsanlagen

Sowohl durch Inaugenscheinnahme von Anlagen vor Ort beim Kunden als auch durch die Recherche auf Fachmessen, wie z. B. der AGRITECHNICA in Hannover, gewinnt man einen Überblick an Herstellern von Trocknungsanlagen. Hierzu zählen (unwillkürliche Reihenfolge):

- Stela Laxhuber GmbH
- RIELA Karl-Heinz Knoop e.K.
- NEUERO Farm- und Fördertechnik
- Bühler AG
- PETKUS Technologie GmbH
- Goldsaat Agrartechnik GmbH

Der Stand der Sicherheitstechnik hinsichtlich Brandschutzeinrichtungen variiert in der Grundausstattung der Trocknungsanlagen zumeist nur marginal.

Grundsätzlich erfolgt eine Temperaturüberwachung der Zu-/Warmluft, der Abluft und der Korntemperatur. Gemäß *Tabelle 1* differieren die maximal zulässigen Temperaturen nach

zu trocknendem Gut. Die angegebenen Trocknungstemperaturen variieren je nach Hersteller und Trocknungsanlage geringfügig.

Tabelle 1: Trocknungs- und Korntemperatur [STELA,2006], [R+V,2005]

Produkt:	Trocknungstemperatur: (Warmluft)	max. Korntemperatur:
Futtermais	ca. 110 – 130 °C	ca. 80 °C
Futtergetreide	ca. 80 – 90 °C	ca. 60 °C
Saatgetreide	ca. 65 °C	ca. 40 °C
Braugerste	ca. 65 °C	ca. 40 °C
Mahlgetreide (Weizen)	ca. 80 °C	ca. 50 °C

Die hierfür verwendete Anzahl von Temperaturfühlern schwankt je nach Anbieter und ist abhängig von der Größe der Anlage. Ferner verfügen die Trocknungsanlagen über ein Sicherheitsthermostat im Zuluftschacht.

Weitere Schutzmaßnahmen (wie unter Kapitel 6 aufgeführt) sind bei den meisten Herstellern aufpreispflichtig erhältlich. Im Hinblick auf die Konkurrenzfähigkeit bei der Preisfindung werden solche Schutzeinrichtungen nicht in der Grundausstattung angeboten.

3.2 Schadenhöhe analysierter Trocknerschäden

Nach Meldung eines eingetretenen Schadens durch den Kunden, wird ein Schadenregulierer beauftragt, der anhand der Versicherungspolice prüft, ob es sich bei dem Schaden um ein versichertes Ereignis handelt und ob die vom Schaden betroffene Sache über die Versicherungspolice abgedeckt ist. Auf Grund seiner Erfahrung und anhand vorliegender Dokumente (z. B. Rechnungen) legt der Schadenregulierer eine sogenannte Reserve fest. Diese Summe wird dann buchhalterisch dem Schaden „zugeordnet“. Die tatsächliche Gesamtschadenhöhe kann erst mit der finalen Abrechnung des Schadens ermittelt werden und lässt sich auf Grund des zeitlichen Ablaufes nur bedingt in Erfahrung bringen.

Anhand der im *Anhang A* in den Schadenakten reservierten Schadenssummen ergibt sich jedoch die folgende Übersicht (Kundennamen unkenntlich gemacht). Zu berücksichtigen ist hierbei, dass Schäden erst bei Überschreiten eines Schwellenwertes als Großschäden erfasst werden. Sofern der Versicherungsnehmer einen Selbstbehalt in seiner Versiche-

runbspolice vereinbart hat, werden Schäden bis zu dieser Summengrenze nicht dem Versicherer gemeldet, da sie mit eigenen Mitteln zu beheben sind und somit statistisch nicht erfasst werden können.

Tabelle 2: Reservierte Schadensummen (in EURO) ausgewählter Trocknerschäden:

Jahr	VN	Gesamtreserve in EUR:
2007	W.M.	235.000
2008	R. W.	500.000
2008	G.	210.000
2009	L. D.	175.000
2009	A. O.	300.000
2009	L.	65.000
2010	BW B.	170.000
2010	E.	375.000
2010	H. M.	450.000
2010	BW T.	170.000
2010	R. R.	400.000
2010	A. O.	500.000
2010	J.	100.000
2011	W.	150.000
2011	R. R.	300.000

3.3 Validierung literaturgenannter Brandursachen

In der Literatur werden unterschiedliche Ursachen der Brandentstehung an Getreide-trocknungsanlagen genannt. Diese gilt es im Folgenden zu validieren, bzw. zu falsifizieren.

1. These – (Selbst)-Entzündung auf Grund von (un-)gleichmäßiger Warmluftdurchströmung und inhomogenem Produktfluss sowie von Ablagerungen [BABRAU,2014], [BROECK,1996], [CICHA,2004], [HAUERT,2007], [MUJUM,2015]

These: Bei langzeitiger Warmluftbeaufschlagung erfolgt eine Entzündung von Trocknungsgütern oder deren Ablagerungen, welche auf Grund von inhomogenem Produktfluss der Trocknungsanlagen begünstigt werden.

Selbstentzündungen aufgrund der erhöhten Prozesstemperaturen sind eine häufige Ursache von Bränden und Explosionen in Trocknern. Selbstentzündungsvorgänge treten auf, wenn die Wärmeproduktion durch eine exotherme Reaktion die Wärmeabfuhr in der Schüttung übersteigt [BROECK,1996].

Bei hohen Trocknungstemperaturen sind Anbackungen besonders gefährlich, da die länger dauernde Erhitzung leicht zur Selbstentzündung führen kann. (...) Bei Trocknern, die im dichten Gutstrom trocknen, wie z. B. den Dächerschachttrocknern, steht die Brandgefahr (Glimmnestbildung) im Vordergrund. Hier gehen die Gefahren von zu hoher Eingangslufttemperatur aus, besonders in Verbindung mit Trocknerbereichen, in denen infolge Verstopfens, beispielsweise durch faserige Fremdbestandteile im Trockengut, dieses einer lang andauernden Aufheizung ausgesetzt ist [HAUERT,2007], [CICHA,2004].

Beurteilung: Um die Schüttgutbewegung und damit die Verteilungen der Partikelgeschwindigkeit und der Verweilzeit in einem Dächerschachttrockner genauer untersuchen zu können, wurden zweidimensionale Modelle auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) entwickelt. Mithilfe der diskreten Berechnungen wurden Partikeltrajektorien im Dächerschachttrockner ermittelt. Diese Untersuchungen bestätigten das experimentell ermittelte Ergebnis, dass Partikel in der Mitte des Trockners schneller fließen als wandnahe Partikel. Dieser als Kernfluss bekannte Effekt führt zu einem inhomogenen Partikelstrom. Die Folge davon ist eine ungleichmäßige Trocknung, die durch erhebliche Schwankungen der Partikelfeuchteverteilung über dem Querschnitt am Austrag des Trockners gekennzeichnet ist. Partikel mit hohen Geschwindigkeiten und einer geringen Verweilzeit werden untertrocknet, während Partikel mit einer geringeren Geschwindigkeit und somit einer hohen Verweilzeit übertrocknet werden [WEIGLE,2014].



Bild 3.3: Partikelströmungsprofil gefärbter Weizenkörner in der herkömmlichen Apparategeometrie [WEIGLE,2014]

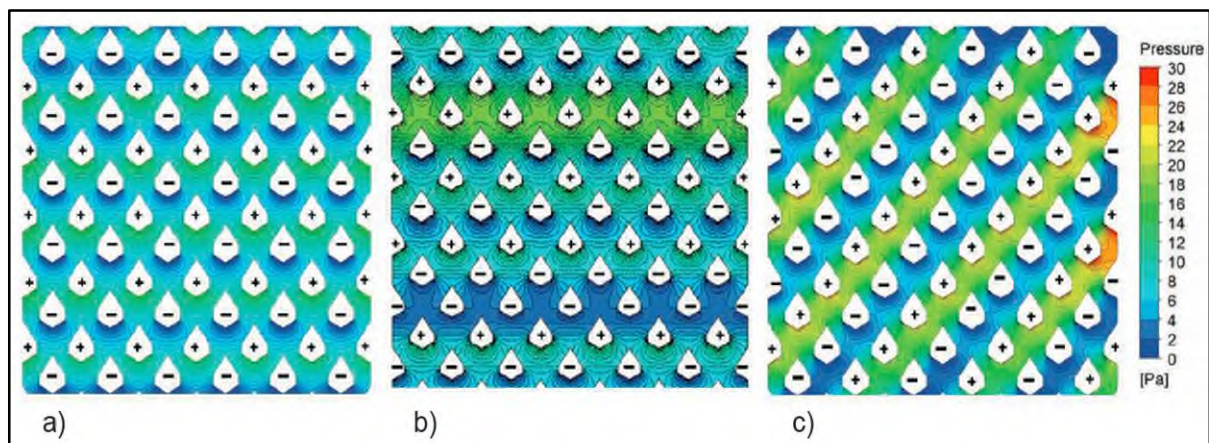
Kommt es darüber hinaus zu einem Eintrag von Fremdgut, was einerseits eine weitere Beeinträchtigung der Fließdynamik und andererseits eine Verjüngung / Verschluss der Dächerquerschnitte zur Folge haben kann, so ist mit der Bildung von Brücken an den Lüftungskanälen zu rechnen. Das Phänomen der Brückenbildung ist auch bei Stillstand der Trocknungsanlage bei mit Nassgut gefüllter Trocknungssäule zu beobachten, weshalb Hersteller ein regelmäßiges Umfahren der Ware bei Trocknungsunterbrechung vorschreiben.



Bilder 3.4 und 3.5: Ablagerungen in „leerer“ Trocknungsanlage

Untersuchung zur Trocknerluftströmung:

Bei der horizontalen Luftkanalanordnung wechseln sich Zu- und Abluftkanalreihen in vertikaler Richtung ab (+ Zuluft, - Abluft). Ein wesentlicher Vorteil dieser Trocknergeometrie besteht in der gleichmäßigen Verteilung der Luftströmung von einem Zuluftdach zu den vier umliegenden Abluftdächern. Betrachtet man dagegen das Fließprofil der Getreideschüttung über dem Trocknerquerschnitt, so ist dieses durch ein ausgeprägtes Geschwindigkeitsprofil gekennzeichnet. Daraus resultieren erhebliche Differenzen in der Verweilzeit, wodurch eine Übertrocknung der Partikel an den Trocknerwänden sowie eine Untertrocknung der Partikel in der Kernströmung in der Trocknermitte verursacht wird. Aufgrund der geringen Quervermischung in Schachttrocknern kommt es zusätzlich zur Ausbildung vertikaler Gutfeuchtesträhnen entlang der übereinanderliegenden Zuluft- bzw. Abluftdächer.



Bilder 3.6: Druckverteilung im Schachttrockner bei a) horizontaler Dachanordnung, b) horizontaler Dachanordnung mit gedrehten Sektionen und c) diagonaler Dachanordnung, berechnet für einen Luftvolumenstrom von $465 \text{ m}^3/\text{h}$ [SCAAR,2016]

Ergebnis: Die vorgenannten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Trocknungsluftströmung und zum Fließprofil des Trocknungsgutes belegen, dass bei der derzeit verbreiteten Bauform der Dächerschachttrockner beide keineswegs linear verteilt sind. Die Ergebnisse des Versuches aus *Anhang B* belegen, dass auch durchströmte Stoffe durch Selbstentzündung in Brand geraten können. Zwar liegt die konkret gemessene Temperatur mit ca. $225 \text{ }^\circ\text{C}$ um ca. 50 K höher als im genormten Warmlagerversuch und somit oberhalb der eigentlich zu erwartenden Zulufttemperatur von Trocknungsanlagen, jedoch wurde bei der aktuell vorherrschenden Bauform der Dächerschachttrockner nachgewiesen, dass durchaus inhomogene Durchströmungsverhältnisse auftreten können.

Ferner ist ein inhomogener Partikelstrom innerhalb der Trocknungssäule zu erwarten. Führen dann noch Eintragungen von Fremdstoffen zu einer weiteren Behinderung des Produktstromes [BABRAU,2014], so zeigt auch der Laborversuch aus *Anhang B*, dass in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit es zu einer Entzündung kommen kann. Auf Grund der vorliegenden Luftgeschwindigkeit ist mit einer sehr schnell fortschreitenden Abbrandreaktion zu rechnen.

Verifiziert: Demnach ist die These der möglichen Brandentstehung durch Selbstentzündung wissenschaftlich nachvollziehbar.

2. These – Zündinitialeintrag über die Zuluft [BABRAU,2014], [CICHA,2004], [HAUERT,2007]

These: Bei direkt beheizten Trocknern besteht die Gefahr, dass die Flammen zum Trocknerschacht durchschlagen. Bedingt durch die Staubablagerungen in den Luftschächten besteht dann erhöhte Brandgefahr. (...) Mit größeren Funken ist insbesondere dann zu rechnen, wenn aus Gründen der Energieeinsparung staubhaltige Trocknerkühlluft als Verbrennungsluft genutzt wird (Wärmerückgewinnung). Die Gefahr, dass Flammen in den Trocknerschacht gelangen, ist bei indirekt beheizten Trocknern genau dann gegeben, wenn die Heizungstrommel durchbrennt. [HAUERT,2007]

Glühende Partikel, die aus Gas- oder Ölbrenner ausgestoßen werden, erweisen sich als die größte Zündursache. Einige von diesen entstehen durch brennbare Materialien, die durch die Verbrennungsluftzufuhröffnungen zugeführt werden. Selbst in Trocknern mit Wärmetauscher, d.h. wo mittels Blechtrennung die Brennkammer von der Trockenkammer getrennt ist, gab es solche Fälle. [BABRAU,2014]

Beurteilung: Insbesondere bei der direkten Befeuern von Trocknungsanlagen besteht die Möglichkeit, dass Zündinitiale über die Zuluft zum Trocknungsgut transportiert werden. Hinsichtlich der erforderlichen Zündenergie ist zu erwarten, dass auf Maiskörner treffende glimmende Partikel eine Entzündung ganzer Körner nicht erwarten lassen. In Kenntnis des Vorhandenseins von Staubanhaftungen, die zudem mit zunehmender Trocknungsdauer in ihrem Feuchtigkeitsgehalt immer weiter reduziert werden, ist eine Zündung dieser Ansammlungen mittels Funken durchaus realistisch und können so als Initialzündung dienen.

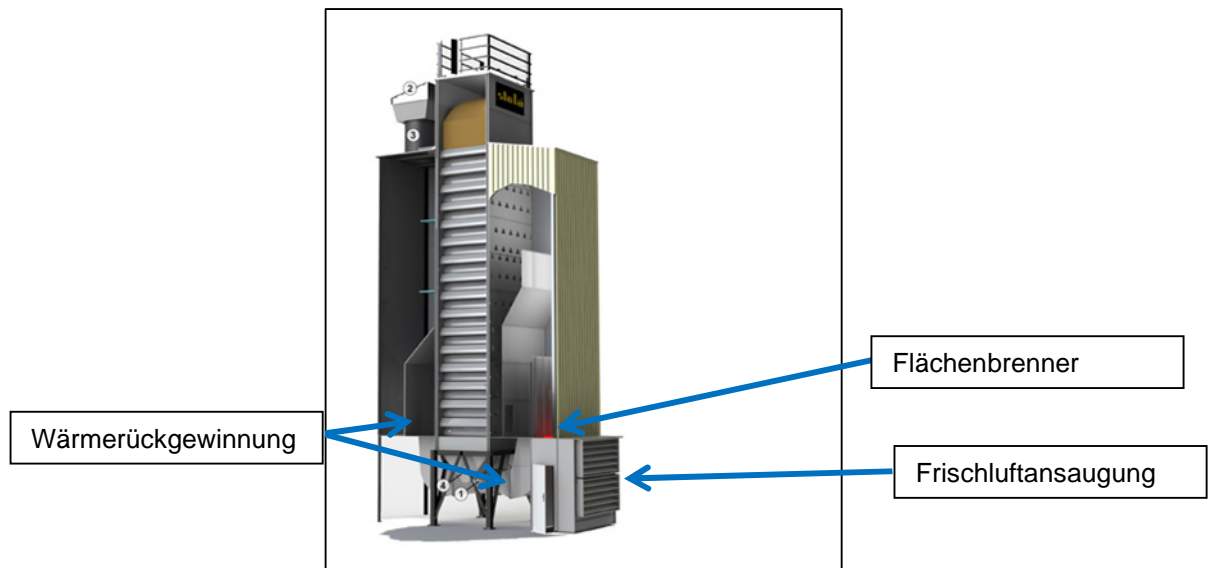


Bild 3.7: Schematische Darstellung mit Wärmerückgewinnung [STELA,2018]

Diese Zündinitiale können auf folgende Weise entstehen:

1. Nach längeren Stillstandzeiten des Trockners kann sich Rost insbesondere im Bereich der Flächenbrenner bilden. Sobald die Anlage wieder in Betrieb genommen wird, lösen sich heiße Rostpartikel und werden über die Zuluffführung bis in die Kaskaden gedrückt.



Bild 3.8: Rost im Bereich des Flächenbrenners

2. Durch die direkte Befuerung wird sämtlicher angesaugter Schmutz, Staub oder Spelzen mittransportiert und im Bereich des Brenners entzündet. Während der Trocknungskampagne ist gerade bei der Maistrocknung ein hoher Anfall an Spelzen und Häutchen auf den Betriebsstätten üblich. Durch Windstöße, Fahrzeugverkehr oder

auch beim Entladen entstehen Staub- / Schmutzaufwirbelungen, die von der Trocknungsanlage angesaugt und im Bereich des Brenners entzündet werden.



Bild 3.9: Ansaugbereich des Brenners



Bild 3.10: Ablagerungen im Ansaugbereich



Bild 3.11: Außenansicht Brenner



Bild 3.12: Teilabdeckung eines Kreuzbrenners mittels Prallblech

3. Gerade bei der Maistrocknung ist der Anfall von Spelzen und Häutchen, die auf dem „nassen“ Mais Korn „kleben“ und sich im Zuge der Trocknung des Produktes vom Mais Korn lösen, erheblich. Im Bereich der Kühlzone besteht somit die Gefahr, dass diese Anhaftungen sich lösen und mit der Luft für die Wärmerückgewinnung im Bereich höchster Temperatur, direkt hinter dem Brenner, wieder zugeführt werden und sich dort entzünden.



Bilder 3.13 und 3.14: Ablagerungen im Wärmerückführungskanal

Ergebnis: In Versuchen zur Charakterisierung und Zündwirksamkeit von inerten heißen Partikeln konnte an unterschiedlichen Staubproben nachgewiesen werden, dass diese ab einer produktspezifischen Zündgrenztemperatur bei Auftreffen auf die Staubprobe einen Schmelbrand auslösen können. Ferner wurde im Versuch festgestellt, dass alle inerten heißen Partikel mit der niedrigsten Zündgrenztemperatur durch Funkenmelder nach VdS 2518 detektiert werden [BECHEM,2020].

Wie zuvor gezeigt, können solche inerten heißen Partikel durch Rost am Brenner entstehen. Zusätzlich sind reaktive heiße Partikel über die Ansaugung oder Wärmerückgewinnung am Brenner nicht auszuschließen.

Durch den Versuchsaufbau in *Anhang C* konnte nachgewiesen werden, dass bei direkter Befuerung Zündinitiale über den Zuluftkanal zum Trocknungsgut transportiert werden und diese für trockenen, abgelagerten Staub eine ausreichende Zündenergie aufweisen können.

Verifiziert: Somit ist die These der möglichen Brandentstehungsursache „Eintrag von glimmenden Partikeln“ in die Trocknungssäule plausibel.

3. These – schadhafte Elevatoren (Becherwerke) [CICHA,2004]

These: Betriebstypisch (also nicht zwangsläufig in Folge eines technischen Defektes) kann in Elevatoren ein Zündinitial beim Durchrutschen des Antriebsgurtes entstehen. Dies kann passieren, wenn es zu Verschanzungen (Stau) im Elevator kommt und somit der Gurt über die Antriebswelle rutscht oder die Gurtspannung zu gering ist. Um diesen

Zustand frühzeitig zu erkennen, können Drehzahlwächter und Staumelder installiert werden.

Ferner kann durch Deformierung des Elevatorschachtes oder durch Schiefelauf des Antriebsgurtes der Gurt oder die Becher an den Wandungen des Elevators scheuern, bzw. anschlagen. Der letzteren Gefahr kann durch Schiefelaufwächter entgegengewirkt werden.

Beurteilung: Diese Techniken in Elevatoren sind als anerkannte Regel der Technik zu erachten und halten mehr und mehr Einzug. Dies ist nicht zuletzt der Erstellung des Explosionsschutzdokumentes nach GefStoffV und der damit einhergehenden Gefährdungsbeurteilung samt Zündquellenvermeidung geschuldet.

Ergebnis: Keine der in *Anhang A* untersuchten Schadenstellen wies Schäden am zufördernden Elevator auf. Ebenso hätte sich bei der Schadenbetrachtung bereits entzündetes Produkt im Vorratsbehälter befinden müssen. Diese Schadenbilder wurden bei den betrachteten Schadenfällen nicht vorgefunden, sodass retrospektiv festgestellt werden muss, dass die These der brandauslösenden schadhafte Elevatoren nicht bestätigt werden kann.

Falsifiziert: Die mögliche Brandentstehungsursache „schadhafte Elevatoren“ konnte in den untersuchten Schadenfällen nicht als auslösendes Ereignis identifiziert werden.

4. These – Brandentstehung durch Ausfall von Thermostaten [CICHA,2004]

These: Wenn Thermostate zur Regelung und Überwachung der Zulufttemperatur (bzw. der Brennerlaufzeit) ausfallen, so kann dies zu Überschreitung der zulässigen Höchsttemperatur am Trocknungsgut führen.

Beurteilung: In der Praxis ist es unüblich, die Messwerte der verbauten Thermostate auf ihre Richtigkeit / Genauigkeit zu überprüfen. Es muss sich also die Frage gestellt werden, ob ein Thermostat, nach Jahren der Nutzung und unter Witterungseinflüssen noch „korrekte“ Werte liefert.

Normativ wurde gefordert, dass Körnertrockner mit einem Zweipunkt-Temperaturregler und einem Temperaturbegrenzer ausgerüstet sein müssen, damit ein Überschreiten der zulässigen Höchsttemperatur für Trockenluft von 50 °C und für Warmluft von 180 °C vermieden wird [DIN3379,1975].

Ergebnis: Betrachtet man nun die angegebenen Höchsttemperaturen mit den tatsächlich zulässigen Temperaturen während der Trocknung, so ist selbst ohne den Ausfall von Thermostaten fraglich, ob diese Grenzwerte dem Brandschutz dienlich sein können.

Verifiziert: Die These der Brandentstehung durch Übertemperatur ist anhand der Ergebnisse aus *Anhang B* als durchaus realistisch zu erachten.

5. These – Brandentstehung durch Ausgasung von Materialien [CICHA,2004]

These: Durch Ausgasung der Materialien können sich in der Trocknungsanlage partiell zündfähige Dampf-Luft-Gemische bilden, die durch Funken des Glimmbrandes oder Reibungsfunken entzündet werden können.

Beurteilung: Gemäß den durchgeführten Versuchen der FSA e.V. und der Fa. GTE in *Anhang D* ist die Entstehung von Pyrolysegasen (wobei CO und H₂ dominierend sind) zwar gegeben, jedoch muss hierfür eine thermische Aufbereitung des Trocknungsgutes erfolgen. Es muss also ein auslösendes Ereignis für die thermische Aufbereitung vorliegen. Demnach folgt die These eher der „Verkettung von Ursachen“, die in dessen Folge eine weitere Ursache (z. B. das Vorhandensein eines Glimmbrandes oder von Reibungsfunken) zur Zündung des brennbaren Dampf-Luft-Gemisches annimmt.

Ergebnis: Die These widerspricht formal der Zündquellenbetrachtung. Zwar kann ein Ausgasen von Materialien nicht ausgeschlossen werden, jedoch ist das Ausgasen von Materialien nicht eine einzelne Brandursache. Nichtsdestotrotz ist diese These in Zusammenhang mit weiteren Entzündungsfaktoren zu berücksichtigen.

Falsifiziert: Als „alleinige“ Ursache ist eine Brandentstehung durch Ausgasung von Materialien nicht zu erwarten, sondern kann nur in Folge oder in Kombination mit weiteren Ereignissen wirksam werden.

6. These – Brandentstehung durch menschliches Fehlverhalten

In der Literatur ist der Faktor Mensch als Brandursache an Trocknungsanlagen nicht explizit aufgeführt.

These: Durch menschliches Fehlverhalten (unbewusst oder gar vorsätzlich) können durchaus Situationen/Betriebsumstände hervorgerufen werden, die die Entstehung eines Brandes begünstigen oder auslösen. Hierzu zählt z. B. auch die Einstellung einer zu hohen Temperatur [BABRAU,2014].

Beurteilung: Diese Brandursache umfasst sämtliche Umstände, die durch Einhaltung von Vorgaben und Anweisungen einen Schaden vermieden hätten. Dazu zählt beispielsweise das Ignorieren von Alarmen (Trocknungsanlagen werden teilweise entgegen den Angaben in der Gebrauchsanleitung unbeaufsichtigt betrieben), unterlassene Reinigung, fehlendes Umfahren der Trocknungssäule während Stillstandszeiten oder nicht durchgeführte Wartung und Instandhaltung (z. B. der Brenner).

Ergebnis: Auf Grund der handschriftlichen oder zum Teil fehlenden Dokumentation der Reinigungs- und Trocknungsparameter ist ein kausaler Zusammenhang zur Brandentstehung nur schwer zu erbringen.

Verifiziert: Die These ist grundsätzlich als relevant einzustufen.

7. These – Zoneneinteilung Trockner – Explosionsgefahr [MUJUM,2015], [MUEHL,2009]

These: Bei Getreidetrocknungsanlagen und deren Komponenten besteht die Gefahr, dass es durch Aufwirbelung von abgelagertem Getreidestaub zu einer Staubexplosion kommen kann [MUJUM,2015].

Gemäß den Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können, werden die Komponenten einer Getreidetrocknungsanlage im Allgemeinen in Zonen mit unterschiedlichen Auftrittswahrscheinlichkeiten explosionsfähiger Staub-Luft-Gemische eingeteilt [MUEHL,2009].

Zoneneinteilung [MUEHL,2009]:

Trocknungsanlagen:	feuchtes Getreide → Zone 22 ungereinigtes Getreide → Zone 21
Trocknungsanlage innerhalb:	abhängig von Produktfeuchte → keine / Zone 22
Trocknungsanlagen im Auslaufbereich:	bei gereinigtem Getreide → Zone 21

Zonendefinition [GEFSTV,2017]:

Zone 20 ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus brennbarem Staub, der in der Luft enthalten ist, ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.

Zone 21 ist ein Bereich, in dem sich im Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub bilden kann.

Zone 22 ist ein Bereich, in dem im Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub normalerweise nicht auftritt, und wenn doch, dann nur selten und für kurze Zeit.

Als Normalbetrieb gilt der Zustand, in dem Anlagen innerhalb ihrer Auslegungsparameter verwendet werden. Im Zweifelsfall ist die strengere Zone zu wählen. Schichten, Ablagerungen und Aufhäufungen von brennbarem Staub sind wie jede andere Ursache, die zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen kann, zu berücksichtigen. Die Zoneneinteilung ist in der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung (Explosionsschutzdokument) zu dokumentieren.

Beurteilung: Zur Beurteilung der Explosionsgefahr ist zu ermitteln, ob ein gefährliches explosionsfähiges Gemisch in solcher Menge auftritt, dass besondere Schutzmaßnahmen für die Aufrechterhaltung der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten oder anderer Personen erforderlich werden.

Die für die Zoneneinteilung definierte gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ist eine „Spezialität“ des gefährlichen explosionsfähigen Gemisches, da dieses unter atmosphärischen Bedingungen (0,8 – 1,1 bar und Gemischtemperaturen von -20 °C bis +60 °C) zu betrachten ist [GEFSTV,2017].

Daraus ergibt sich, dass außerhalb atmosphärischer Bedingungen keine Zonen eingeteilt werden. Dennoch lässt sich auch außerhalb der atmosphärischen Bedingungen in Zonen denken und diese als explosionsgefährdete Bereiche bezeichnen.

Die in *Kapitel 3* aufgezeigten Zuluft- und maximalen Korntemperaturen zeigen auf, dass in weiten Teilen der Anlage Temperaturen oberhalb der +60 °C vorliegen. Insbesondere im Zuluftschacht sind z. B. bei der Maistrocknung Temperaturen von bis zu 130 °C zu erwarten.

Dabei gilt zu beachten, dass Gemische bei höheren Temperaturen leichter entzündbar sind [ESCIS6,2001].

Die im *Anhang A* aufgezeigten Schäden an Trocknungsanlagen zeigen, dass keine Explosionen in Folge oder als Ursache von Trocknerbränden stattgefunden haben, bzw. solche Ereignisse nicht dokumentiert wurden (retrospektive Betrachtung).

In Anlehnung an die kohärente Beurteilungssystematik nach Lottermann [LOTT,2012] und technischen Regelwerken [TRGS720,2020] gilt es zu beleuchten, welche Abläufe bei der Trocknung vorliegen und abzuschätzen, mit welchen Staubkonzentrationen in welchem Anlagenteil zu rechnen ist.

Phasen / Abläufe der Trocknung:

- (1) Befüllung der Trocknungsanlage: Zu Beginn der Trocknung wird die Trocknungssäule mit dem nassen Trocknungsgut befüllt (Kühlzone, Trockenzone und Vorratsbehälter).
- (2) Umlauf des Trocknungsgutes: Da das „erste“ Trocknungsgut noch keine Trocknung erfahren hat, wird die Trocknungsanlage im „Umlauf“ betrieben – sprich: Ausgetragenes Trocknungsgut wird dem Vorratsbehälter wieder zugeführt. Alternativ kann die Trocknungssäule bis zu einem gewissen Anteil mit bereits lagerfähigem Material befüllt werden.
- (3) Trocknung: Diese Phase ist die eigentliche Trocknung. Hierbei erreicht sämtliches ausgetragenes Material den Zielfeuchtigkeitsgehalt.
- (4) Stillstand: Kommt es zu einer Unterbrechung der Anlieferung von Trocknungsgut, so muss die Trocknung unterbrochen werden.
- (5) Leerfahren der Anlage: Zum Ende der Trocknungskampagne wird die Anlage zumeist im Umlauf gefahren und anschließend die Trocknungssäule leer gefahren.
- (6) Instandhaltung: Während dieser Zeit befindet sich Instandhaltungspersonal in der Anlage und es erfolgt keine Trocknung; Brenner und Lüfter sind abgeschaltet, ggf. wird Produkt zum Zwecke der Produktflusskontrolle umgefahren.

In der folgenden Tabelle soll anhand der Betriebszustände in den einzelnen Anlagenteilen abgeschätzt werden, ob die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Gemische zu erwarten ist. Unstrittig ist, dass brennbare Stoffe vorliegen und eine Verteilung dieser in der Trocknungsluft gegeben ist.

Tabelle 3: Detaillierte Abschätzung der möglichen Ex-Gefährdung und Zündquellen

Phase	Anlageneinheit (Nassgut = erntefeuchtes Produkt; Trockengut = Produkt mit Zielfeuchtigkeitsgehalt von ca. 15 %; *Zuluft hier mit Wärmerückgewinnung)							explosionsgefährdeter Bereich	Zündquelle Brenner
	Vorbehälter	Säule	Austrag	Zuluft*	Abluft	Filter	nachgesch. Aggregate		
(1)	Nassgut	Nassgut	leer	leer	Geringer Staubanfall, da Trocknungsgut noch feucht	Feuchtes Abscheideprodukt	Elevator: Feuchtes Trocknungsgut	nein	aus
(2)	Nassgut / Trockengut	Nassgut/ Trockengut	Nassgut/ Trockengut	Zumeist ohne Umluft, daher leer	Geringer Staubanfall, da Trocknungsgut noch feucht	Feuchtes Abscheideprodukt	Elevator: Feuchtes Trocknungsgut	nein	aus
(3)	Nassgut	Von oben nach unten: Nassgut bis Trockengut	Trockengut	Rückführung von Staub und sonst. Besatz	Staubaustrag in Abluft durch Mitführung im Luftstrom, jedoch in gesättigter Luft (Luftfeuchtigkeit 99 %)	Feuchtes Abscheideprodukt	Elevator: Trockenes, jedoch sehr staubarmes Trocknungsgut	Ggf. im Zuluftschacht	ein
(4)	Nassgut	Von oben nach unten: Nassgut bis Trockengut	Trockengut	abgeschaltet	Kein Luftstrom, abgeschaltet, ggf. abgelagerter Staub (erfahrungsgemäß jedoch Klumpenbildung)	abgeschaltet	abgeschaltet	nein	aus
(5)	leer	Nassgut/ Trockengut	Trockengut	abgeschaltet	abgeschaltet	abgeschaltet	abgeschaltet	nein	aus
(6)	leer	Leert sich	Trockengut	abgeschaltet	abgeschaltet	abgeschaltet	abgeschaltet	nein	aus

Die untere Explosionsgrenze (UEG) der meisten organischen Stäube liegt im Bereich von 30 g/m³ bis hin zu 100 g/m³ oder sogar 500 g/m³ (in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung) [GESTIS].

Zur Abschätzung der Konzentration ist die Abluftleistung / Luftdurchströmung von Trocknungsanlagen zu betrachten. Diese liegen realistisch – je nach Größe und Ausführung der Anlage – bei Volumenströmen \dot{V} von 60.000 m³/h und darüber.

Würde nun eine mittlere Konzentration c_{mittel} von mind. 30 g/m³ zur Erreichung der UEG vorliegen, so würde folgender Massenstrom (\dot{M}) sich entweder in der Anlage ablagern oder über die Abluft abgeben / abgeschieden:

Beispielrechnung:

$$\dot{M} = c_{mittel} \times \dot{V} = \frac{30 \text{ g}}{\text{m}^3} \times 60.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = \frac{180.000 \text{ g}}{\text{h}} = 1,8 \text{ t/h} \quad (3.3.1)$$

Eine Abscheidung / Ablagerung von 1,8 t/h (konservativ gerechnet, bei kontinuierlichem Staubanfall) wäre bei einer beispielhaften Trocknungsleistung von 15 t/h ein Massenverlust von 12 %. Dies wäre allein aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar und erscheint somit unrealistisch.

Ergebnis: Die detaillierte Betrachtung der *Tabelle 3* zeigt auf, dass im Normalbetrieb zwar einerseits im Bereich des Zuluftschachtes bei Vorhandensein einer Wärmerückgewinnung mit dem Auftreten von Staub zu rechnen ist, jedoch wird anhand der obigen Massenbetrachtung eine Konzentration, die oberhalb der UEG liegt, ausgeschlossen. Eine inhomogene Staubentwicklung, wobei kurzzeitig eine Konzentration oberhalb der UEG zu erwarten ist, ist auch auszuschließen, da während des Austrages von Produkt die Leistung der Umluft reduziert oder gar abgeschaltet wird.

Falsifiziert: Daher ist für die in dieser Ausarbeitung betrachteten Getreidetrocknungsanlagen das Auftreten eines gefährlichen explosionsfähigen Gemisches nicht zu erwarten.

3.4 Trocknerbrände (Ablauf und Problemfelder)

So unterschiedlich die Ursachen der Brandentstehung sind, so ähnelt sich jedoch häufig der Ablauf eines Brandereignisses sowie die typischerweise auftretenden Problemfelder bei einem Trocknerbrand.

Auf Grundlage der Auswertung der Trocknerbrände aus *Anhang A* erfolgt die Branderkennung zumeist durch Geruchs-/Rauchwahrnehmung von Mitarbeitern und Anwohnern oder auf Grund einer Störmeldung aus der vor- oder nachgeschalteten Anlagentechnik. Sofern Mitarbeiter auf dem Betriebsgelände zugegen sind, wird mit der Ursachensuche begonnen.

Brandtypische Erscheinungen wie Rauch oder Verfärbungen/Durchbrand an der Trocknungsanlage geben Gewissheit über das vorliegende Brandereignis.

Daraufhin wird die Trocknungsanlage abgeschaltet (wobei der Abluftventilator bauartbedingt eine gewisse Zeit nachläuft und den Brand noch weiter „anfacht“) und die Feuerwehr alarmiert.

Mit Eintreffen der Feuerwehr wird versucht an den Brandherd zu gelangen, um ein Ablöschen der in Brand geratenen Trocknungssäule zu erreichen. Hierfür wird entweder Löschwasser von oben (z. B. über vorhandene trockene Löschleitung oder Revisionsöffnungen) eingeleitet oder die Trocknungsanlage an ihren Außenwänden zerstörend geöffnet.

Anschließend erfolgt der oftmals manuelle Austrag des in Brand geratenen Trocknungsgutes und ein abschließendes Ablöschen außerhalb der Anlage im Freien.

Ort und Umfang des betroffenen Brandbereiches ist bei jedem Trocknerbrand unterschiedlich. Jedoch ist häufig eine Brandentstehung im Bereich des Überganges von Trocknungs- zu Kühlzone, sowie trichterförmiger Ausbreitung in Richtung der Abluft zu beobachten.

Durch den modularen Aufbau von Trocknungsanlagen ist bei einem Brandgeschehen im unteren Trocknerbereich häufig eine Demontage der darüber befindlichen Kaskaden erforderlich. Dadurch ist der Montageaufwand häufig ähnlich umfangreich wie bei dem Neubau einer Trocknungsanlage.

Fehlende oder unzureichende Branderkennungselemente

Werkseitig bieten die meisten Hersteller von Trocknungsanlagen lediglich Temperaturfühler in der Warmluft, zur Überwachung der Trocknungsguttemperatur und der Ablufttemperatur an. Die Brandschäden in *Anhang A* haben gezeigt, dass mittels Temperaturüberwachung nicht zuverlässig ein Entstehungsbrand erkannt wird.

Ein Grund hierfür liegt in der verhältnismäßig geringen Anzahl an Temperaturfühlern. Wenn sich der Ort der Brandentstehung in einem gewissen Abstand zum Temperaturfühler befindet, dann ist durch die Isolationswirkung der Schüttung kein signifikanter Temperaturanstieg gegeben. Verlässt man sich auf die Temperaturmessungen in der Abluft, so ist zu bedenken, dass derart große Luftströmungen vorhanden sind, dass die abgegebene Wärme eines Entstehungsbrandes sich erst in den hinteren Nachkommastellen der Temperaturmessung bemerkbar macht. Eine zuverlässige Branderkennung ist demnach in keinem Fall mittels der vorhandenen Temperaturfühler gegeben.

Fehlender Notaustrag

Sollte nun, auf welche Weise auch immer, ein Brand erkannt werden, so besteht bei den meisten Trocknungsanlagen keine Möglichkeit die Produktsäule schnell und gezielt in einen nicht gefährdeten Bereich (z. B. auf das Werksgelände) abzuleiten. Dies birgt zwei Probleme in sich.

Zum einen kann die Trocknerkonstruktion nicht schnell von der Brandlast befreit werden und so eine thermische Entlastung der Konstruktion herbeigeführt werden. Zum anderen müssen die regulären Förderwege für den Austrag von Brandgut genutzt werden. Neben der zusätzlichen Schädigung von Transportwegen ist zu beachten, dass im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung für das Explosionsschutzdokument nach GefStoffV diese Förderwege im Allgemeinen als EX-Zonen (Zone 20, 21 oder 22) ausgewiesen sind. Durch den Eintrag von Zündinitialen ist somit eine Ausweitung des Sachschadens (und durch die mögliche Explosion auch mit der Folge eines Personenschadens) auf die Umgebung nicht auszuschließen.

Keine Zugangsmöglichkeiten für die Brandbekämpfung

Wie in *Bild 4.3* ersichtlich, befinden sich an den meisten Trocknungsanlagen nur sehr kleine Revisions- und Einstiegsluken. Für die herstellerseitig vorgeschriebene regelmäßige Reinigung mögen die vorhandenen Öffnungen vielleicht noch als ausreichend erachtet werden, jedoch nicht als Angriffswege für eine Brandbekämpfung.

Auch aus arbeitsschutzrechtlicher Sicht ist der Einstieg und die Arbeit innerhalb eines Trockners jedoch in Frage zu stellen, da für den Reinigungsvorgang Einblick in jede Kaskade genommen werden muss und hierfür an den Trocknerkaskaden aufgestiegen werden muss (siehe Bild 3.15).



Bild 3.15: Ungesicherter Aufstieg Bild 3.16: Aufstiegsmöglichkeit abluftseitig

Die im Trocknerkopf befindliche Revisionsklappe kann für einen Einstieg nicht genutzt werden, da die Kaskaden auf das Gewicht eines Menschen nur eingeschränkt ausgelegt sind. Diese Öffnung dient lediglich zu visuellen Kontrollzwecken.

Somit ist im Brandfall einerseits keine Brandbekämpfung des Inneren von außen möglich und andererseits wird ein Einsatzleiter keine Einsatzkraft (sofern sie mit persönlicher Schutzausrüstung und umluftunabhängigem Atemschutz überhaupt durch die Revisionsöffnung passen würde) auch noch der Gefahr des Absturzes aussetzen.

Durch den Mangel an Revisionsöffnungen ist somit nach einer Branderkennung auch keine Lokalisation des Brandherdes möglich, da keine gefahrlose und umfassende Möglichkeit zur Erkundung besteht. Diesem Mangel kann durch den Einsatz einer Wärmebildkamera nur bedingt Abhilfe geschaffen werden, da auch hier die Schüttung isolierend wirkt und nur grobe Rückschlüsse auf die Lage der Brandstelle innerhalb der Schüttung erlaubt.

Fehlende Notfallplanung

Die Betreiber sind auf das Ereignis „Trocknerbrand“ nur im geringen Maße eingestellt. Es fehlt an der ganzheitlichen (präventiven und kurativen) Betrachtung den Eintritt zu verhindern oder die Auswirkungen eines Brandes auf einem geringen Niveau zu halten. Hinzu kommt die allgemein fehlende Einsatzerfahrung der Lösch- und Führungskräfte in der Einsatzabarbeitung von Getreidetrocknerbränden.

Um diese Brände effektiv bekämpfen zu können, ist ein dezidiertes Wissen über den Aufbau und das Funktionsprinzip der betroffenen Einrichtung von Nöten, um gezielte Maßnahmen einleiten zu können.

Keine Löscheinrichtungen

Es sind keine Löscheinrichtungen vorhanden, die die Ausbreitung eines Entstehungsbrandes verhindern sowie die Konstruktion thermisch schützen. Die Schadenfälle aus *Anhang A* zeigen, dass bis zum Eintreffen der Feuerwehr, die gezielt erste Löschmaßnahmen einleiten kann, sich der Brand bereits ausgedehnt und die Tragwerkskonstruktion sowie die Verkleidungselemente geschädigt hat.

Materialwahl [SEIDEL,2001]

Getreidetrockner werden zum Teil aus Stahl und Stahlblech, insbesondere jedoch aus Aluminium als Hauptwerkstoff gefertigt.

Die Verwendung von Aluminium gegenüber Stählen liegt darin begründet, dass Aluminium eine niedrigere Dichte hat (ist somit leichter als Stahl), gut kaltformbar und deutlich witterungsbeständiger ist.

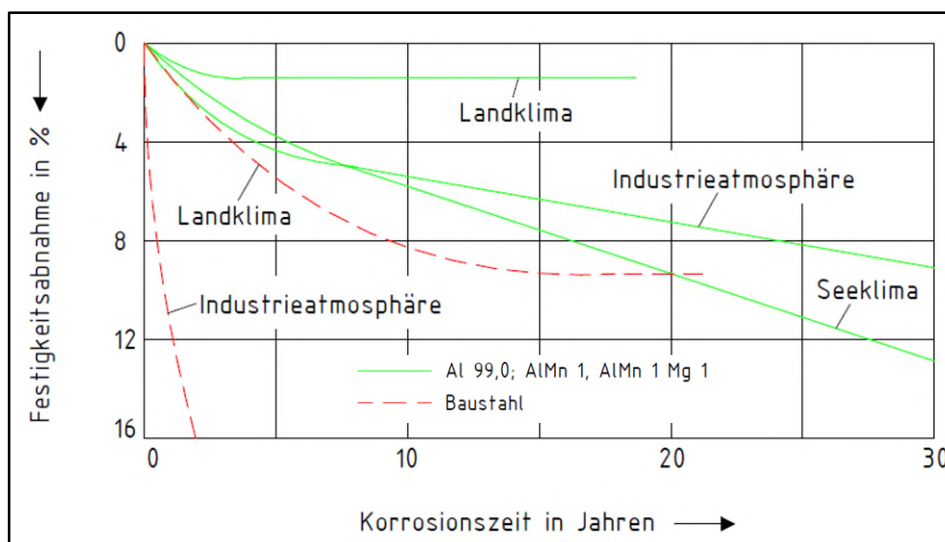


Bild 3.17: Festigkeitsabnahme durch Korrosion [SEIDEL,2001]

Diese Grafik zeigt, dass durch die Verwendung von Aluminium als Werkstoff eine Festigkeitsabnahme auf Grund von Korrosion in einem Landklima langfristig nicht gegeben ist. Trocknungsanlagen werden beim Erzeuger oder bei den Lagerstätten betrieben, die sich häufig in ländlichen Regionen befinden.

Jedoch verlieren sowohl Stahl wie auch Aluminium durch Wärmeeinwirkung Ihre Festigkeit.

Das folgende Bild zeigt exemplarisch die Abminderung der Festigkeit bei Temperatureinwirkung von Stählen (hier S235) [THIENE,2010]:

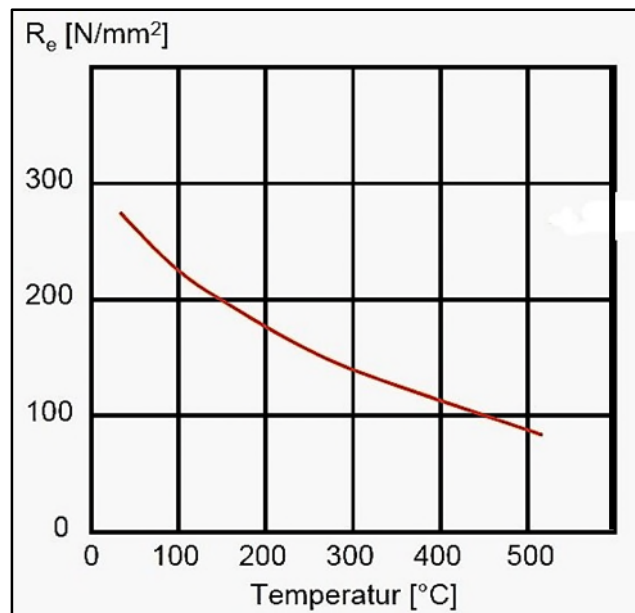


Bild 3.18: Warmzugfestigkeit eines S235 [THIENE,2010]

4 Rechtliche Anforderungen an Trocknungsanlagen

Eine Trocknungsanlage weist, wie alle Maschinen, einen Lebenszyklus auf. Im Laufe dieses Lebenszyklus gelten unterschiedliche Gesetze, Verordnungen und Vorschriften. Auf Ermächtigungsgrundlage von Gesetzen und Verordnungen werden Technische Regeln erlassen, die Hinweise und technische Ausführungsbeispiele zur Umsetzung der Forderungen enthalten. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die Forderungen der Gesetze und Verordnungen erfüllt sind (Vermutungswirkung). Zum Zeitpunkt der Bekanntgabe stellen diese dann den aktuellen Stand der Technik dar [DGUV,2019].

Darüber hinaus können Normen und Richtlinien von Interessengruppen zur Anwendung kommen. Die Anwendung dieser ist so lange freiwillig, wie sie nicht vom Gesetzgeber zwingend vorgeschrieben oder Vertragsbestandteil beim Kauf der Anlage werden. Grundsätzlich ist zwischen den rechtlichen Anforderungen an den Betrieb und an die Beschaffenheit einer Anlage zu unterscheiden.

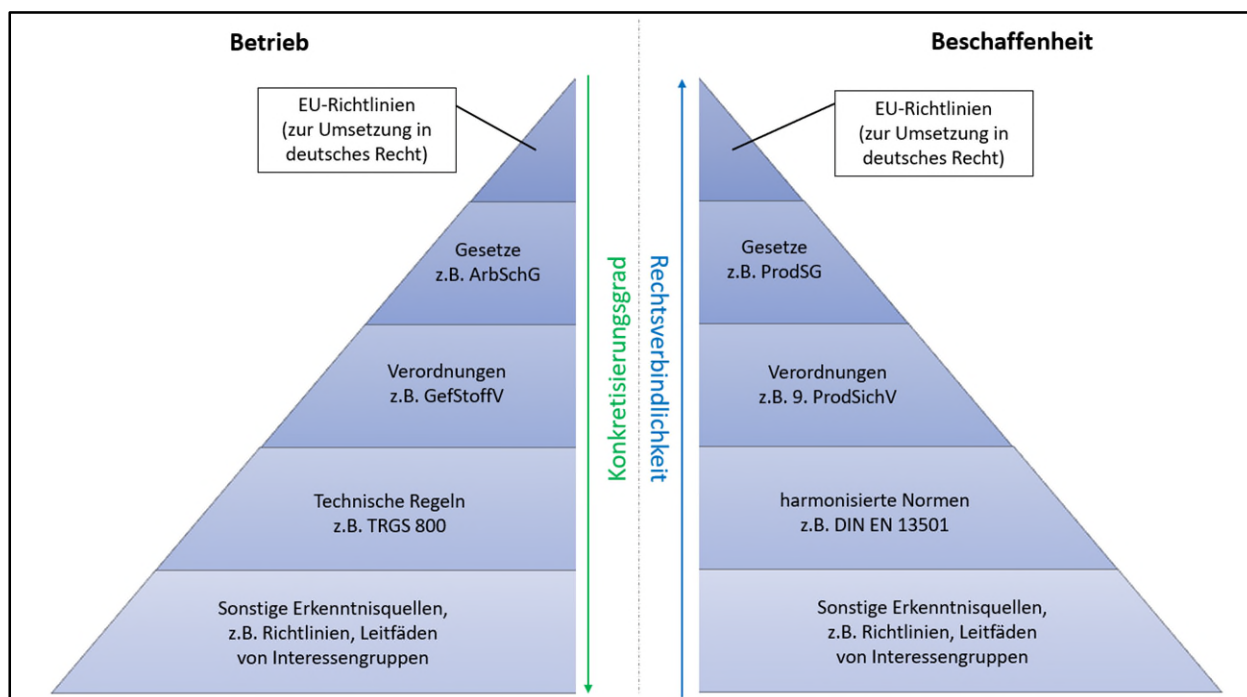


Bild 4.1: Rangfolge von Rechtsverbindlichkeiten in Anlehnung an [BARTH,2022a]

In dieser Abhandlung betrachtete Phasen des Lebenszyklus einer Trocknungsanlage:

- Entwicklung / Inverkehrbringen
- Aufbau
- Betrieb

Betrachtet man die für Trocknungsanlagen geltenden und vorhandenen Vorschriften und Regelwerke, so müssen diese in ihrer Lebensphase insbesondere nach den Adressaten differenziert werden.

Als Adressat der Rechtsvorschriften ist im Falle von Trocknungsanlagen zwischen dem Hersteller / Inverkehrbringer und dem Betreiber zu differenzieren.

Im ersten Schritt werden die für Trocknungsanlagen geltenden Rechtsvorschriften des ersten Lebenszyklus „Entwicklung / Inverkehrbringen“ des Herstellers und Inverkehrbringers betrachtet, anschließend die des Lebenszyklus „Aufbau“ und „Betrieb“ für den Betreiber.

4.1 Rechtsvorschriften des Herstellers / Inverkehrbringers

EG-Maschinenrichtlinie:

Richtlinien des europäischen Parlamentes sollen Handelshemmnisse innerhalb des europäischen Wirtschaftsraumes (EWR) abbauen. Die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [RL42EG,2006] hat ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung für Maschinen und unvollständige Maschinen beim Inverkehrbringen zum Ziel.

EG-Richtlinien entfalten ihre Rechtskraft auf Grundlage des EG-Vertrages erst durch Umsetzung in nationales Recht.

Diese Umsetzung erfolgte in Deutschland in das Produktsicherheitsgesetz [PRODSG,2020] und die darauf aufbauende Maschinenverordnung (Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz, 9. ProdSV) [PRODSV,2011]. Diese Regelungen haben insbesondere den Personenschutz zur Aufgabe.

Folgende Inhalte sind für diese Abhandlung mit Trocknungsanlagen in Zusammenhang zu bringen:

Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) [PRODSG,2020]

§ 1 (1) Dieses Gesetz gilt, wenn im Rahmen einer Geschäftstätigkeit Produkte auf dem Markt bereitgestellt, ausgestellt oder erstmals verwendet werden.

§ 1 (2) Dieses Gesetz gilt auch für die Errichtung und den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen, die gewerblichen oder wirtschaftlichen Zwecken dienen oder durch die Beschäftigte gefährdet werden können [...].

§ 2 30. f) Im Sinne dieses Gesetzes sind überwachungsbedürftige Anlagen [...] Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen.

§ 3 (1) 2. Soweit ein Produkt einer oder mehreren Rechtsverordnungen nach § 8 Absatz 1 unterliegt, darf es nur auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn es [...] die Sicherheit und Gesundheit von Personen oder sonstige in den Rechtsverordnungen nach § 8 Absatz 1 aufgeführte Rechtsgüter bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung nicht gefährdet.

§ 3 (4) Sind bei der Verwendung, Ergänzung oder Instandhaltung eines Produkts bestimmte Regeln zu beachten, um den Schutz von Sicherheit und Gesundheit zu gewährleisten, ist bei der Bereitstellung auf dem Markt hierfür eine Gebrauchsanleitung in deutscher Sprache mitzuliefern, sofern in den Rechtsverordnungen nach § 8 keine anderen Regelungen vorgesehen sind.

§ 6 (2) Der Hersteller, sein Bevollmächtigter und der Einführer haben jeweils im Rahmen ihrer Geschäftstätigkeit Vorkehrungen für geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von Risiken zu treffen, die mit dem Verbraucherprodukt verbunden sein können, dass sie auf dem Markt bereitgestellt haben; die Maßnahmen müssen den Produkteigenschaften angemessen sein und reichen bis zur Rücknahme, zu angemessenen und wirksamen Warnungen und zum Rückruf.

Maschinenverordnung (9. ProdSV) [PRODSV,2011]

§ 1 (1) Diese Verordnung gilt für die Bereitstellung auf dem Markt und die Inbetriebnahme von folgenden neuen Produkten:

1. Maschinen
7. unvollständige Maschinen

§ 2 12.: Die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen sind die verbindlichen Vorschriften für die Konstruktion und den Bau von Produkten, für die diese Verordnung gilt. Zweck dieser Anforderungen ist es, ein hohes Maß an Sicherheit und

Gesundheitsschutz von Personen und gegebenenfalls von Haustieren, die Sicherheit von Sachen sowie, soweit anwendbar, den Schutz der Umwelt zu gewährleisten. Die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen sind in Anhang I der Richtlinie 2006/42/EG angegeben. [...]

§ 3 (1) Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter darf Maschinen nur in den Verkehr bringen oder in Betrieb nehmen, wenn sie bei ordnungsgemäßer Installation und Wartung und bei bestimmungsgemäßer Verwendung oder vorhersehbarer Fehlanwendung die Sicherheit und die Gesundheit von Personen und die Sicherheit von Haustieren und Gütern und, soweit anwendbar, die Umwelt nicht gefährden.

§ 3 (2) 1. Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter muss vor dem Inverkehrbringen oder vor der Inbetriebnahme einer Maschine sicherstellen, dass die Maschine den in Anhang I der Richtlinie 2006/42/EG aufgeführten, für sie geltenden grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen entspricht [...].

Anhang I der Richtlinie 2006/42/EG [RL42EG,2006]

1.1.2. a) Die Maschine ist so zu konstruieren und zu bauen, dass sie ihrer Funktion gerecht wird und unter den vorgesehenen Bedingungen — aber auch unter Berücksichtigung einer vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung der Maschine — Betrieb, Einrichten und Wartung erfolgen kann, ohne dass Personen einer Gefährdung ausgesetzt sind. [...]

1.1.6. Bei bestimmungsgemäßer Verwendung müssen Belästigung, Ermüdung sowie körperliche und psychische Fehlbeanspruchung des Bedienungspersonals auf das mögliche Mindestmaß reduziert sein unter Berücksichtigung ergonomischer Prinzipien wie:

- Möglichkeit der Anpassung an die Unterschiede in den Körpermaßen, der Körperkraft und der Ausdauer des Bedienungspersonals;
- ausreichender Bewegungsfreiraum für die Körperteile des Bedienungspersonals;
- Vermeidung eines von der Maschine vorgegebenen Arbeitsrhythmus;
- Vermeidung von Überwachungstätigkeiten, die dauernde Aufmerksamkeit erfordern;
- Anpassung der Schnittstelle Mensch-Maschine an die voraussehbaren Eigenschaften des Bedienungspersonals.

1.5.5. Jedes Risiko einer Verletzung durch Berührung von heißen oder sehr kalten Maschinenteilen oder Materialien oder durch Aufenthalt in ihrer Nähe muss durch geeignete Vorkehrungen ausgeschlossen werden. [...]

1.5.6. Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass jedes Brand- und Überhitzungsrisiko vermieden wird, das von der Maschine selbst oder von Gasen, Flüssigkeiten, Stäuben, Dämpfen und anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Stoffen ausgeht.

1.5.15. Die Teile der Maschine, auf denen Personen sich eventuell bewegen oder aufhalten müssen, müssen so konstruiert und gebaut sein, dass ein Ausrutschen, Stolpern oder ein Sturz auf oder von diesen Teilen vermieden wird. Diese Teile müssen erforderlichenfalls mit Haltevorrichtungen ausgestattet sein, die benutzerbezogen angebracht sind und dem Benutzer einen sicheren Halt ermöglichen.

1.6.1. Die Einrichtungs- und Wartungsstellen müssen außerhalb der Gefahrenbereiche liegen. Die Einrichtungs-, Instandhaltungs-, Reparatur-, Reinigungs- und Wartungsarbeiten müssen bei stillgesetzter Maschine durchgeführt werden können. Kann mindestens eine der vorgenannten Bedingungen aus technischen Gründen nicht erfüllt werden, so sind die erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, damit diese Arbeiten sicher ausgeführt werden können [...].

1.6.2. Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass alle Stellen, die für den Betrieb, das Einrichten und die Instandhaltung der Maschine zugänglich sein müssen, gefahrlos erreicht werden können.

1.6.5. Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass die Reinigung innen liegender Maschinenteile, die gefährliche Stoffe oder Zubereitungen enthalten haben, möglich ist, ohne dass ein Einsteigen in die Maschine erforderlich ist; ebenso müssen diese Stoffe und Zubereitungen, falls erforderlich, von außen abgelassen werden können. Lässt sich das Einsteigen in die Maschine nicht vermeiden, so muss die Maschine so konstruiert und gebaut sein, dass eine gefahrlose Reinigung möglich ist.

Gebrauchsanleitungen der Hersteller für den Betreiber:

Die Inhalte und die sich nach Herstellervorgaben ergebenden Anforderungen ähneln sich bei vergleichbarer Anlagentechnik sehr, sodass die Anforderungen anhand der Beispiele der Fa. Stela und der Fa. Neuero aufgeführt werden [STELA,1992], [NEUERO].

Allgemeine Hinweise:

- Benutzen Sie die Trocknungsanlage nicht als Silo – Brandgefahr!
- Lassen Sie die Trocknungsanlage nicht ohne Aufsicht in Betrieb.
- Halten Sie den Trockner sauber. Bei Verschmutzung droht Brandgefahr.
- Lagern Sie in der Nähe des Trockners und seiner technischen Bestandteile keine brennbaren oder explosiven Materialien. Körnertrockner sind Anlagen mit erhöhtem Brandrisiko. Der Brandgefahr muss vorgebeugt werden, indem man die maximale Trocknungstemperatur, in Abhängigkeit des zu trocknenden Produkts, nicht überschreitet.
- Im Fall der Brandentstehung gehen Sie folgendermaßen vor:
 1. Hauptschalter am Schaltschrank ausschalten bzw. NOT-AUS betätigen. Es muss auf jeden Fall die Luftzufuhr zum Trocknen unterbunden werden (Ventilator aus).
 2. Alle Klappen und Luken am Trockner schließen.
 3. Feuerwehr alarmieren und einweisen.
 4. Auf keinen Fall Trockner entleeren, solange Brandherd nicht gelöscht ist. Am gesamten Trockner besteht während des Betriebes Verbrennungsgefahr. Der Trockner darf unter keinen Umständen betreten werden. Auch nach dem Abstellen können noch hohe Temperaturen herrschen. Die Anlage muss erst ausreichend gekühlt werden. *(Anmerkung Autor: Bei Bränden innerhalb der Trocknungssäule kann das Trocknungsprodukt nicht gefahrlos erreicht, bzw. abgelöscht werden. Daher ist fraglich, wie eine Ablöschung ohne Entleerung ablaufen soll – siehe auch Anhang A)*
- Personen sind gegen ein Herabstürzen zu sichern. [...]

Anwendungsbereich:

- Der Trockner ist zum Trocknen von biologisch ausgereiftem, unbeschädigtem, vorgereinigtem Getreide, Mais und sonstigen Körner- und Hülsenfrüchten bestimmt. [...] Der Trockner darf nur zum Trocknen von rieselfähigen Gütern eingesetzt werden. Verschmutzungen können zur Klumpenbildung führen, welche die Leistung des Trockners herabsetzen und schlimmstenfalls einen Brand auslösen. [...]
- Mit Rücksicht auf die Gefahr von Verstopfungen und daraus resultierenden Bränden sollte das zu trocknende Produkt vorgereinigt werden. *(Anmerkung Autor: Es gibt keine Definition für eine Vorreinigung. Als handelsfähig gilt ein Produkt mit 2 % Besatz, bestehend aus Spelzen, Halmen und sonstigen Fremdstoffen. Eine Reinigung unter 2 % Besatz würde neben dem energetischen, maschinellen und zeitlichen Aufwand darüber hinaus monetäre Handelseinbußen bedeuten. Allgemein wird bei der heutigen Erntetechnik die Handelsfähigkeit angenommen.)*
- Insbesondere bei der Trocknung von Sonnenblumen, aber auch bei Raps herrscht äußerste Brandgefahr! Warmlufttemperaturen von 60°C nicht überschreiten! Nur gereinigtes Produkt verarbeiten und den Trockner vor der Trocknung sorgfältig säubern! Reinigung je nach Verschmutzungsgrad und Produkt in regelmäßigen Abständen wiederholen.

Trockengutaustrag:

- Überprüfen Sie, ob der Austrag gleichmäßig fördert. Zur Überprüfung ist der Trocknungsvorgang zu unterbrechen und die Abkühlzeit einzuhalten. Bewegen sich die Körner einer Säule während des Austrages nicht, liegt eine Verstopfung vor, die beseitigt werden muss. Notfalls durch totales Entleeren und Säubern des Trockners, ansonsten besteht Brandgefahr.
- Beseitigen Sie Fremdstoffe, die in Ihren Trockner gelangt sind, sofort! Ansonsten kann es zu Verstopfungen und Bränden kommen!

Luftherhitzer:

- Gasflächenbrenner: Auftretende Verschmutzungen im Bereich unter der Brennerblende sind umgehend zu beseitigen.

- Wird ein Feststoffbrenner eingesetzt, muss ein indirekter Luftherhitzer verwendet werden, um den Eintrag von Funken, brennenden Spänen oder anderen glimmenden oder brennenden Teilen in die angeschlossenen Anlagenteile zu verhindern. Bei Direktbetrieb oder im Falle eines beschädigten indirekten Luftherhitzers besteht Brandgefahr!

Unterbrechung des Trocknungsprozesses:

- Der Trocknungsprozess kann im Notfall ohne Entleerung des Produkts aus dem Trockner unterbrochen werden. In diesem Fall ist erhöhte Vorsicht geboten, da das Produkt im Trockner eine Ursache der potentiellen Brandgefahr darstellt. Ist es notwendig die Trocknung zu unterbrechen, so müssen nach Abstellen des Brenners bzw. der Wärmezufuhr die Ventilatoren mind. zwei Stunden nachlaufen. Sollte die Ware ein bis zwei Tage im Trockner bleiben, ist es unbedingt notwendig, jeden Tag den Trockner zweimal mindestens zwei Stunden zu belüften und mit den Fördergeräten umlaufen zu lassen. Dabei ist die Trocknungssäule auf Verklumpungen und Nestbildung zu überprüfen – Brandgefahr!
- Um einem spontanen Temperaturanstieg des Produkts im Trockner vorzubeugen, ist es notwendig, alle 4 Stunden (z. B. vormittags und abends) den Trockner eine Stunde zu belüften und das Produkt mit den Fördergeräten umlaufen zu lassen. Bei Unterbrechung des Trocknungsprozesses muss das im Trockner befindliche Produkt mindestens alle 4 Stunden belüftet werden. Brandgefahr!

Kontrolle und Reinigung des Trockners:

- Folgende Kontrollen sind in regelmäßigen Abständen während der Trocknung durchzuführen:
 - Sichtkontrolle der Trocknungsanlage bezüglich Verschmutzungen, Verfärbungen und Deformationen. [...]
 - Beobachtung einer eventuellen Emissionssteigerung (Staub, Lärm) [...]
 - Rechtszeitig vor Beginn der Trocknungsperiode ist eine Sichtkontrolle der Anlage mit anschließendem Probelauf durchzuführen.
 - Kontrolle und Wartung der Brenner erfolgt gemäß den Vorschriften der Hersteller.

- Spätestens nach Beendigung der Trocknungsperiode, bei Produktwechsel, längerem Stillstand oder sonstigen Notwendigkeiten ist die Trocknungsanlage zu reinigen. [...] Wir empfehlen eine wöchentliche Reinigung!

Tabelle 4: Wartungsintervalle [MDB]

Schicht	Intervall					Gegenstand der Wartung	Tätigkeit
	täg- lich	wö- chent- lich	mo- nat- lich	halb- jäh- rig	ande- rer		
X						Gesamter Trockner	Kontrolle und eventuelle Reinigung
X						Brenner	Sichtkontrolle
	X					Luftkanäle	Kontrolle und Reinigung
X						Lager der Motoren	Kontrolle
		X				Zentroabscheider	Sichtkontrolle
	X					Pneumatikeinheit	Sichtkontrolle, Ölstand prüfen, entwässern
		X				Pneumatikzylinder	Sichtkontrolle (nur bei Stillstand der Anlage)
					X	Reinigung des Trockners	Nach jedem Fruchtwechsel und nach Abschluss der Trocknungsaison

Tabelle 5: Wartungsintervalle [NEUERO]

Schicht	Intervall					Gegenstand der Wartung	Tätigkeit
	täg- lich	wö- chent- lich	mo- nat- lich	halb- jäh- rig	ande- rer		
X						Gesamter Trockner	Kontrolle und Reinigung produktabhängig
X						Brenner	Sichtkontrolle
	X					Luftkanäle	Kontrolle und Reinigung
X						Austrag	Kontrolle und Reinigung
X						Austrag	Kontrolle der Zylinderverschraubung, Lagerkon- trolle, Dichtheit Luft
	X					Staubabscheider	Sauberkeit und Dichtheit kontrollieren, Kontrolle der abgeschiedenen Staubmenge
X						Kompensatoren	Sichtkontrolle

Diskussion der herstellerseitigen Einhaltung rechtlicher Anforderungen:

Betrachtet man die Anforderungen, die an Maschinen gestellt werden, so kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Maschine so beschaffen sein muss, dass ein sicherer Betrieb, also Gefahren für Personen und zum Teil auch Sachwerte vermieden werden und dass Instandhaltungs- und Reinigungsarbeiten (auch unter Beachtung der Ergonomie) möglich sein müssen.

Analysiert man nun die Inhalte der Gebrauchsanleitungen, so ist festzustellen, dass eine Brandgefahr aus unterschiedlichen Gründen genannt und durch Einhaltung der in der Gebrauchsanleitung genannten Maßnahmen reduziert wird.

Unter anderem wird die regelmäßige Kontrolle (mind. 1mal pro Schicht, also nach ca. 8 h, also dreimal pro Trocknungstag) der Kaskaden vorausgesetzt.

Es muss sich die Frage gestellt werden, ob Anlagen, die ohne Gitterroststege über die gesamte Höhe der Trocknungssäule in den Zu- und Ablufthauben ausgestattet werden, wie es auf den *Bildern 4.2 bis 4.4* ersichtlich ist, die rechtlichen Anforderungen erfüllen (sollen). Unter Berücksichtigung der herrschenden Temperaturen während der Trocknung in den Zu- und Abluftssäulen des Trockners muss vor Betreten von Bedienungspersonal die Anlage zusätzlich zuerst abkühlen.



Bild 4.2: „Arbeitsbühnen“ im Trocknerabluftschacht



Bild 4.3: Zutrittsöffnung in Zuluftschacht (ca. 40 cm x 70 cm)



Bild 4.4: Fehlende Aufstiegshilfen im Zuluftschacht

4.2 Rechtsvorschriften des Betreibers

Im Lebenszyklus einer Trocknungsanlage steht vor dem Betrieb die befugte Errichtung der Anlage.

Hierzu ist die bauordnungsrechtliche Genehmigung einzuholen.

In Deutschland gilt in jedem Bundesland eine eigene Bauordnung (Landesbauordnung). Die Musterbauordnung (MBO) [MBO,2019] der Arbeitsgemeinschaft Bau (ARGEBAU) liegt den meisten Landesbauordnungen zugrunde. Diese Landesbauordnungen unterscheiden sich inhaltlich nur in leichten Nuancen.

Musterbauordnung (MBO) [MBO,2019]:

Folgende Inhalte sind auch hinsichtlich der Errichtung und des Betriebes einer Trocknungsanlage zu berücksichtigen.

§ 2 Abs. 1 definiert begrifflich, dass bauliche Anlagen mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen sind.

Gem. § 2 Abs. 4.7 sind Sonderbauten Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung, bei denen durch Umgang oder Lagerung von Stoffen eine Explosions- oder erhöhte Brandgefahr verbunden ist.

Gem. § 14 sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Rechtsfolgen der baulichen Anforderungen:

Allein aus dem zitierten §14 MBO lässt sich das Erfordernis von Einrichtungen zur Branderkennung und –bekämpfung ableiten. Ferner ist bauordnungsrechtlich die Trocknungsanlage so aufzustellen, dass eine Brandausbreitung (bei Aufstellung innerhalb eines Gebäudes z. B. durch bauliche Abtrennung mit entsprechender Feuerwiderstandsdauer oder bei Aufstellung im Freien durch ausreichenden Abstand zur Verhinderung einer Brandübertragung auf angrenzende Gebäude z. B. auf Grund von Wärmestrahlung) vermieden wird.

Im weiteren Lebenszyklus einer Trocknungsanlage erfolgt nach der Aufstellung der Betrieb der Anlage. Hier sind insbesondere Aspekte des Schutzes von Arbeitnehmern im Fokus.

Arbeitsschutzgesetz:

Das Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) [ARBSG,2015] dient gem. § 1 (1) dazu, Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu sichern und zu verbessern.

Weiter wird ausgeführt:

§ 3 (1) Der Arbeitgeber ist verpflichtet, die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Umstände zu treffen, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit beeinflussen. Er hat die Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Dabei hat er eine Verbesserung von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten anzustreben. [...]

§ 4 Der Arbeitgeber hat bei Maßnahmen des Arbeitsschutzes von folgenden allgemeinen Grundsätzen auszugehen:

1. Die Arbeit ist so zu gestalten, dass eine Gefährdung für das Leben sowie die physische und die psychische Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst geringgehalten wird;
2. Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;
3. bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen;
4. Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen;
5. individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen;
7. den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen;

§ 5 (1) Der Arbeitgeber hat durch eine Beurteilung der für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundenen Gefährdung zu ermitteln, welche Maßnahmen des Arbeitsschutzes erforderlich sind.

(3) Eine Gefährdung kann sich insbesondere ergeben durch

1. die Gestaltung und die Einrichtung der Arbeitsstätte und des Arbeitsplatzes,
2. physikalische, chemische und biologische Einwirkungen,
3. die Gestaltung, die Auswahl und den Einsatz von Arbeitsmitteln, insbesondere von Arbeitsstoffen, Maschinen, Geräten und Anlagen sowie den Umgang damit,

4. die Gestaltung von Arbeits- und Fertigungsverfahren, Arbeitsabläufen und Arbeitszeit und deren Zusammenwirken,
5. unzureichende Qualifikation und Unterweisung der Beschäftigten,
6. psychische Belastungen bei der Arbeit.

§ 6 (1) Der Arbeitgeber muss über die je nach Art der Tätigkeiten und der Zahl der Beschäftigten erforderlichen Unterlagen verfügen, aus denen das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung, die von ihm festgelegten Maßnahmen des Arbeitsschutzes und das Ergebnis ihrer Überprüfung ersichtlich sind. Bei gleichartiger Gefährdungssituation ist es ausreichend, wenn die Unterlagen zusammengefasste Angaben enthalten.

Technische Regel für Gefahrstoffe „Brandschutzmaßnahmen“

Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe haben ihre Ermächtigungsgrundlage in der GefStoffV [GEFSTV,2017] und konkretisieren im Rahmen ihres Anwendungsbereichs Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind.

1 (2) Die Technische Regel für Gefahrstoffe TRGS 800 Brandschutzmaßnahmen [TRGS800,2010] berücksichtigt auch die Ermittlung und Bewertung, ob die Stoffe, Zubereitungen oder Erzeugnisse bei Tätigkeiten, auch unter Berücksichtigung der stofflichen Eigenschaften, der Arbeitsmittel, der Verfahren und der Arbeitsumgebung sowie ihrer möglichen Wechselwirkungen, zu einer Brandgefährdung führen können.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung hat der Arbeitgeber die Brandgefährdung zu ermitteln. Nach der TRGS 800 umfasst dies:

- Informationsermittlung mit Ermittlung relevanter Kenngrößen/Eigenschaften, Ermittlung von Zündquellen, Berücksichtigung genehmigungsrechtlicher und sonstiger Anforderungen
- Beurteilung der Brandgefährdung
- Festlegung von Maßnahmen, Allgemein / Grundpflichten, Brandschutzmaßnahmen
- Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen
- Dokumentation

Wie die Gefährdungsbeurteilung durchzuführen ist, wird in der TRGS 800 nicht explizit genannt. Hier wird auf die TRGS 400 verwiesen, die ihrerseits eine systematische Ermittlung und Bewertung relevanter Gefährdungen für Beschäftigte fordert [TRGS400,2017].

Diskussion der betreiberseitigen Einhaltung rechtlicher Anforderungen:

Bauordnungs- und arbeitsschutzrechtliche Anforderungen zielen primär auf den Personenschutz ab, wobei Sachwertschutzaspekte am Rande zu beachten sind.

Bereits bei der Errichtung der Anlage müssten zur Erreichung der genannten Schutzziele Anforderungen an den Aufstellort der Trocknungsanlage eingehalten werden.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung müsste der Betreiber zu dem Ergebnis kommen, dass additive Schutzmaßnahmen zur Verringerung der Brandgefahr erforderlich sind – insbesondere zur Einhaltung der Anforderungen aus der Gebrauchsanleitung des Herstellers. Fraglich ist, ob dem Betreiber die arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen nicht bewusst oder deren praktische Umsetzungsmöglichkeiten nicht bekannt sind.

4.3 Deutsche Industrienorm (DIN) 3379

Vom Deutschen Institut für Normung werden durch Arbeitsausschüsse Standards zur Vereinheitlichung festgelegt und haben Empfehlungscharakter, sofern die Einhaltung nicht im Zuge von öffentlich- oder privatrechtlichen Vorgaben gefordert ist.

Die Anwendung einer Deutschen Industrienorm befreit nicht von gesetzlichen und haftungsrechtlichen Vorgaben und wird zumeist als anerkannte Regel der Technik herangezogen. Die DIN 3379 wurde zwischenzeitlich ersatzlos zurückgezogen.

Die Deutsche Industrienorm DIN 3379 Körnertrockner [DIN3379,1975] beinhaltet:

- 1 Diese Norm gilt für Begriffe, Anforderungen und Prüfung von gasbeheizten Körnertrocknern [...]

Die Trockenluft oder Warmluft kann unmittelbar durch Beimischung der Abgase erwärmt werden.

- 2 Begriffe

2.1 Trockenluft

Trockenluft ist Luft, die eine Temperatur von 50 °C nicht überschreitet.

2.2 Warmluft

Warmluft ist Luft, die eine Temperatur von 50 °C überschreitet.

3 Anforderungen

- Luftkanäle müssen ohne Schwierigkeiten gereinigt werden können.
- Jeder Brenner muss mit einer Flammüberwachung [...] ausgestattet sein.
- Körnertrockner müssen mit einem Zweipunkt-Temperaturregler und einem Temperaturbegrenzer ausgerüstet sein, damit ein Überschreiten der zulässigen Höchsttemperatur für Trockenluft von 50 °C und für Warmluft von 180 °C vermieden wird.
- Körnertrockner sind, sofern kein Wärmeüberträger zwischengeschaltet ist, so zu gestalten, dass Funkenflug oder Durchschlagen der Flammen in den Trocknungsbehälter verhindert wird.
- In jedem Körnertrockner ist eine zusätzliche Sicherheitseinrichtung (z. B. Strommangelsicherung, Luftmangelsicherung, Windfahnenrelais, Fliehkraftabscheider) einzubauen, die bei Unterbrechung der Luftbeförderung oder der mechanischen Abgasabsaugung die Gaszufuhr zum Brenner selbsttätig unterbindet und den Verbrennungsraum gegen Überhitze sichert. Diese zusätzliche Sicherheitseinrichtung darf nur von Hand wieder eingeschaltet werden können, soweit nicht durch eine automatische Zündsicherung das Wiederanzünden des Gases am Brenner sichergestellt wird. Es wird empfohlen, die Störabschaltung automatisch anzuzeigen.

4.4 Diskussion der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen und Normungsstand

Gleicht man nun die für Trocknungsanlagen geltenden gesetzlichen „Soll-Anforderungen“ mit dem „IST-Zustand“ (Einhaltung der Anforderungen durch Hersteller und Betreiber) mit Schadenfällen (*Anhang A*) ab, so ist festzustellen, dass die Anlagen nicht (durchgängig) die erforderlichen Schutzeinrichtungen aufweisen, damit der Betreiber die Anlage rechtskonform betreiben kann.

Auf Grundlage der zitierten gesetzlichen Anforderungen ist somit nicht nachvollziehbar, warum teilweise heute noch herstellerseitig Neuanlagen ausgeliefert werden, die beispielsweise nicht mittels Steigleitern und Gitterrosten in den Zu- und Ablufthauben ausgestattet sind, obwohl in der Gebrauchsanleitung eine regelmäßige Kontrolle (z. B. einmal pro Schicht) zum bestimmungsgemäßen Betrieb dem Betreiber vorgegeben wird.

Unabhängig von dem Ereignis „Brand“ ist dies für den Unfall- und Gesundheitsschutz der zuständigen Mitarbeiter unverzichtbar.

Ferner zeigen die analysierten Schadenfälle, dass auch Betreiber im Rahmen ihrer Gefährdungsbeurteilung nicht das Erfordernis zusätzlicher Schutzmaßnahmen erkannt haben – zum Teil selbst nach Eintritt eines Brandschadens.

Betrachtet man die herstellereitigen Wartungs- und Reinigungsvorgaben, so ist fraglich, wie diese dann durch den Betreiber gewissenhaft durchgeführt werden sollen?

Gemäß Gebrauchsanleitung ist während der Trocknungskampagne pro Schicht der gesamte Trockner zu kontrollieren und ggf. zu reinigen.

Hierzu zählt, dass ein Mitarbeiter prüft, ob im Bereich des Austrages das Produkt gleichmäßig ausgetragen wird. Unabhängig von dem Ergebnis muss der Mitarbeiter im Bereich der einzelnen Kaskaden prüfen, ob sich Brücken im Produkt gebildet haben. Hierfür muss der Bediener die Trocknung unterbrechen und die Anlage abkühlen lassen. Danach kann er auf den (sofern vorhanden) Kontrollbühnen Einblick in die einzelnen Kaskaden nehmen. Um hier Verklumpungen, bzw. stockenden Produktfluss sicher erkennen zu können, muss gleichzeitig die Anlage für die Dauer der Kontrolle im Umlaufbetrieb gefahren werden.

Dies birgt jedoch den Nachteil, dass einerseits Trockengut in der Anlage bewegt wird, ohne dieses zu trocknen und andererseits bereits (an-)getrocknete Ware in den Vorratsbehälter kommt und bei erneuter Trocknung eine Übertrocknung nicht ausgeschlossen werden kann. Inwiefern dies eine zusätzliche Brandgefahr darstellt, soll an dieser Stelle nicht hinterfragt werden.

Betrachtet man nun die Inhalte der geltenden Norm für Trocknungsanlagen, so ist festzustellen, dass der eigentlich zu erwartende erhöhte Detaillierungsgrad an Schutzeinrichtungen nicht dahingehend gegeben ist, dass behördliche Vorschriften umfänglich erfüllt werden (z. B. Maßnahmen zur Brandbekämpfung werden nicht genannt). Als anerkannte Regel der Technik kann die Norm nicht erachtet werden, da die definitionsgemäße Beschreibung eines Standards, der sich in Fachkreisen durchgesetzt hat, nicht gegeben ist. So werden die Anforderungen der Norm an eine einfache Reinigung der Luftkanäle und der Verhinderung des Flammendurchschlages bei direkter Beheizung bis heute nicht durchgängig umgesetzt.

Daraus resultierend stellt sich die Frage, ob andere, ggf. internationale Vorschriften oder Richtlinien von Interessenverbänden einen höheren Detaillierungsgrad zum Schutz von Trocknungsanlagen aufweisen.

4.5 Ausblick auf Vorschriften anderer Nationen: NFPA 61

Internationale Gesetze / Vorschriften oder Leitfäden, die den Schutz von Getreidetrocknungsanlagen zum Inhalt haben, wurden, abgesehen von der folgenden Literatur, im Zuge der Literaturrecherche nicht gefunden oder waren nicht zugänglich.

Im Zuge mehrerer Schulungen bei der National Fire Protection Association (NFPA) in Braintree und Oak Brook sowie einer anschließenden USA-Reise wurde eruiert, welche Vorschriften für Trocknungsanlagen in den USA gelten, bzw. den Brand- und Explosionsschutz an Getreidetrocknungsanlagen zum Inhalt haben. Folgendes ist explizit für Getreidetrocknungsanlagen in der NFPA® 61 Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities [NFPA61,2020] beschrieben (selektiver Auszug, sinngemäß übersetzt). Die im Anhang (Annex) beschriebenen Konkretisierungen wurden den entsprechenden Absätzen direkt zugeordnet:



Bild 4.5: Silos mit Trocknungsanlage

Rechtscharakter:

Diese aktuelle Ausführung der NFPA 61 ist seit dem 24. November 2019 als “American National Standard” anerkannt.

Geltungsbereich:

Diese Norm beinhaltet die für die Sicherheit von Personen und Sachwerten erforderlichen Mindestanforderungen vor Brand- und Explosionsgefahren für Agrar- und lebensmittelverarbeitende Betriebe sowie für verwandte Feststoffe. Sie gilt für alle Einrichtungen, die trockene Agrarschüttgüter, deren Nebenprodukte oder Stäube annehmen, trocknen oder transportieren.

Verfahrensbeschreibung:

Typischerweise ist ein Getreidetrockner eine in sich geschlossene Einheit, die große Mengen an Agrarrohstoffen entweder kontinuierlich oder im Batch-Verfahren verarbeitet.

Schadenursachen:

Selbstentzündung wird als eine der Hauptursachen von Trocknerbränden und Explosionen aufgeführt. Als Voraussetzungen für dieses Phänomen sind heiße Oberflächen oder ein dem Heißluftstrom über eine gewisse Zeit ausgesetztes Produkt.

Die Ware, die entweder direkt nach der Ernte oder in einem Zwischenbehälter aufbewahrt wird, enthält Fremdkörper, die zum Teil aus der Ernte resultieren können. Diese können dem Trocknungsprozess zugeführt werden und dort zum Ausbruch eines Feuers im Trockner beitragen.

Allgemeine Anforderungen:

Im Kapitel 9 werden allgemeine Anforderungen an Trockner, die die Aufgabe haben, Materialien in ihren Feuchtigkeitsgehalt durch erhitzte Luft zu reduzieren, aufgeführt. Dabei müssen Trockner und Nebeneinrichtungen so gestaltet, bedient, gereinigt und instandgehalten werden können, dass brennbare Anhaftungen minimiert und die Innenwände frei von Körnern oder sonstigem Produkt während der Trocknung sind.

Aufstellort:

Der Trockner befindet sich normalerweise auf dem Werksgelände angrenzend zum Elevator, dem Lagergebäude oder Tank.

Besondere Vorsicht ist erforderlich, wenn angrenzende Gebäude oder Einrichtungen brennbare Konstruktionen aufweisen oder Wände Lüftungsöffnungen, Fenster, Ausläufe oder Förderöffnungen aufweisen.

Trockner müssen so aufgestellt sein, dass eine Feuergefährdung angrenzender Gebäude und Einrichtungen, einschließlich anderer Trockner, und eine Zündgefahr zu Betriebs- und Lagerbereichen verringert und der Zugang für Löscharbeiten ermöglicht wird. Trockner dürfen nicht innerhalb von Getreideverarbeitungs- oder Getreidelagergebäuden aufgestellt sein.

Bauliche Ausführung:

Trockner müssen aus nicht brennbaren Materialien gefertigt sein.

Ferner müssen Trockner und zugehörige Einrichtungen so beschaffen sein, dass die Brandgefahr anlagenbedingt in der Betriebseinrichtung bei erhöhten Temperaturen minimiert wird.

Daher sind die Innenflächen von Trocknern so auszuführen, dass die Ansammlung von Material verringert und die Reinigung erleichtert wird.

Trockner, die einen Teil der Abluft zurückführen, müssen eine Einrichtung zur Minimierung der mitgeführten Partikel aufweisen, damit diese nicht wieder in die Trocknungssäule zurückgeführt werden.

Außentüren oder -öffnungen müssen Zugang zu allen Teilen des Trockners erlauben, ebenso zu Verbindungsrohren, Einlass- oder Auslassschächten und Fördereinrichtungen, um Kontrollen, Reinigung und Instandhaltung sowie den effektiven Einsatz von Feuerlöschern oder Strahlrohren zu ermöglichen.

Für den Brandfall müssen Trockner mit Einrichtungen zur Entleerung (Notentleerung) aus dem Trockner in einen sicheren Bereich, der in seiner Art und Weise keine Brandgefahr für angrenzende Gebäude, Einrichtungen und Anlagen darstellt, ausgestattet sein.

Organisatorisch ist festzulegen, wie sicher mit brennendem Material umgegangen und die Brandbekämpfung von brennendem Material erfolgen kann, wenn es aus dem Trockner geleert wurde.

Luftherwärmungssystem:

Das Luftherwärmungssystem muss einschließlich der Heizeinrichtung, den zugehörigen Rohren oder Verkabelungen, dem Umluftgebläse und zugehörigem Lüftungskanal für die erhitzte Luft im Trockner ausgelegt sein.

Der Trockner kann direkt (d.h., dass die Verbrennungsprodukte in die Trocknersäule gelangen) oder indirekt befeuert (d.h., dass die Verbrennungsprodukte nicht in die Trocknersäule gelangen) werden.

Der Luftherhitzer und seine Komponenten müssen für die beabsichtigte Nutzung geeignet, müssen für die Brennstoffarten ausgelegt und müssen für den Temperaturbereich, in dem sie arbeiten, geeignet sein.

Typischerweise wird die Brenndauer / -intensität der Wärmeerzeuger von Trocknungsanlagen durch eine Temperaturmesseinrichtung im Heißluftstrom vor dem Kontakt mit dem Trocknungsprodukt gesteuert. Der eingestellte Sollwert wird gewählt, um den gewünschten Feuchtigkeitsgehalt, bzw. Feuchtigkeitsverlust zu erreichen.

Die Steuereinrichtung hält die Lufttemperatur zwischen der vorgegebenen Höchst- und Tiefsttemperatur. Wenn die Temperatur steigt, wird die Brenndauer / -intensität reduziert, bei sinkender Temperatur die Brenndauer / -intensität erhöht.

Direkt befeuerte Luftherhitzer müssen Einrichtungen aufweisen, die den Eintrag der in der Luft mitgetragenen brennbaren Materialien in die Trocknungssäule minimieren.

Brennersysteme, Steuereinrichtungen ebenso wie die Mischeinrichtungen für Trockner, die mit Heizöl, Erdgas, Mischgas, Industriegas oder LPG befeuert werden, müssen mit der „NFPA 86, Standard for Ovens and Furnaces“ übereinstimmen.

Schutzeinrichtungen:

Schutzeinrichtungen müssen so gestaltet, konstruiert und installiert sein, dass vorgeschriebene Sicherheitszustände zur Bedienung des Luftherhitzers, des Trockners und der Lüftungseinrichtungen wartungsfreundlich sind.

Der Trockner und die Zusatzausrüstung sind mit einer Temperaturbegrenzung auszustatten, die die beiden folgenden Bereiche überwacht:

- (1) Luftstrom zwischen Brenner und Trocknungssäule
- (2) Luftstrom am Auslass der Kühl- und Heizsektionen

Die von der Zusatzausrüstung erkannten Temperaturüberschreitungen müssen eine automatische Abschaltung durchführen, wobei die automatische Abschaltung auf folgende Bereiche wirken muss:

- (1) Abschaltung des Brennstoffes oder der Wärmequelle des Brenners
- (2) Stoppen des Austrages aus dem Trockner
- (3) Stoppen des Luftstromes von den Lüftern zum Trockner
- (4) Alarm an eine ständig besetzte Stelle oder an den Bediener oder an beide, um Hilfskräfte zu alarmieren

Ein Not-Aus muss vorgesehen werden, der die automatische Abschaltung ermöglicht.

Alle Sicherheitskontrollen dürfen sich nicht (selbstständig) zurücksetzen und müssen eine manuelle Rückstellung erfahren, bevor der Trockner wieder in Betrieb genommen werden kann.

Trocknerbedienung:

Bedienungseinrichtungen müssen so gestaltet, konstruiert und installiert sein, dass vorgeschriebene Sicherheitszustände zur Bedienung des Luftherhitzers, des Trockners und der Lüftungseinrichtungen wartungsfreundlich sind.

Die Trocknungssäule muss Bedienungseinrichtungen haben, die die Temperatur in vorgegebenen Grenzen hält.

Fremdmaterial, welches normalerweise nicht Teil des Getreides ist, wenn es vom Landwirt angeliefert wird, und einen Beitrag zu einem Brand leisten könnte, muss entfernt werden, bevor es in den Trockner gerät.

Branderkennung und Brandschutz:

Ein Branderkennungssystem muss für den Trockner vorgesehen werden, wenn die Trocknung während der Trocknungssaison intermittierend erfolgt und wenn der Trockner gefüllt oder teilweise mit Getreide gefüllt abgeschaltet wird.

Durch die Branderkennungseinrichtung muss ein Alarm an einer ständig besetzten Stelle ertönen.

Das Branderkennungssystem muss deaktiviert werden können, wenn der Trockner gründlich entleert und gereinigt oder wenn der Trockner entleert, gereinigt und gesichert am Ende der Trocknungssaison abgestellt wird.

Wenn die Gebrauchsanleitung es verbietet, dass Getreide im Trockner während intermittierender unbeaufsichtigter Unterbrechungen verbleibt, dann ist kein Branderkennungssystem erforderlich.

Es müssen Einrichtungen zur Brandbekämpfung in der Trocknungssäule vorgesehen werden.

In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten sollte eine oder eine Kombination der folgenden Möglichkeiten vorgesehen werden:

- (1) Ortsfeste Sprühwasser- oder automatische Sprinkleranlage mit ausreichender Wasserversorgung (siehe „NFPA 13, Standard for the Installation of Sprinkler System“ und „NFPA 15, Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection“)

- (2) Schlauchleitung, mit einem Durchmesser von 38 mm in ausreichender Länge, um alle Zugangsöffnungen des Trockners zu erreichen, angeschlossen an eine Wasserversorgung mit mind. 51 mm Durchmesser (siehe „NFPA 14, Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems“)
- (3) Schlauchleitung mit geringerem Durchmesser in ausreichender Länge, um alle Zugangsöffnungen des Trockners zu erreichen, angeschlossen an die Hauswasserversorgung
- (4) trockene ortsfeste Sprühwasser- oder automatische Sprinklereinrichtung
- (5) ein adäquates Dampf löschsystem
- (6) Brandklasse A Feuerlöscher

Prüfungen und Funktionstests des Löschsystems:

Das gesamte Löschsysteem sollte mind. jährlich instandgehalten werden. Häufigere Hauptuntersuchungen werden empfohlen. Wartungsverträge mit dem Hersteller oder Installationsfirma werden empfohlen.

Alle Branderkennungseinrichtungen müssen entsprechend „NFPA 72, National Fire Alarm and Signaling Code“ getestet und instandgehalten werden.

Alle Löscheinrichtungen müssen entsprechend „NFPA 25, Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems“ getestet und instandgehalten werden.

Übertragbarkeit der Inhalte auf hiesige Trocknungsanlagen

Entgegen der Deutschen Industrienorm gibt die NFPA 61 detailliertere Anforderungen an Aufstellort und Erfordernis von Branderkennung- und Brandbekämpfungseinrichtungen vor. Auch wenn innerhalb des Regelwerkes auf weitere, bestehende NFPA-Regelwerke verwiesen wird, so ist auch hierin nicht eindeutig festgelegt, wie diese Schutzeinrichtungen auszuführen sind.

Unverständlich ist, dass auf das Vorhandensein von Branderkennungselementen verzichtet werden kann, wenn kein Trocknungsgut während Stillstandszeiten im Trockner verbleibt.

Die Erkenntnisse aus untersuchten Brandereignissen in *Anhang A* dieser Abhandlung zeigen auf, dass Brände nicht während der Stillstandszeiten auftraten, sondern ausschließlich während der Trocknung. Demnach sollte als Kriterium für das Erfordernis von

Branderkennungselementen nicht die Befüllung während der Stillstandszeit herangezogen werden.

Grundsätzlich sind jedoch die dort aufgeführten Schutzanforderungen auch auf hiesige Trocknungsanlagen übertragbar.

5 Ansatz zur Beurteilung interagierender Entzündungsfaktoren

Für die präventive Schadenverhütung und zur Ableitung von Brandschutzmaßnahmen ist in der retrospektiven Betrachtung von Schadenfällen die Ermittlung der Schadenursache notwendig.

Klassisch kommen bei der Brandursachenermittlung direkte und indirekte Ermittlungsmethoden zum Einsatz. Als Methode der direkten Beweisführung gilt der „Direkte Beweis“, als Methode der indirekten Beweisführung das „Eliminationsverfahren“ [STEINB,2012].

Das Eliminationsverfahren (oder auch Ausschlussverfahren) nach Graßberger folgt dem Grundsatz: „Jede Wirkung (Spur) hat eine Ursache – Jede Ursache hinterlässt eine Wirkung (Spur)“ [BACH,2012].

Im Idealfall führt das Eliminationsverfahren zur Feststellung einer einzigen Ursache und somit zu einer eindeutigen Klärung der Ursache eines Brandes, auch wenn der Spurenbeweis nicht direkt zu erbringen ist. Durch das Eliminationsverfahren kann trotz Vorliegens eines chaotischen Systems die Zahl der Brandursachen zumindest eingegrenzt werden [STEINB,2012].

Übertragung der Systematik Brandursachenermittlung auf Gefährdungsmodelle:

Dieser Grundgedanke des Eliminationsverfahrens folgt dem „Ursache – Wirkung – Folge“ - Prinzip nach Compes.

Analog dem Gefährdungsmodell liegt einem Schaden ein geradliniges „Ursache – Wirkung – Folge“ - Prinzip zugrunde, in dessen Beachtung der Koinzidenz retrospektiv die Gefahr/Ursache ermittelt werden kann [COMPES,1974].

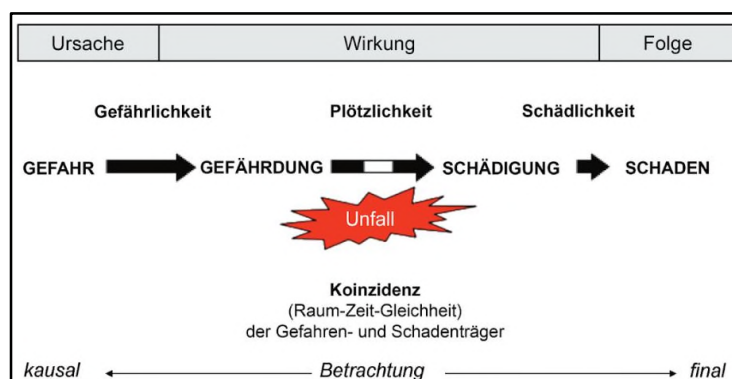


Bild 5.1: Gefährdungsmodell nach dem Kausalnexus (Gefährdung) und Finalnexus (Schädigung) [FESTAG,2014]

Mit zunehmender Kompliziertheit oder gar Komplexität ist diese geradlinige „Ursache-Wirkung-Folge“ in der Brandursachenermittlung jedoch nicht mehr gegeben.

Dabei muss die Ungewissheit der möglichen und wahrscheinlichen Schaden- / Unfallursachen der retrospektiven Betrachtung beachtet werden [FESTAG,2014].

Der Moment des Wirksamwerdens (in diesem Falle = entzünden) ist als auslösendes Ereignis zu verstehen, nachdem sich zuvor die erforderliche örtliche und zeitliche Koinzidenz eingestellt hat [BARTH,2022b].

In der retrospektiven Betrachtung stellen mögliche Ursachen die Grenze wahrscheinlicher Ursachen zum auslösenden Ereignis dar (*Bild 5.2*).

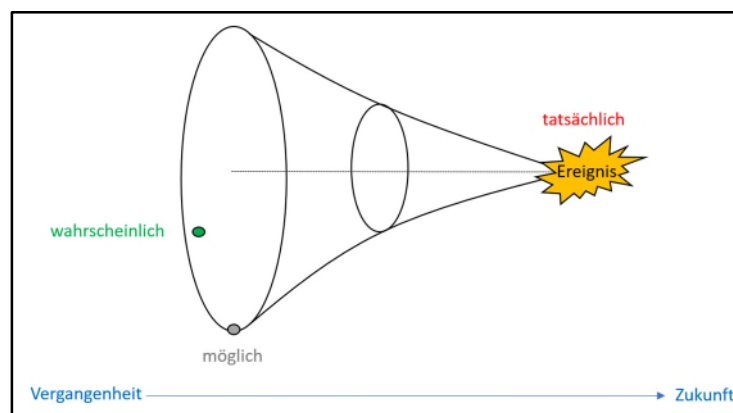


Bild 5.2: Ungewissheit retrospektiver Analysen in Anlehnung an [FESTAG,2014]

Die Komplexität emergiert dabei sukzessive aus einer zunächst einfachen über eine komplizierte zu einer komplexen Systemarchitektur. Die tragenden Pfeiler der Systemarchitektur lassen sich anhand eines Ursache-Wirkungsdiagramms (*Bild 5.3*) beispielsweise in Form eines Ishikawa-Diagramms bzw. Fischgräten-Diagramms mit bestimmten Einflussgrößen (z. B. Material, Maschine, Methode, Mensch etc.) darstellen.

Hierbei ist zu beachten, dass auch der maximale Vernetzungsgrad lediglich mit Hilfe der Berechnung von bedingten Wahrscheinlichkeiten abgebildet werden kann. Eine unterschiedliche Wertung der einzelnen Faktoren wird in diesem Modell noch nicht vorgenommen. Allerdings müsste die ganze Skala vom minimalen bis zum maximalen Vernetzungsgrad betrachtet werden. Dies entspricht oft dem realen Modell, erfordert aber einen großen Aufwand und ist oft nichts anderes als ein „experiment judgement“ [FESTAG,2014].

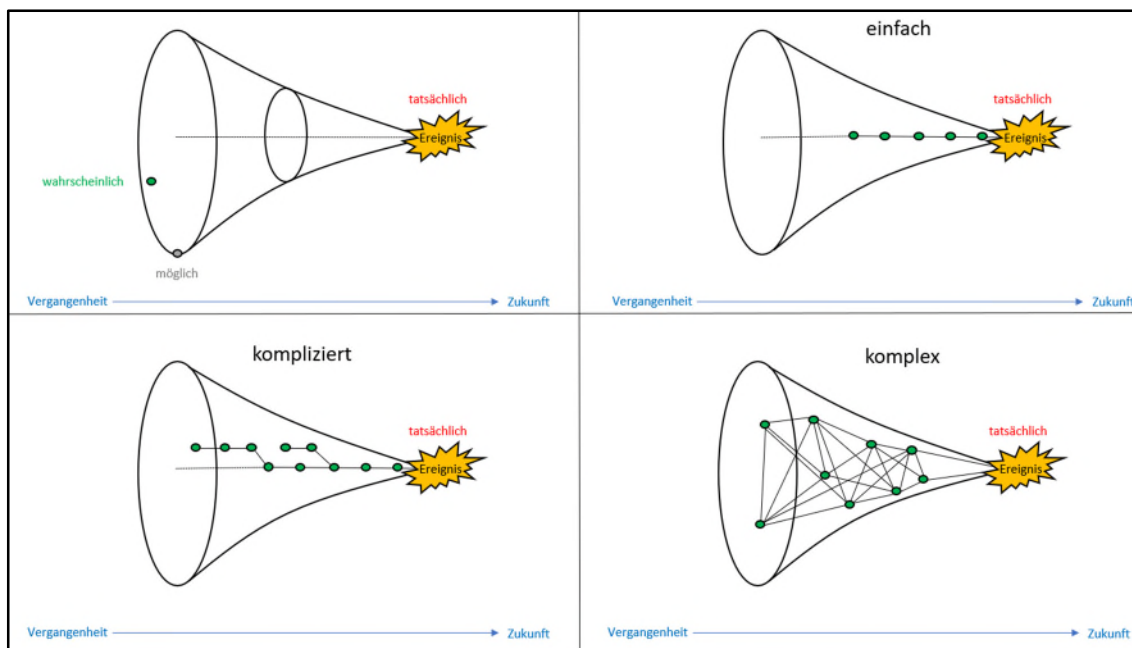


Bild 5.3: einfach – kompliziert – komplex [FESTAG,2014]

Nach dem Erklärungsmodell für das Entstehen von Arbeitsunfällen [BAUA,2006] ist der Einfluss von begünstigenden Bedingungen zwischen der Gefährdung und dem Wirksamwerden der Gefährdung und dem daraus resultierenden Schaden zu beachten.

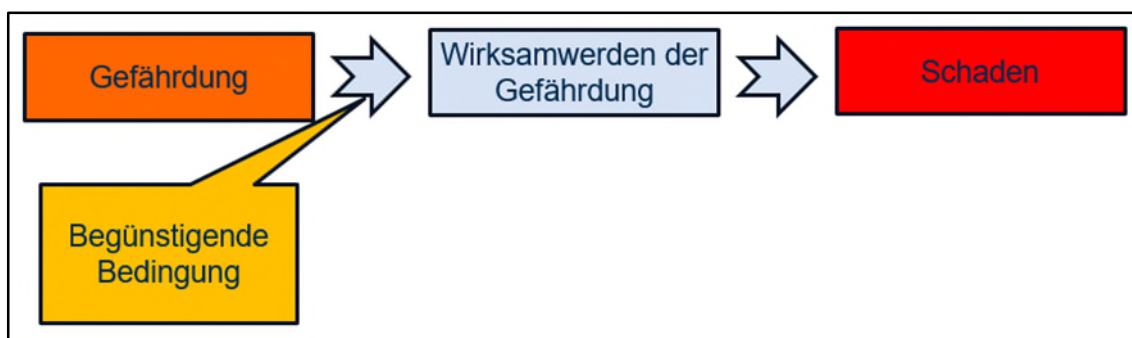


Bild 5.4: Modell BAUA zu begünstigender Bedingung [BARTH,2022c]

Sofern auf die Gefährdung nun aber mehrere begünstigende Bedingungen einwirken, so erweitert sich die Betrachtung und es stellt sich die Frage, welche der begünstigenden Bedingung schlussendlich das Wirksamwerden ausgelöst hat.

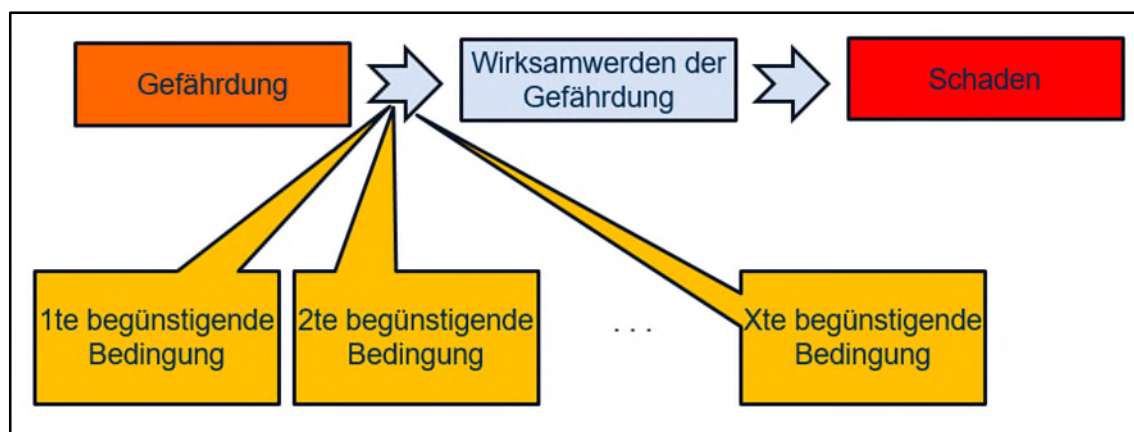


Bild 5.5: Einfluss mehrerer begünstigender Bedingungen [BARTH,2022c]

Überträgt man nun den Gedanken der begünstigenden Bedingungen auf die Metapher des randvollen Wasserglases zum Unfallverhütungserfolg, so ist davon auszugehen, dass jede einzelne begünstigende Bedingung (=Tropfen) das Glas zum Überlaufen bringen kann [GOTTS,1973].

Um das randvolle Wasserglas nun nicht zum Überlaufen zu bringen, kann man entweder:

- eine Reduzierung der Gefährdung (= Herabsenken des Wasserspiegels im Glas),
- eine Eliminierung der begünstigenden Bedingungen (= Verhinderung des Eintrages weiterer Tropfen) oder
- eine Kombination aus Beidem anwenden (= geringfügiges Herabsenken des Wasserspiegels, Toleranz einiger Wassertropfen).

Ansatz der Beurteilungsmethode interagierender Brandursachen und begünstigender Bedingungen

Ziel der methodischen Beurteilung ist die Überführung komplexer Beziehungen interagierender Brandursachen oder begünstigender Bedingungen zueinander in komplizierte, bzw. einfache Strukturen. Mittels eines erweiterten Ursache – Wirkung – Folge – Modells lassen sich die begünstigenden Bedingungen zu einer Schadenursache sowie deren Interaktion zueinander systematisch erfassen (Bild 5.6). Eine Beurteilung, inwiefern diese bei einem Zusammentreffen wirksam werden, erfolgt noch nicht.

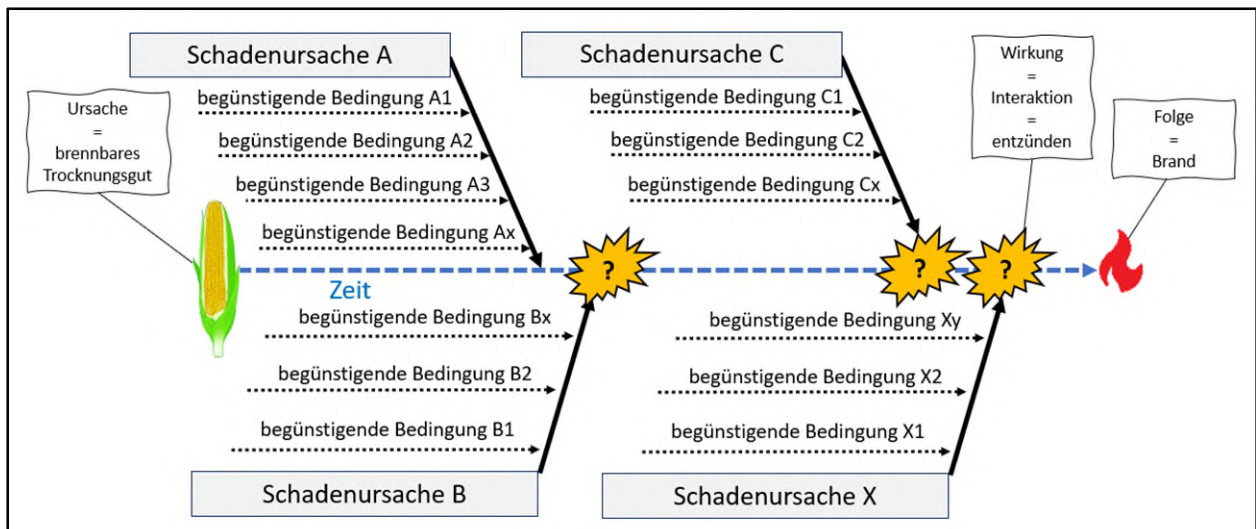


Bild 5.6: Ursache – Wirkung – Folge – Modell (angelehnt an die Darstellung des ISHI-KAWA- bzw. Fischgräten-Diagramm) zur Erfassung möglicher Schadenursachen und deren begünstigenden Bedingungen in Anlehnung an [BARTH,2022b]

Angewendet auf die in **Kapitel 3** validierten Brandursachen an Trocknungsanlagen und deren begünstigenden Bedingungen ergibt sich folgendes Ursache – Wirkung - Folge-Diagramm:

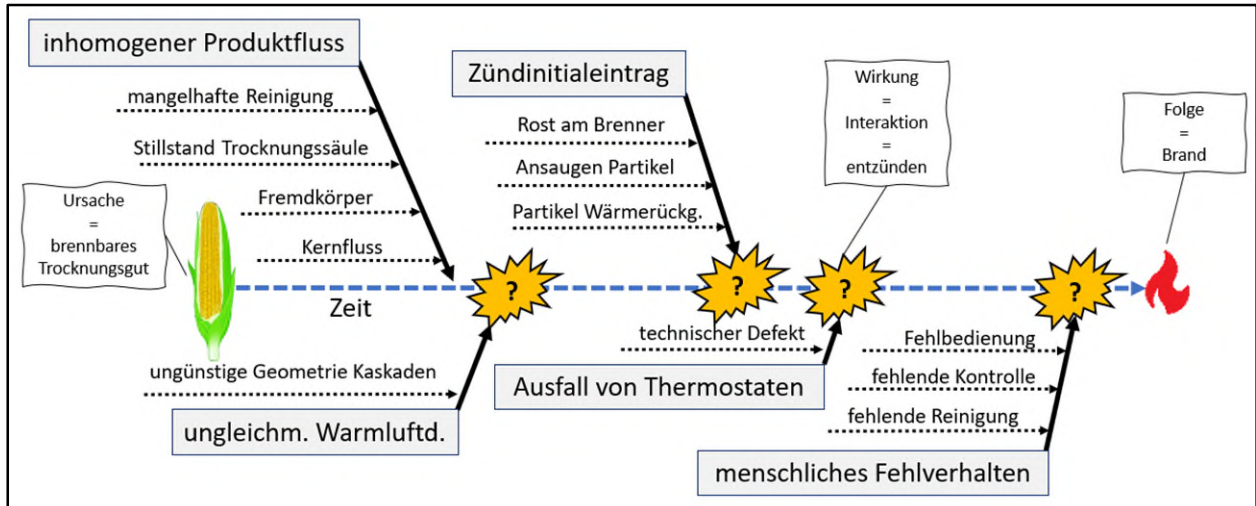


Bild 5.7: Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm angewendet auf Schadenursachen und deren begünstigende Bedingungen an Trocknungsanlagen

Anhand des Entscheidungs-Abfrageschema (Duktus) können Explosionsgefährdungen erkannt und vermieden werden [TRGS720,2020].

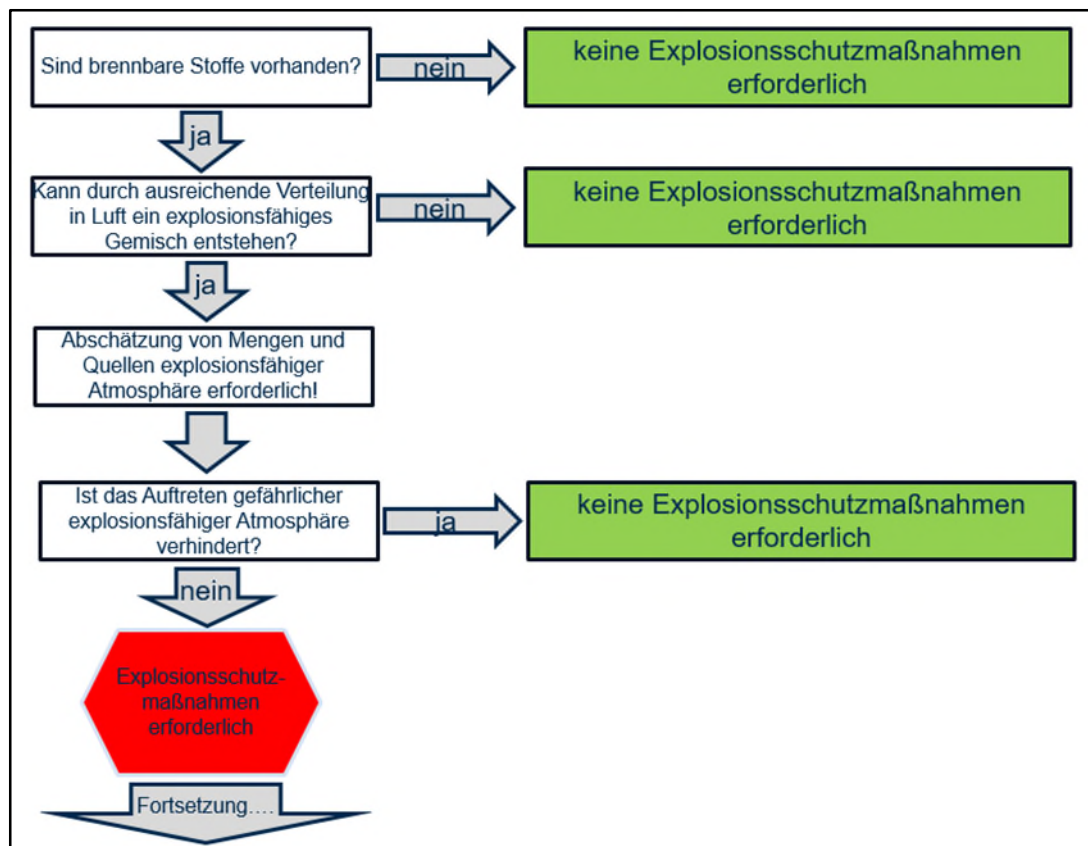


Bild 5.8: Auszug Duktus Explosionsgefährdungen [TRGS720,2020]

Überträgt man das Entscheidungsschema (ja/nein-Abfrage) auf das Interagieren von Brandursachen, bzw. von begünstigenden Bedingungen zum Wirksamwerden als Brandursache, so ließe sich als Expertenrating in einer Matrix das Zusammenwirken auch mit **JA** oder **NEIN** beantworten. Sofern das Wirksamwerden nicht sicher ausgeschlossen werden kann, so ist es im Sinne der Schadenverhütung als wirksam (also **JA**) zu beantworten.

In Form einer Matrix werden die unterschiedlichen Ursachen und begünstigenden Bedingungen in der X- und Y-Achse aufgeführt. Hierbei ist es unerheblich, ob es sich konkret um die Ursache oder eine begünstigende Bedingung handelt. Zur Gegenüberstellung werden diese allgemein als Faktoren bezeichnet.

Beispiel Entscheidungsfrage:

- Kann Faktor A interagierend mit Faktor B als Brandursache in Betracht gezogen werden? Antwort: **NEIN**

- Kann Faktor A interagierend mit Faktor C als Brandursache in Betracht gezogen werden? Antwort: **NEIN**
- Kann Faktor A interagierend mit Faktor D als Brandursache in Betracht gezogen werden? Antwort: **JA**
- Kann Faktor B interagierend mit Faktor C als Brandursache in Betracht gezogen werden? Antwort: **JA**
- usw.

Die Ergebnisse der Entscheidungsfragen werden nach Durchlaufen des Ursache – Wirkung – Folge – Diagramms in der Entscheidungsmatrix farblich dargestellt.

Tabelle 6: Beispiel Interaktion von 4 Faktoren

Faktor	B	C	D
A			
B			
C			
D			

Validierung der Beurteilungsmethode interagierender Brandursachen und begünstigender Bedingungen an Trocknungsanlagen

Anhand dieser Beurteilungsmethode werden die im Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm (*Bild 5.7*) erfassten Brandursachen samt deren begünstigenden Bedingungen iterativ durchlaufen und in einer Matrix auf ihre interagierende Wirksamkeit als potenzielle Brandursache dargestellt.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass einzelne begünstigende Bedingungen, die bereits für sich allein brandursächlich sein können, „herausgefiltert“ werden, da unterstellt werden muss, dass diese bei jedem Zusammenwirken mit begünstigenden Bedingungen brandursächlich sein werden.

Am Beispiel der Schadenursache „inhomogener Produktfluss“ durch die begünstigende Bedingung „mangelhafte Reinigung“ ist das Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm (*Bild 5.9*) iterativ unter Anwendung der Entscheidungsfrage „kann die begünstigende Bedingung X interagierend mit der begünstigenden Bedingung Y als Brandursache in Betracht gezogen werden?“ Sofern ein Wirksamwerden nicht ausgeschlossen werden kann, so sind diese im Diagramm **rot** zu kennzeichnen und in die Matrix zu übertragen.

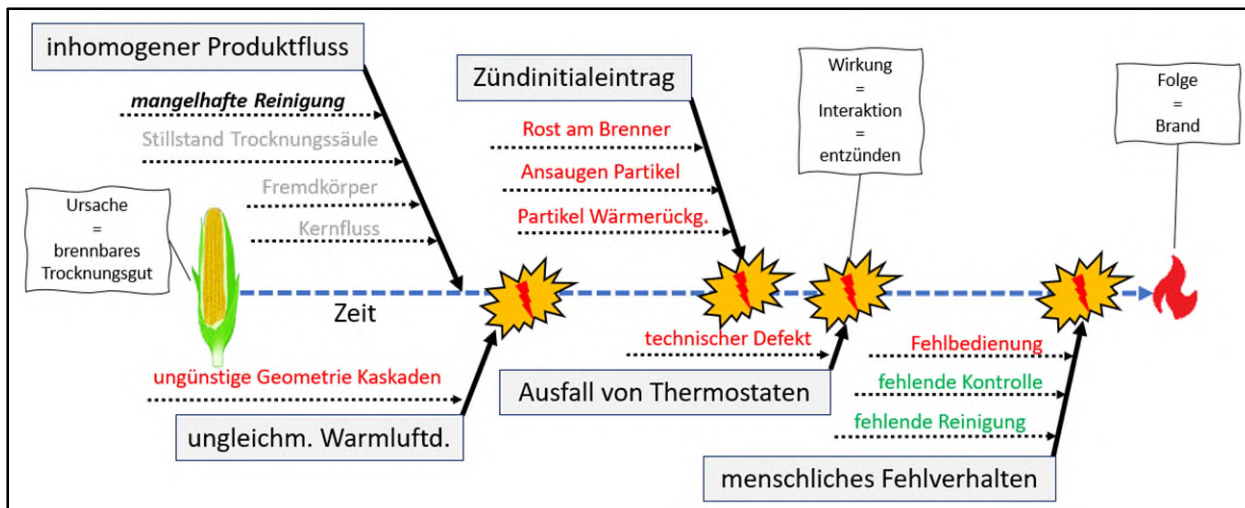


Bild 5.9: Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm zur Veranschaulichung der interagierenden Entzündungsfaktoren am Beispiel des inhomogenen Produktflusses

Dieser Vorgang ist iterativ für alle begünstigenden Bedingungen zu durchlaufen und die Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 7 darzustellen.

Tabelle 7: Anwendung Beurteilungssystematik Trocknungsanlage

Schadenursache	durch begünstigende Bedingung	inhomogener Produktfluss				Zündinitialeintrag			Ausfall v. Thermostaten	menschl. Fehlverhalten		
		mangelhafte Reinigung	Fremdkörper	Kernfluss	Stillstand Trocknersäule	Rost am Brenner	Ansaugen Partikel Umgebung	Partikel Wärmerückgewinnung	technischer Defekt	fehlende Kontrolle	fehlende Reinigung	Fehlbedienung
ungleichmäßige Warmluftdurchströmung	ungünstige Geometrie Kaskaden	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green
inhomogener Produktfluss	mangelhafte Reinigung	Black	Red	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red
	Fremdkörper	Black	Black	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green
	Kernfluss	Black	Black	Black	Red	Green	Green	Red	Green	Red	Green	Green
	Stillstand Trocknersäule	Black	Black	Black	Black	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red
Zündinitialeintrag	Rost am Brenner	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Green	Red	Green	Red	Green
	Ansaugen Partikel Umgebung	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Green	Green	Red	Green
	Partikel Wärmerückgewinnung	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Green	Red	Green
Ausfall von Thermostaten	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Red	Red	Red
Menschliches Fehlverhalten	fehlende Kontrolle	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Green	Red
	fehlende Reinigung	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Red
	Fehlbedienung	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black	Black

Auswertung:

- Inhomogener Produktfluss mit zusätzlichem Eintrag von Zündinitialen, einem technischen Defekt oder menschlichem Fehlverhalten können zu unerkannter lokaler Übertrocknung des Produktes führen, wodurch das Trocknungsgut entweder durch die eingetragenen Zündinitiale oder durch Erhitzung des Produktes zur Entzündung kommen kann.
- Ungleichmäßige Warmluftdurchströmung und inhomogener Produktfluss verursachen eine verlängerte Verweilzeit des Produktes in der Trocknungssäule, sodass eine Entzündung des Trocknungsgutes möglich ist. Ferner kann es durch technischen Defekt oder Übertemperatur zu einer thermischen Aufbereitung mit folgender Entzündung der durchströmten Schüttung kommen.
- Zündinitialeintrag kann insbesondere bei fehlender Reinigung brandauslösend sein, da die Entzündlichkeit im Trockner befindlicher Staubanhaftungen im Verlauf der Zeit stetig steigt.
- Ausfall von Thermostaten führt mit nahezu jedem anderen begünstigenden Umstand in Abhängigkeit der Zeit zu einem Brandausbruch.
- Menschliches Fehlverhalten führt in Kombination mit den meisten anderen begünstigenden Bedingungen zu kritischen Anlagenzuständen, die z. B. zu Übertrocknung führen und dann unerkannt bleiben.

Durch Kombination der oben aufgeführten potenziell schadenauslösenden Faktoren, und deren Koinzidenz, kann eine Auswahl an Schutzmaßnahmen, bzw. die Validierung des Ausschlusses der Interaktion zueinander systematisch erfasst werden.

Die Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen ist eine wesentliche Anforderung der TRGS 800, wobei darin auch eingeräumt wird, dass die Wirksamkeit von (technischen) Schutzmaßnahmen in der Regel nicht vor Eintritt des Brandfalls prüfbar ist. Daher ist im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung zu ermitteln, ob die getroffenen technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen einzeln oder im Zusammenwirken den gewünschten Erfolg haben [TRGS800,2012].

Anhand der zuvor genannten Beurteilungsmethode ist die geforderte Plausibilitätsprüfung möglich.

6 Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen an Trocknungsanlagen

Die im *Anhang A* analysierten Brandschäden und auch einschlägige Literatur (z. B. [MUEHL,2009]) zeigen die sich verwirklichende Brandgefahr an Trocknungsanlagen auf. Dem Substitutionsgebot der GefStoffV kann hier nicht gefolgt werden, da die Trocknung der organischen Stoffe das erklärte Ziel beim Betrieb einer Trocknungsanlage ist und somit das Gefährlichkeitsmerkmal der Brennbarkeit des Trocknungsgutes gegeben ist.

Die Auswahl der Maßnahmen erfolgt auf Grund der Kombination von Personen- und Sachwertschutzaspekten in nachfolgender Rangfolge:

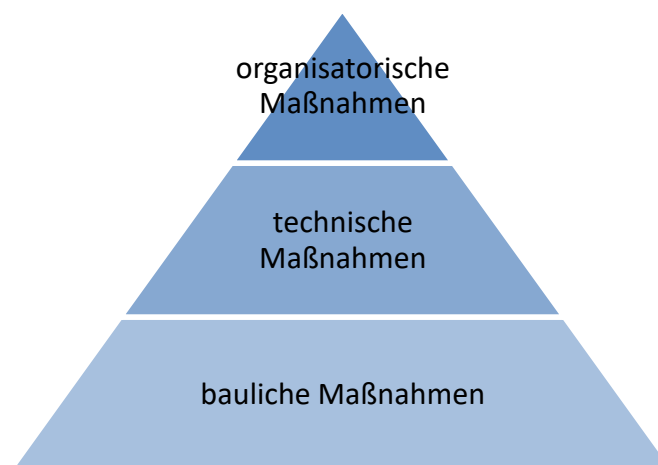


Bild 6.1: Rangfolge Auswahl von Maßnahmen

- bauliche Maßnahmen (auch bei Versagen technischer und organisatorischer Maßnahmen ist das erklärte Schutzziel gegeben)
- technische Maßnahmen (auch bei Versagen von organisatorischen Maßnahmen ist das erklärte Schutzziel gegeben)
- organisatorische Maßnahmen

Die sichere Ausrüstung soll am Beispiel eines Dächerschachttrockners mit Öl- bzw. Gasbrenner dargestellt werden. Solche Trockner werden meist über Nassgutelevatoren beschickt. Dabei übernehmen die Trockner die Steuerung der Beschickung. Die Überwachung des Brenners erfolgt durch das Steuergerät am Arbeitsthermostat. In der Warmluftkammer befindet sich ein Sicherheitstemperturfühler. Bei Übertemperatur schaltet der Arbeitsthermostat den Brenner aus, wobei die Lüfter weiterlaufen.

Sollte der Sicherheitsthermostat ansprechen, ist ein Wiedereinschalten des Brenners erst möglich, wenn der Sicherheitsthermostat manuell quittiert wird.

In der Kornsäule der Produktkammer befinden sich oben, mittig und unten drei Messstellen für die Korntemperatur, wobei die beiden Temperaturwerte oben und mittig für die Feuchterege­lung verwendet werden. Steigt die Korntemperatur über den in der Steuerung eingestellten Wert, wird Korntemperaturalarm ausgelöst. Dadurch wird der Brenner abgeschaltet, die Lüfter und der Austrag laufen aber weiter. Spricht der Sicherheitsthermostat an, wird der Austrag gestoppt. Im Vorbehälter befinden sich zwei Füllstandmelder, die in unterschiedlicher Höhe angebracht sind. Gibt der obere Melder das Signal „Behälter voll“, wird mit diesem Signal die Materialzufuhr unterbrochen. Sinkt der Getreidepegel jedoch unter diesen Pegel, wird mit der Befüllung fortgefahren, bis der Behälter wieder voll ist. Der Melder im Trocknerzulauf zeigt den fehlenden Getreidezulauf an.

Folgende Überwachungseinrichtungen sind regulär vorhanden:

- Sicherheitsthermostat; Übersteigt die Temperatur einen für die Brandentstehung kritischen Wert, wird der Brenner umgehend abgeschaltet.
- Trichterüberwachung; Im Austragstrichter befindet sich ein Füllstandsmelder, um einen Rückstau beim Austrag zu melden.
- Umluftklappenüberwachung; Alarm bei unkorrekter Endschal­terstellung. Bei Ausfall werden sofort die Brenner und der Austrag abgeschaltet. Die Lüfter laufen noch ca. 30 Minuten nach.

Beim Ansprechen der Überwachungseinrichtung wird immer der Brenner gestoppt. Im Brandfall muss auch der Produktaustrag gestoppt werden.

6.1 Bauliche Brandschutzmaßnahmen

Bauliche Brandschutzmaßnahmen zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Wirksamkeit unabhängig von weiteren Maßnahmen gegeben ist. Selbst bei äußeren Störungen (z. B. Stromausfall) oder Nichteinhaltung von organisatorischen Maßnahmen ist deren Schutzfunktion zumeist gegeben.

Auswahl des Aufstellortes der Trocknungsanlage

Mindestabstände zu anderen Bauteilen:

Abgeleitet aus den Sachwertschutzaspekten der Sachversicherer ist bei der Errichtung von Neuanlagen grundsätzlich ein Aufstellort im Freien mit ausreichendem Sicherheitsabstand zur bestehenden Gebäudesubstanz (mind. 5 m) zu wählen. In Analogie zu Lägern brennbarer Stoffe im Freien ist bei einer brennbar ausgeführten Außenwand des

angrenzenden Bestandsgebäudes (z. B. Holz) der Sicherheitsabstand wegen der zu erwartenden Wärmestrahlung auf mind. 20 m zu erhöhen [VDS2234,2012].

Selbst bei Versagen aller anderen Schutzmaßnahmen ist zwar ein Totalschaden an der Anlage nicht zu vermeiden, jedoch grundsätzlich eine Schadenausbreitung auf angrenzende Gebäude unwahrscheinlich.

„Saubere“ Frischluftansaugung:

Anhand der durchgeführten Versuche zu potenziellen Brandursachen in Trocknungsanlagen konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere bei direkter Beheizung brennbare Partikel angesaugt, am Brenner entzündet und über die Zuluft bis zum Trockengut transportiert werden.

Aus diesem Grunde ist bei der Wahl des Aufstellortes darauf zu achten, dass sich z. B. kein Wald / Bäume in unmittelbarer Nähe befinden (die Trocknungskampagne ist zumeist im Herbst, wenn Bäume ihr Laub abwerfen) oder auch die Frischluftansaugung im Bereich der Schüttgasse liegt, bei der trotz Aspiration eine gewisse Staubemission zu erwarten ist. Diese Faktoren sind auch unter Berücksichtigung möglicher Windböen oder verursachter Aufwirbelung, z. B. durch Anlieferfahrzeuge, zu beachten. Eventuell ist eine Ansaugung aus größeren Höhen sinnvoll.



Bild 6.2 Ansaugebereich während der Trocknung



Bild 6.3: Zu vermeidende Ablagerungen

Laufstege in der Zu- und Ablufthaube

Wie in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt, ist zur Verringerung der Brandgefahr eine regelmäßige und gefahrlose Kontrolle der Kaskadenelemente erforderlich - sowohl

auf der Zu- als auch auf der Abluftseite. Sofern eine Reinigung auf Grund von Anhaftungen oder Verklumpung erforderlich wird, so muss dem Bedienpersonal eine sichere Aufstiegsmöglichkeit (ortsfeste Leiter) und Aufstandsflächen (z. B. Gitterroste in einem gewählten vertikalen Abstand, der alle Kaskadenelemente gefahrlos erreichen lässt) zur Durchführung der Arbeiten zur Verfügung gestellt werden. Einstiegs- und Revisionsluken sind dabei so groß zu bemessen, dass ein schneller und einfacher Einstieg des Personals ermöglicht wird (z. B. mittels Türen).

Dies erhöht die Akzeptanz zur Durchführung für organisatorisch erforderliche Kontrollarbeiten und verringert die Absturzgefahr.



Bild 6.4: Beispiel externe Aufstiegsleiter *Bild 6.5: Beispiel Aufstiegsleiter mit Gitterroste*

6.2 Technische Brandschutzmaßnahmen

Hierunter fallen alle technischen Maßnahmen, die einer Entstehung eines Brandes entgegenwirken oder eine Ausbreitung des Schadenereignisses verhindern sollen.

Reinigung des Trocknungsgutes

Zur Vermeidung eines eingeschränkten Produktflusses in der Trocknungssäule durch Störstoffe (z. B. Halme oder Kolben) und dem Ausscheiden von entzündlichem Besatz (insbesondere Häutchen bei der Maistrocknung) ist das Trocknungsgut einer Vorreinigung zu unterziehen. Bild 6.6 zeigt die Menge an abgereinigtem Besatz einer laufenden Trocknungskampagne.



Bild 6.6: Abreinigung von Spelzen des Trocknungsgutes

Staubfangmatten und Funkenfänger

In Ergänzung zu einem geeigneten Aufstellort einer Trocknungsanlage kann der Eintrag von entzündbaren Materialien über die Zuluft durch die Installation von Staubfangmatten weiter reduziert werden.

Hinter dem Brenner sind zur Verhinderung des Eintrages von glimmenden Partikeln, die sich z. B. vom Brenner lösen oder Staubpartikel aus der Wärmerückführung, die entzündet werden, Funkenfänger zu installieren.

Den Eintrag von Staubpartikeln, die sich im Zuge des Nachrieselns aus dem Bereich der Kühlzone mit dem Luftstrom über die Wärmerückgewinnung in die Zuluft haube mitgetragen werden, versuchen die Hersteller durch Stellklappen in der Wärmerückgewinnung, die für die Zeit des Austrages schließen, zu minimieren. Die *Bilder 3.11 und 3.12* zeigen jedoch, dass diese Maßnahme allenfalls die Rückführung einschränken, jedoch nicht verhindern.

Funkenfänger dienen dazu, dass glimmende Partikel gegen die Maschen des Gitters prallen und dort Ihre Energie „verlieren“.

Der Einbau von Staubfangmatten und Funkenfängern stellt jedoch immer einen strömungstechnischen Widerstand dar, reduziert die Trocknungsleistung oder erhöht den Energieaufwand und muss somit zwingend vom Hersteller bei der erforderlichen Luftdurchsatzleistung berücksichtigt werden. Belastbare Zahlen waren bei Errichtern hierzu nicht erhältlich, es wird jedoch von Dimensionen um die 10 % Trocknungsleistungseinbuße gesprochen.

Ferner müssen Ersatzfunkenfänger vorgehalten werden, da sich an diesen auch Staub verfängt und sie somit regelmäßig gereinigt, bzw. getauscht werden müssen.



Bild 6.7: Im Zuluftschacht installierter Funkenfänger

Branderkennungseinrichtung

Sollte es zu einem Brand kommen, so ist eine zuverlässige und möglichst zeitnahe Detektion des Brandes erforderlich. In der Grundausstattung weisen Trocknungsanlagen zumeist nur solche Messtechnik auf, die für den Betrieb der Anlage zwingend erforderlich ist.

Bereits in Zusammenarbeit mit der heutigen Abt. Risk Engineering, Abteilung Risk Management Beratung der R+V Allgemeine Versicherung AG wurde seit dem Jahr 1995 an der Lösung einer adäquaten Brandfrüherkennung an Getreidetrocknungsanlagen gearbeitet [LISTEC,2001].

Unter folgender Problemstellung stellte die Firma LISTEC folgendes System der Brandfrüherkennung vor:

Problemstellung:

In den Trockneranlagen, die in der Regel aus Aluminiumblechen gebaut sind, wird heiße Luft von 120 °C – 160 °C durch dreieckförmige Kanäle waagrecht durchgeblasen, an welchen das Getreide langsam vom oberen Einfüllpunkt bis zum unteren Auslass vorbeirieselt. Trocknungstemperatur und Fließgeschwindigkeit werden je nach Feuchtegrad des Trocknungsgutes geregelt.

Auf der Zuluftseite sind meist einige Temperaturmessstellen (Thermoelemente, PT-100 Elemente) angebracht, um die Lufttemperatur einstellen zu können und um eventuelle

gefährliche Übertemperaturen durch automatische Abschalter (Grenzwertschalter) zu verhindern.

Lösungsansatz:

Durch eine flächendeckende Temperaturüberwachung auf der Abluftseite, d.h. Messung der Temperatur an den Alublechen an möglichst vielen Stellen, sollen überhitzte Bereiche bzw. Glimmnester erkannt werden. Eine Überwachung der Temperatur auf Schwellenwerte muss dabei dynamisch in Abhängigkeit der Heißlufttemperatur erfolgen.

Zur schnellen Erfassung möglichst vieler Temperaturmessstellen muss ein geeignetes, flexibles Messsystem mit wesentlichen Eigenschaften einer Brandmeldeanlage eingesetzt werden (eigene Notstromversorgung, automatische Überwachung aller Sensoren auf Fehler / Ausfall, möglichst automatische Funktionsprüfung).

Beschreibung am Beispiel eines Kraftfuttermittelwerkes:

Ein Kraftfutterwerk im Südwesten Deutschlands betreibt 2 Trocknertürme mit je 16 Trocknerkaskaden.

In 2 Ausbaustufen wurden 1998 beide Türme mit Messsensoren des Temperatursystems ausgestattet.

Jeder Messpunkt, vier pro Kaskade, besteht aus einer Aluminiumhülse von ca. 5 cm Länge, in die ein Halbleitersensor eingebracht ist, der einen eingepprägten Strom von einigen hundert Mikroampere liefert. Dieser Stromwert ist proportional zur Temperatur. Die Hülssen sind fest an die Kaskadenwand genietet und ermöglichen somit einen optimalen Wärmeübergang vom Trocknerblech zum Sensor.



Bild 6.8: Temp.-Messstellen Abluftseite [LISTEC,2001]

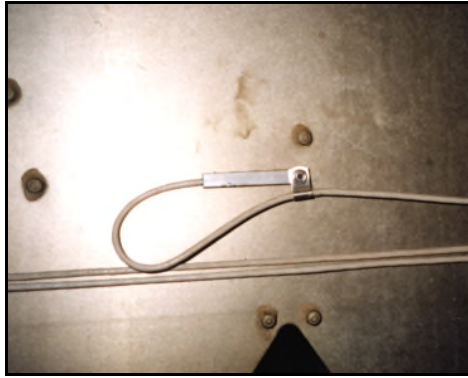


Bild 6.9: Detailaufnahme [LISTEC,2001]

Die Sensoren selbst werden über ein 2-adriges, temperaturfestes Anschlusskabel in Anschlussboxen im Aufstiegsbereich über Adressiermodule an das Bussystem angeschlossen. Pro begehbare Ebene befindet sich eine Box mit drei Modulen für jeweils 4 Sensoren.



Bild 6.10: Anschlussbox [LISTEC,2001]

Über eine 4-adrige Busleitung werden alle Module mit einer Steuer- und Auswerteeinheit SCU 3000 verbunden, welche sich im Leitstand befindet. Diese Auswerteeinheit adressiert im 10 s - Zyklus alle über 100 Messstellen und rechnet die Stromwerte in Temperaturen um, und zwar mit einer Auflösung von 0,1 °C. Die somit erhaltenen Temperaturwerte werden dann per Software auf bestimmte Schwellwerte hin überprüft.

Wie Tests im Vorfeld gezeigt haben, muss für eine sinnvolle Auswertesoftware auch die Angabe der Temperatur im Zuluftbereich bereitgestellt werden. Im beschriebenen Fall

wurden daher zwei vorhandene PT-100 Elemente, je eines pro Turm, über Konvertermodule in das System eingebunden. Diese Konverter, ebenfalls adressierbar, wandeln den temperaturabhängigen Widerstandswert der PT-100 Elemente (100 Ohm entspricht 0 °C) in einen kompatiblen Strom um.

Auswertung:

Umfangreiche Messaufzeichnungen haben gezeigt, dass die Temperaturen im Abluftbereich stark schwanken. Kaltes Trocknungsgut (z. B. Mais) läuft nicht gleichmäßig durch den Trockner. Damit ergeben sich ungleichmäßige Temperaturprofile, die sich ständig ändern. In Trocknungsturm 2 wird vorgetrockneter Mais bearbeitet, welcher wiederum ein ganz anderes Verhalten der Ablufttemperatur bedingt. Damit war es nicht möglich, die Auswertesoftware des Systems so zu belassen, wie sie anderweitig eingesetzt wird.

Folgende Änderung / Neuerung wurde durchgeführt:

Der Maximalwert (TKRITA) ändert sich automatisch in Abhängigkeit der Zulufttemperatur. Eingegeben wird ein konstanter Differenzwert zwischen Zuluft und Ablufttemperatur. So wird beispielsweise Alarm gegeben, wenn bei einer Zulufttemperatur von 130 °C auf der Abluftseite 125 °C erkannt wird. Die Differenz muss also im Normalbetrieb mehr als 5 °C betragen. Dieser Wert kann für jede Kaskade unabhängig eingegeben werden.

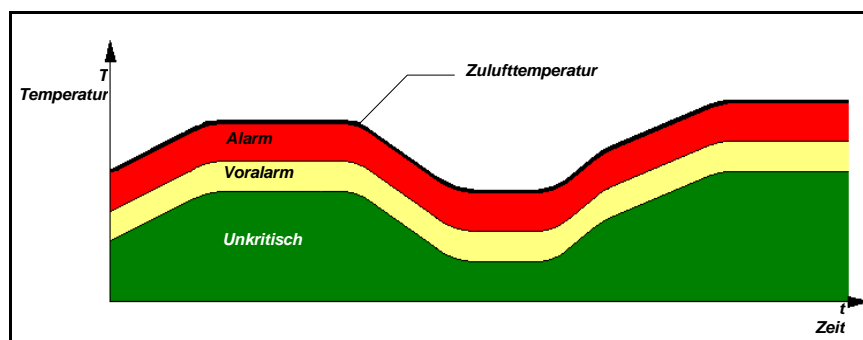


Bild 6.11: Alarm- und Voralarmbereiche [LISTEC,2001]

Visualisierung:

Um möglichst viele Messdaten mit dem System zu erhalten und auswerten zu können, war von vornherein ein herkömmlicher Personal Computer eingesetzt, welcher die Temperaturwerte über eine serielle Datenschnittstelle aus der Steuer- und Auswerteeinheit ausgelesen und abgespeichert hatte. Zur endgültigen Inbetriebnahme des Temperaturmesssystems wurde dann das Visualisierungsprogramm *LISTgraph II*, welches bislang hauptsächlich in Kraftwerken im Einsatz ist, für die vorliegende Anwendung adaptiert und auf dem Rechner im Leitstand installiert.

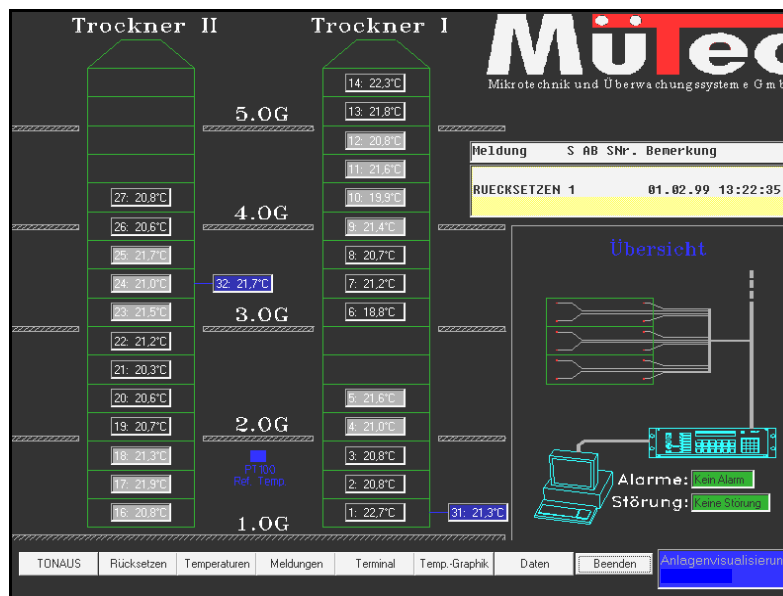


Bild 6.12: Visualisierung [LISTEC,2001]

Auf dem Hauptbild sind die beiden Trocknertürme schematisch dargestellt. Für jede Kaskade wird ständig der aktuell gemessene Mittelwert der betreffenden 4 Messstellen angezeigt. (In Turm 1 konnten 2 Kaskaden, baulich bedingt, nicht mehr mit Sensoren ausgerüstet werden. In Turm 2 sind die obersten Kaskaden nicht mehr mit Sensoren versehen). Eingblendet werden auch die Temperaturwerte auf der Zuluftseite, Messpunkt 31 und 32, gemessen mit PT100 Elementen. Der Betreiber hat somit stets eine übersichtliche Darstellung der Temperaturverteilung beider Türme im Blickfeld.

Eventuell auftretende Meldungen des Systems werden in einem Teilfenster ausgegeben. Hier sind insbesondere Voralarme interessant, weil der Betreiber schon frühzeitig auf Anomalien hingewiesen wird.

Im Falle eines Alarms wird die betreffende Kaskade rot umrandet gekennzeichnet, die Alarmmeldung im Meldungsfenster angezeigt und der Alarmstatus wechselt von „Kein Alarm“ über „Voralarm“ auf „Alarm“.

Für detaillierte Angaben kann der Betreiber über das Mousefeld „Temperatur“ eine Temperaturliste aufrufen, in der alle Messstellen gelistet sind mit Angabe der Messstellennummer (Nr.), der Abschnittsnummer (A; entspricht der Kaskadennummer) und den gemessenen Temperaturwerten.

Im Fenster „Temp.Graphik“ werden der Temperaturverlauf und die Differenzwerte graphisch dargestellt.

Temperatur-Liste		
Temperaturdaten		
Nr	A	T-akt
1	1	22,0
2	1	24,7
3	1	21,7
4	1	22,7
5	2	20,5
6	2	20,9
7	2	21,7
8	2	18,5
9	3	23,0
10	3	19,3
11	3	21,3
12	3	20,8
13	4	23,6
14	4	19,4
15	4	21,1
16	4	21,8
17	5	19,3
18	5	23,1
19	5	20,3
20	5	22,1
21	6	21,3

Bild 6.13: Temp.-Liste [LISTEC,2001]

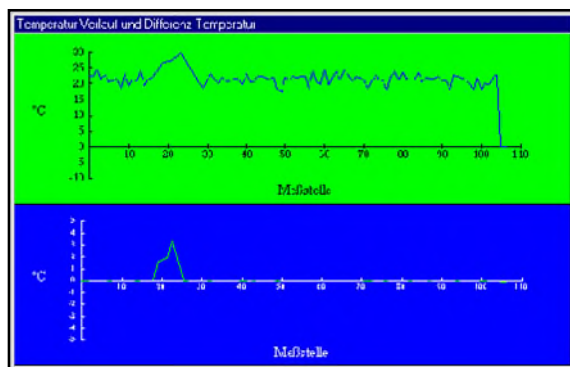


Bild 6.14: Graphische Darstellung Temperaturverlauf [LISTEC,2001]

Validierung im Schadenfall:

Am oben beschriebenen Trockner ereignete sich im Oktober 1996 noch während der Erprobungsphase des Meldesystems ein Brandfall.

Um 3:00 Uhr morgens am 31.10.1996 meldeten Sensoren an den Kaskaden 5, 8 und 4 Voralarme und dann sehr schnell auch Feuer an den Kaskaden 5 und 4.

Obwohl das Sensorsystem noch nicht optimal angepasst war und auch noch keine Regelung der Schwellenwerte in Abhängigkeit der Zulufttemperatur erfolgte, konnte durch die Alarmierung und die schnell durchgeführten Löschmaßnahmen ein beträchtlicher Schaden verhindert werden.

Alternative Branderkennung mittels Brandgasdetektion

Die Tatsache, dass seit Inbetriebnahme dieser Trocknungsanlagen alle kritischen Temperaturen rechtzeitig erkannt und somit ein Brandereignis so frühzeitig erkannt wurde, dass ein ausgedehnter Brand in den Anlagen vermieden werden konnte, zeigt den Erfolg von Branderkennungselementen auf thermischer Basis bei engmaschiger Überwachung. Jedoch ist der Ansatz der Brandfrüherkennung mittels Brandgasdetektion dahingehend, dass kritische Zustände / die Pyrolysephase vor einer Entzündung detektiert werden sollen und die Anlage durch eingeleitete Maßnahmen (z. B. Brenner abschalten und Schüttung kühlen) in einen sicheren Zustand gefahren werden kann. Ferner wird gehofft, dass durch Fortschritte in der Messtechnik die Anschaffungskosten für ein solches System deutlich geringer sein dürften, da sowohl die Anzahl der „Messstellen“ als auch der Installationsaufwand deutlich geringer sind.

Selbst wenn erst ein Entstehungsbrand detektiert werden kann, so dürfte dieser zeitlich noch schneller und eher erkannt werden, da die Lage des Glimmnestes innerhalb der Trocknersäule für eine Brandgas-Detektion unerheblich ist. Im Gegensatz dazu ist bei einer Temperaturüberwachung die Entdeckungszeit abhängig vom Abstand des Glimmnestes zum nächstgelegenen Temperaturfühler.

Wie in den einleitenden Kapiteln beschrieben, ist der Aufbau von stationären Durchlaufgetreidetrocknungsanlagen nahezu identisch – unabhängig vom Hersteller.

Ein Abluftventilator erzeugt einen Unterdruck, der die mittels Warmluftherzeuger generierte warme Luft (unter Zumischung von Kühlluft/Umgebungsluft in der Abkühlzone des Trockners und ggf. Rückführung vorgewärmter Luft) durch die Kaskaden saugt und das darin befindliche Produkt in seinem Feuchtigkeitsgehalt verringert.

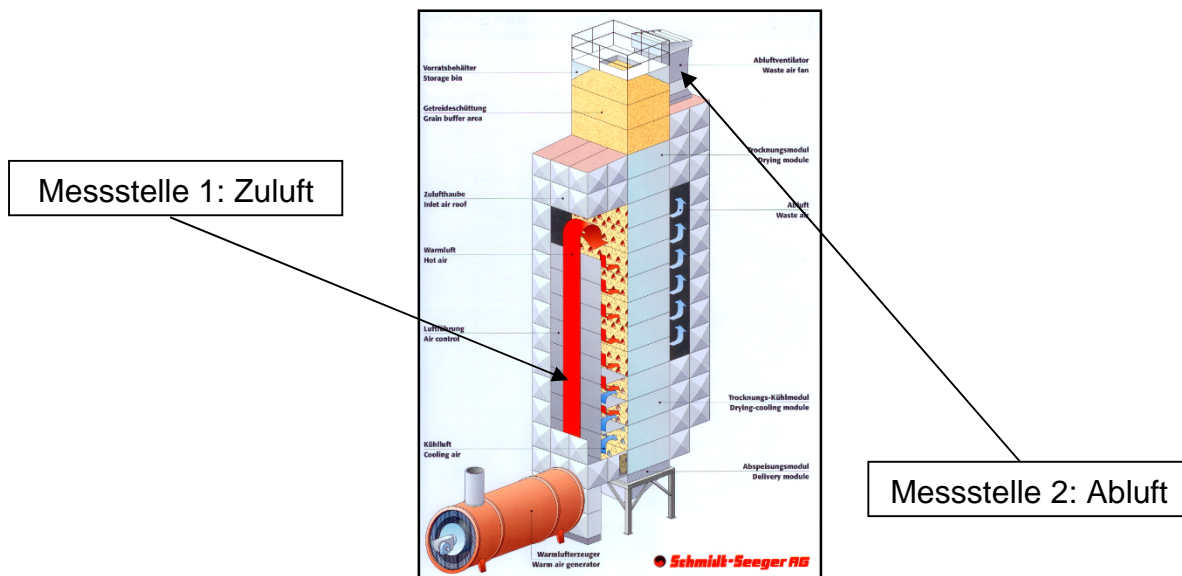


Bild 6.15: Schematischer Aufbau eines Trockners und potentielle Installationspunkte für CO-Detektion [SCHMI,2007]

Zuluftseitig ist die Kohlenstoffmonoxid (CO)-Messeinrichtung so zu installieren, dass sowohl eine kontinuierliche Probennahme der durch den Warmluftgenerator generierten warmen Luft wie auch gleichzeitig der einströmenden Umgebungs- / Kaltluft garantiert ist. Diese Messstelle wird als „Messstelle 1: Zuluft“ bezeichnet.

Abluftseitig wird im Bereich des Abluftventilators eine zweite Messeinrichtung mit Probennahme installiert.

Diese Messstelle wird als „Messstelle 2: Abluft“ bezeichnet.

Berücksichtigt man nun die Strömungszeit von Messstelle 1 zu Messstelle 2 (z. B. 5 s – dies ist aber im Einzelfall anzupassen), so kann mit diesem Zeitversatz ein Vergleich der gewonnenen Messergebnisse erfolgen.

Selbst Beeinflussungen durch die Umwelt (z. B. ein vorbeifahrender LKW oder Schwankungen in der Verbrennung des Warmluftheizers) haben zwar Einfluss auf die Messwerte, jedoch nicht auf die Differenz der beiden Werte zueinander.

Hinzu kommt, dass die Einstellung von Alarmgrenzen (z. B. $\Delta C_{CO} = 5$ ppm zwischen Messstelle 1 und Messstelle 2 bei $\Delta t = x$ [Sek.]) immer in Abhängigkeit des Trockengutes und der vorhandenen Ventilation erfolgen muss.

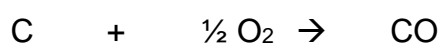
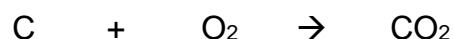
Verbrennungsprozess zur Branddetektion:

Als Verbrennung (im engeren Sinn) wird die in der Regel stark exotherme Reaktion von Substanzen, wie z. B. von Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffen, Wasserstoff oder Metallen, mit Sauerstoff bezeichnet.

Der Sauerstoff kann hierbei in reiner Form oder als Bestandteil von Gasmischungen (z. B. Luft) vorliegen. Sämtliche Verbrennungsvorgänge sind Redoxreaktionen. Der molekulare Sauerstoff wird hierbei von der Oxidationsstufe 0 in die Oxidationsstufe II überführt, wird also reduziert. Der Brennstoff oxidiert [CZICH,2000].

Beispiel für organische Verbrennungsvorgänge:

Kohlenstoffverbrennung



Die vollständige Verbrennung des Kohlenstoffs führt bis zum Kohlendioxid CO₂. Bei unvollständiger Verbrennung entsteht neben CO₂ auch das giftige CO.

Anhand der in *Anhang A* genannten Schadenbeispiele ist ersichtlich, dass immer Glimmbrände in der Entstehungsphase aufgetreten sind.

Bei einem Glimmbrand liegt immer eine unvollständige Verbrennung vor und somit ist mit der Entstehung von CO zu rechnen.

Vergleicht man jedoch die Ergebnisse des Brandversuches aus *Anhang B* bei der FSA e.V., so wird deutlich, dass auf Grund des Überangebotes an Luftsauerstoff rasch eine vollständige Verbrennung eintritt, so dass auch mit der Entstehung paraffiner Kohlenwasserstoffe (CH) zu rechnen ist.

Stationäre Löscheinrichtung:

Brände in Trocknungsanlagen verlaufen, wie die aufgeführten Schadenfälle zeigen, innerhalb der Trocknungssäule. Auf Grund der geschlossenen Bauweise einer Trocknungsanlage besteht für die Feuerwehr im Brandfall keine oder zumindest nur sehr eingeschränkt die Möglichkeit, direkt den Brand bekämpfen zu können.

Kommen dann noch erschwerende Umstände hinzu, wie eng dimensionierte Einstiegs-luken, durch die die Feuerwehrkräfte mit angelegter persönlicher Schutzausrüstung und umluftunabhängigem Atemschutzgerät kaum in den „Innenangriff“ gelangen oder dadurch auch ein schneller Rückzug (z. B. im Falle eines drohenden Verlustes der Stand-sicherheit) ausgeschlossen ist, kann die einsatztaktische Entscheidung dahingehend lau-ten, dass kein „Innenangriff“ durchgeführt wird.

Es ist somit Aufgabe des Herstellers und des Betreibers, für den unvermeidlichen Fall eines Brandes, der Feuerwehr Möglichkeiten der Brandbekämpfung zur Verfügung zu stellen.

Anhang E legt dar, dass eine halbstationäre Löschanlage dahingehend ausgelegt werden muss, dass diese zumindest durch die Feuerwehr und deren vorhandenen Equipment gespeist werden kann. Hierfür ist mittels B-Storz-Kupplung eine Einspeisestelle an sicherer und leicht erreichbarer Stelle anzuordnen. Von hier aus muss dann eine gleichmäßig verteilte Löschwasserbeaufschlagung der Trocknungssäule erfolgen.



Bild 6.16: Beispielbild B-Anschluss



*Bild 6.17: Löschwasserverteilung /
Einbringung in Trocknungssäule*



*Bild 6.18: Löschwasserverteilung -
vor Einbau in Trocknerkopf*

Schutzziel dieser Löscheinrichtung ist der thermische Schutz der Trocknerkonstruktion (kühlen) und die Verhinderung der Brandausbreitung innerhalb der Schüttung.

Notaustrag:

Kommt es zu einem Brand des Trockengutes innerhalb einer Trocknungsanlage, so wurde aufgezeigt, dass eine Brandbekämpfung auf Grund der geschlossenen Bauweise nur mittels beschriebener Löscheinrichtung wirksam möglich ist.

Unerlässlich ist zur Verhinderung des Aufquellens der Trocknungsgüter der unmittelbare Beginn des Austrages nach Inbetriebnahme der Löscheinrichtung. Um dies zeitnah realisieren zu können, muss die Trocknungsanlage mit einer Notaustragseinrichtung ausgestattet sein. Diese kann unterschiedlich ausgeführt sein (z. B. mittels Umkehrbetrieb des Austragredlers, Klappen am Trockner, Förderband, usw.). Wichtig ist hierbei, dass der Notaustrag in einen sicheren Bereich erfolgt und dort die vom Schaden betroffene Ware mittels Hilfsgeräten (z. B. Frontlader) auseinandergezogen und von der Feuerwehr abgelöscht werden kann. Dabei ist zu beachten, dass ein Austrag in Bereiche, die gemäß GefStoffV eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre (Zone) aufweisen, nicht zulässig ist.



Bild 6.19: Notaustragseinrichtung

Funken- / Glimmnestdetektion:

Brände in Getreidetrocknungsanlagen lassen auf Grund der Schadenerfahrung und der zuvor geführten Diskussion keine Explosion erwarten.

Die Gefahr einer Explosion kann dann jedoch entstehen, wenn brennendes bzw. glimmendes Trocknungsgut über die regulären Förderwege (z. B. Elevator) in die Lagerstätten gefördert wird, in denen eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre (g.e.A.) vorhanden ist und entzündetes Material als wirksame Zündquelle angenommen werden

muss. Um diese Verschleppung eines Zündinitials in explosionsgefährdete Bereiche zu verhindern, ist nach dem Austrag aus dem Trockner an geeigneter Stelle (in der Regel im Bereich eines Fallschachtes, wo eine Auflockerung des Trocknungsgutes erfolgt) eine Funken- / Glimmnestdetektion zu installieren, die bei Ansprechen eine automatische Abschaltung der Förderwege veranlasst.

Anmerkung: Diese Maßnahme dient nicht dem Brand- und Explosionsschutz der Trocknungsanlage selbst, sondern stellt eine Maßnahme zur Verhinderung der Schadenausbreitung auf nachgeschaltete Anlagenteile dar.



Bild 6.20: Im Abförderaggregat installierte Funken- / Glimmnestdetektion

6.3 Organisatorische Brandschutzmaßnahmen

Zur erfolgreichen Umsetzung und Einhaltung organisatorischer Schutzmaßnahmen ist durch die Unternehmensleitung die Benennung einer auf Grund ihrer Ausbildung und Berufserfahrung geeigneten verantwortlichen Person erforderlich.

Beaufsichtigter Betrieb:

Entgegen den herstellerseitigen Anweisungen aus der Gebrauchsanleitung werden Trocknungsanlagen auf Grund der vorhandenen Automatisierungstechnik teilweise unbeaufsichtigt betrieben.

Durch diese fehlende Aufsicht können gefährliche Zustände der Anlage (z. B. Rauchentwicklung, Übertemperatur oder ungewöhnliche Geräusche), die auf einen Brand hindeuten, durch anwesendes Bedienungspersonal nicht frühzeitig erkannt werden. Zwar sind

Anlagen zumeist so weit automatisiert, dass diese bei Fehlermeldung (z. B. Übertemperatur) selbsttätig abschalten und zum Teil über Telefonwählgeräte das Bedienpersonal alarmieren, doch zeigen die Schadenfälle, dass die derzeit vorhandenen Überwachungseinrichtungen je nach Lage der Brandentstehung erst zu einem Zeitpunkt ansprechen, wenn die Anlage schon irreparabel geschädigt ist.

Selbst zu diesem Zeitpunkt könnte vor Ort anwesendes Bedienpersonal umgehend Notfallmaßnahmen einleiten, wohingegen das Hinzurufen von Bedienpersonal immer eine weitere zeitliche Verzögerung erwarten lässt.

Einhaltung der Prüf- und Reinigungsintervalle:

Feuerungstechnische Anlage:

Feuerungstechnische Anlagen unterliegen einem Verschleiß. Dies ist insbesondere bei Trocknungsanlagen gegeben, da diese oftmals nur wenige Wochen im Jahr in Betrieb sind und in der übrigen Zeit den Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. Um technische Defekte am Brenner auszuschließen, ist die Feuerungseinrichtung vor Beginn der Trocknungskampagne durch eine Fachfirma instand zu halten (inkl. Prüfung des Wärmetauschers auf Defekte) sowie während der Trocknung regelmäßig durch Mitarbeiter auf Unregelmäßigkeiten zu kontrollieren.

Reinigungszustand:

Trotz technischer Maßnahmen zur Verringerung des Besatzes ist eine regelmäßige Kontrolle mit entsprechend einhergehender Reinigung der Trocknungsanlage unumgänglich. Produktstockungen und Ablagerungen von Produkt / Besatz sind nur visuell durch das Betreiberpersonal innerhalb der Trocknungssäule feststellbar. Organisatorisch muss sichergestellt werden, dass die Trocknungszeiten entsprechende Pausen für Kontrollen und Reinigungsarbeiten vorsehen.

Auch wenn die herstellerseitig vorgeschriebenen Kontroll- und Reinigungsintervalle dahingehend unpraktikabel erscheinen, da ein vor Besteigen der Anlage eine Abkühlphase erforderlich ist, so muss individuell eine angemessene Kontrolle / Reinigung durch den Betreiber festgelegt werden.



Bild 6.21: Restgetreide während der Maistrocknung



Bild 6.22: Brückenbildung in „leerem“ Trockner

Unterweisung der Mitarbeiter:

Mitarbeiter, die die Anlage bedienen oder während der Trocknung auf dem Betriebsgelände zugegen sind, sind über mögliche Gefahren und das Verhalten im Brandfall zu unterweisen. Sie müssen ausreichend Kenntnis über die Bedienung der Anlage und die Funktion / Inbetriebnahme von vorhandenen Schutzeinrichtungen besitzen.

7 Ganzheitliches Sicherheitskonzept – Aspekte der Notfallplanung

Die Schadenfälle aus *Anhang A* belegen, dass Trocknerbrände eintreten und somit als möglich beim Betrieb von Trocknungsanlagen zu erachten sind.

Die im vorherigen Kapitel aufgeführten Maßnahmen dienen dem systematischen Ansatz der Verhinderung der Brandentstehung in Trockenanlagen bzw. wirksamer Interventionsmöglichkeiten zur Schadenbegrenzung [CUSTER,1997].

Denn trotz aller präventiven Schutzmaßnahmen wird beim Betrieb von Trocknungsanlagen ein Restrisiko hinsichtlich des Eintrittes eines (Brand-)Schadens verbleiben.

Zur Verhinderung eines finanziellen Verlustes bei einem Brand an einer Trocknungsanlage deckt der Betreiber sein (monetäres) Risiko über den Versicherungsschutz ab. Sein ggf. verbleibendes, finanzielles Restrisiko drückt sich dann z. B. in einem vereinbarten Selbstbehalt pro Schadenfall aus.

Das für den Betreiber nicht akzeptable finanzielle Risiko geht somit (gegen Bezahlung) auf den Versicherer über.

Aus Sicht eines Sachversicherers ist das angestrebte vertretbare Restrisiko, die Höhe eines Sachschadens und hemmende Einflüsse auf den Betriebsablauf, resultierend aus einem Brandschaden, für den Versicherungsnehmer so gering wie möglich zu halten. Kosten oder Mehraufwendungen (z. B. für den Transport von zu trocknenden Gütern an andere Standorte, Nachtschichtzulagen für Betriebsmitarbeiter, etc.) sollen bestmöglich verhindert werden.

Schäden, wie Reputationsverlust oder Verlust von Marktanteilen sind durch den Versicherungsschutz nicht ersetzbar und nur durch „eigene Kraft“ eines Unternehmens wiederherzustellen.

Daher ist es auch im Interesse der Betreiber von Trocknungsanlagen, im Rahmen des verbleibenden Restrisikos Planungen für den Eintritt eines Schadens vorzunehmen.

Die gesetzliche Forderung nach (ganzheitlichen) Schutz- oder Sicherheitskonzepten (werden dort zum Teil als Synonym verwendet) spiegelt sich in der zunehmenden Verankerung in behördlichen Vorschriften wider. So wird beispielsweise für Sonderbauten in der Musterbauordnung [MBO,2019] zum Nachweis der Erreichung der Schutzziele ein Brandschutzkonzept gefordert.

Nach GefStoffV [GEFSTV,2017] ist mittels Explosionsschutzkonzept nachzuweisen, dass angemessene Vorkehrungen getroffen wurden, um die Ziele des Explosionsschutzes zu erreichen.

Anhand der Beispielillustration aus der VdS 3821 [VDS3821,2018] soll aufgezeigt werden, dass mittels Business Continuity Management - hier mittels Erarbeitung eines Notfallplanes - der Umsatzverlust möglichst reduziert wird.

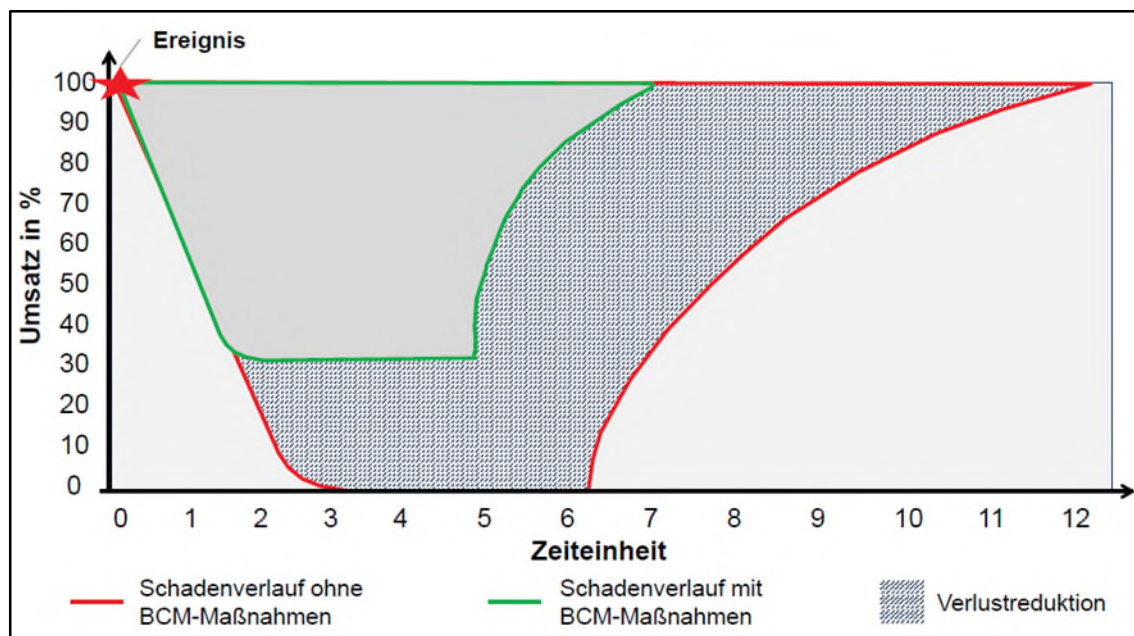


Bild 7.1: Beispielillustration des Schadenverlaufes mit und ohne BCM [VDS3821,2018]

Auf Grundlage der Handlungshilfe betriebliche Notfallplanung [SIHK] sowie der VdS 3821, Business Continuity Management [VDS3821,2018] werden für das Ereignis „Brand an einer Getreidetrocknungsanlage“ (anderweitige Störeinflüsse, die ebenso einen Ausfall oder eine Kapazitätsverringerng zu Folge haben können und im Rahmen einer Notfallplanung zu berücksichtigen sind, bleiben hierbei unberücksichtigt) Aspekte einer Notfallplanung beleuchtet, wobei diese individuell für jedes Unternehmen aufgestellt werden müssen. Die Forderung zur Festlegung von Notfallmaßnahmen ergibt sich auch aus der Gefahrstoffverordnung [GEFSTV,2017]. Diese Notfallmaßnahmen müssen die Information der betroffenen Beschäftigten über die Gefahrensituation, die Minderung der Auswirkungen des Ereignisses und die Herbeiführung des normalen Betriebsablaufes zum Inhalt haben.

Bei der Notfallplanung kann zwischen präventiven und kurativen Aspekten unterschieden werden:

- Prävention: vorbeugende Maßnahmen baulicher, technischer, organisatorischer und personeller Art, um den Eintritt einer Notfallsituation zu vermeiden
- Intervention: Maßnahmen zur Bewältigung des Notfalls, um Schäden von Mensch, Umwelt und Unternehmen abzuhalten oder zu mindern
- Postvention: Aufarbeitung der Notfallsituation mit dem Ziel der Adaption der Präventions- und Interventionsmaßnahmen an Erkenntnisse aus dem eingetretenen Schaden

Prävention:

Hinsichtlich des betrachteten Ereignisses „Brand an einer Trocknungsanlage“ werden im vorherigen Kapitel die baulichen, technischen und organisatorischen Maßnahmen bereits detailliert beleuchtet. Zusammenfassend sind diese:

Bauliche Brandschutzmaßnahmen:

- Aufstellort: Der Aufstellort ist hinsichtlich der Vermeidung einer Brandausbreitung und „sauberer“ Frischluftansaugung auszuwählen.
- Zugangsmöglichkeit: Es muss ein sicherer Aufstieg in der Zu- und Ablufthaube gewährleistet sein.

Technische Schutzmaßnahmen:

- Trocknungsgut: Das Trocknungsgut ist einer Vorreinigung zur Abscheidung von Staub und Besatz zu unterziehen (z. B. mittels eines Trommelsiebes).
- Brenner: Bei direkter Beheizung sind im Bereich der Frischluftansaugung vor dem Brenner Staubfangmatten und nach dem Brenner Funkenfänger im Zuluftkanal vorzusehen.
- Branderkennungseinrichtung: Es ist eine geeignete Branderkennungseinrichtung zu installieren.
- Stationäre Löscheinrichtung: Es ist eine halbstationäre Löschleitung zur Flutung der Trocknungssäule vorzusehen.
- Notaustragseinrichtung: Es ist eine Notaustragseinrichtung in einen „sicheren“ Bereich zu installieren.
- Explosionsschutz: Es ist eine Funken- / Glimmnestdetektion im Austrag mit automatischer Stillsetzung der Förderwege vorzusehen.

Organisatorische Schutzmaßnahmen:

- Betrieb: Der Betrieb der Anlage darf ausschließlich beaufsichtigt erfolgen.
- Prüf- und Reinigungsintervalle: Es sind die herstellerseitig vorgegebenen Prüf- und Reinigungsintervalle einzuhalten - auch für Brenner und Wärmetauscher.
- Unterweisung: Die Mitarbeiter sind in den Betrieb und die Bedienung der Anlage einzuweisen.

Diese Maßnahmen sind unter Berücksichtigung eines akzeptablen Restrisikos systematisch anhand von Trocknerstyp und Trocknungsgut auszuwählen (Kapitel 8).

Um bei einem Brandereignis die bauaufsichtlich geforderten wirksamen Löschmaßnahmen zu ermöglichen, sind im Zuge der Notfallplanung folgende Aspekte unternehmensspezifisch zu beleuchten:

- Feuerwehrplan: Existiert ein aktueller Feuerwehrplan, der den Einsatzkräften zur schnellen Orientierung am Objekt dient und Aufschluss über Angriffswege, Löscheinrichtungen und Gefahrenschwerpunkte gibt, die ein besonderes einsatztaktisches Handeln erfordern? Zu möglichen Gefahrenschwerpunkten zählen Gefahren der Brandausbreitung, wie die Ansammlung von brennbaren Materialien oder explosionsgefährdeter Bereiche sowie Gefahrstoffen. Dieser Feuerwehrplan sollte auch Handlungsanweisungen der Brandbekämpfung beinhalten (siehe Intervention, da Feuerwehren i.d.R. nicht in der Brandbekämpfung von Trocknungsanlagen geübt sind). Bei der Erstellung eines Feuerwehrplanes muss auch eine ausreichende Löschwasserbevorratung geprüft sowie die Löschwasserentnahmemöglichkeiten in Abstimmung mit der Feuerwehr festgelegt werden.
- Freifläche: Ist ein sicherer Platz zum Ausbringen von brennendem Trocknungsgut vorhanden? Zu beachten gilt, dass durch Anlieferung von Trocknungsgut sichere Aufbewahrungsstellen ggf. temporär nicht nutzbar sind. Daher sollte mit Beginn der Trocknung eine Freifläche für eine Notentleerung permanent freigehalten werden.
- Technische Dokumentation: Sind die technischen Daten der Trocknungsanlage (Modell, Schnittzeichnung, Füllmenge, Förderleistung der zu- und abführenden Aggregate) bekannt und hinterlegt, um ggf. umgehend Ersatzteile beim Hersteller bestellen zu können?

- Ersatzteile: Werden Ersatzteile wie einige Kaskadendächer und Wandbleche für evtl. Reparaturen nach einem Brand vorgehalten – insbesondere, wenn eigenes Instandsetzungspersonal Kleinschäden selbst beheben kann?
- Aushilfs- / Ausweichbetriebe: Sind Trocknungsanlagen vorhanden und bekannt, die eine Trocknung innerhalb des eigenen Unternehmens oder im Lohnauftrag übernehmen können / würden, da die zu trocknende Ware verdirbt, wenn diese nicht getrocknet wird? Es sollte eine Liste möglicher Ausweichanlagen mit potentieller Trocknungskapazität angelegt werden. Wichtig: Auch überregionale Anbieter sind mit aufzuführen, da dort die Ernte zeitlich versetzt erfolgen kann.
- Warenabnehmer: Sind Abnehmer von (brand-)beschädigter Ware (z. B. Biogasanlagen) bekannt und schriftlich hinterlegt? Wenn keine weitere Veräußerung möglich ist, muss die Ware entsorgt werden, wodurch eine Schadenausweitung zu erwarten ist.
- Transportunternehmen: Sind potentielle Transportunternehmen bekannt und schriftlich hinterlegt? Ware, die getrocknet werden muss, muss rechtzeitig abtransportiert und einer anderen Trocknungsanlage zugeführt werden, damit diese nicht verdirbt.
- Presse: Brände stehen auch immer im Fokus öffentlichen Interesses. Wer ist Ansprechpartner der Medien / Presse im Brandfall und es sollten bereits Pressemeldungen vorbereitet werden.

Intervention

In der Phase der Intervention wird durch Einleitung von vorgeplanten Maßnahmen auf den Eintritt eines Schadenfalles reagiert.

Im Ereignisfall sind durch den Betreiber sowohl vorgeplante interne als auch externe Notfallmaßnahmen umgehend einzuleiten. Da ein Brandereignis auch immer im öffentlichen Interesse steht, sind weitergehende Planungen zum Umgang mit der Öffentlichkeit oder den Kunden erforderlich.

Notfallmaßnahmen bei Eintritt eines Brandes:

Hierzu zählen Maßnahmen, die durch den Betrieb individuell festgelegt und im Brandfall als standardisierter Prozess durch den verantwortlichen Mitarbeiter abgearbeitet werden müssen.

Typischerweise könnten folgende Maßnahmen definiert werden:

1. Hinweis auf Brand: Bei mittelbaren Hinweisen auf einen Brand, wie anormalen Geräuschen, Gerüchen oder bei Alarm der Branderkennungseinrichtung, die Anlage (ggf. automatisch) über Not-Aus stoppen, damit der Brenner und der Abluftventilator abgeschaltet sowie Ein- und Austrag gestoppt werden. Erst danach die weitere Erkundung durchführen.
2. Bestätigung eines Brandes: Bei unmittelbaren Anzeichen auf einen Brand, wie Rauch und Flammen, ggf. unbeteiligte Personen warnen, Betriebspersonal und die Feuerwehr alarmieren sowie in die Lage einweisen.
3. Alarmierung Feuerwehr: Bei Anwesenheit der Feuerwehr ist die Trocknungssäule über die halbstationäre Löschanlage zu fluten und das Trockengut über den Notaustrag aus der Anlage in einen sicheren Bereich zum händischen Ablöschen zu fahren.
4. Kontrolle: Nach kompletter Notentleerung Anlage auf evtl. Rückstände / brennende Anhaftungen (durch Feuerwehr) kontrollieren (lassen).
5. „Feuer aus“: Nach der Feststellung, dass der Brand gelöscht ist, sollte eine „Brand-sicherheitswache“ zur Kontrolle evtl. wieder auflodernder Brandnester gestellt werden.

Notfallmaßnahmen nach dem Brand:

Hierunter fallen Maßnahmen, die nicht der direkten Bekämpfung des Brandes zuzuordnen sind, aber bereits kurz nach der Brandbekämpfung die Auswirkungen des Brandes reduzieren sollen:

- Schadenumfang: Nachdem der Brand gelöscht ist, ist der Schadenumfang zur Festlegung etwaig erforderlicher Reparaturmaßnahmen sowie deren Zeitrahmen zu ermitteln.
- Lieferanten: Die anliefernden Landwirte, mit denen Abnahmekontrakte bestehen, sollten über den Feuerschaden informiert werden und es sollte versucht werden, die weitere Ernte um einige Tage zu verschieben, um Zeit für weitere Maßnahmen (z. B. Reparatur) zu gewinnen. Ggf. kann/muss auf andere Trocknungsanlagen ausgewichen werden und der Transport vom Feld bereits umgeleitet werden.
- Schadenmeldung: Der Brandschaden ist dem Versicherer zu melden und umfangreich der entstandene Schaden zu dokumentieren.

- Hersteller- oder Errichterfirma: Der Errichter der Trocknungsanlage ist über den Schaden zu informieren und die Inaugenscheinnahme hinsichtlich Reparaturmöglichkeiten zu beauftragen. Ggf. selbst vorgehaltene Ersatzteile sind bereit zu legen.
- Schadenminderung: Reparatur, wenn möglich durchführen, Anlage grundlegend reinigen und genauestens auf verbleibende Schäden (z. B. durch abgetropftes Aluminium) kontrollieren. Am besten durch den Errichter eine Kontrolle durchführen lassen, der die Funktionstüchtigkeit nach dem Schaden bescheinigt.
- Transport: Der Abtransport der am Standort bereits zur Trocknung angelieferten Rohware an andere Trocknungsanlagen ist zu organisieren.
- Verwertung Brandware: Versuchen, die vom Brand betroffene Trocknungsware zu verwerten (z. B. in Biogasanlage).

Postvention

Im Rahmen der Betreiberpflichten ist die Gefährdungsbeurteilung nach einem Ereignis (Brand) zu aktualisieren, da sich durch das Ereignis Brand die Gefährdung realisiert hat und neue Erkenntnisse vorliegen. Durch Ermittlung der Ursache des Brandes und methodischer Beurteilung der begünstigenden Bedingungen für einen Brand, muss dann die Neubewertung der Wirksamkeit, der aktuell vorhandenen und entsprechend zukünftig festzulegenden Maßnahmen erfolgen. Ferner müssen Schwachstellen in der Schadenbewältigung hinterfragt und im Rahmen der zukünftigen Notfallplanung weiterentwickelt werden.

8 Pränormative Schutzstufen von Trocknungsanlagen

Anhand der in *Kapitel 4* aufgeführten Rechtsvorschriften bestehen sowohl für den Hersteller als auch für den Betreiber Sicherheitsanforderungen an Trocknungsanlagen.

Derzeit verfügbare Vorschriften oder Regelwerke weisen keine konkreten Schutzmaßnahmen für den rechtskonformen und sicheren Betrieb von Trocknungsanlagen auf.

Ziel ist ein risikobasiertes Brandsicherheitskonzept für Trocknungsanlagen auf Grundlage der in dieser Ausarbeitung gewonnenen Erkenntnisse durch Eingruppierung in Schutzstufen und Festlegung risikoadaptierter Schutzmaßnahmen, um den Stand der Technik zu definieren.

Da die TRGS800 [TRGS800,2010] nicht beinhaltet, wie die Anforderungen umgesetzt werden können, ist die Entwicklung einer Methodik zum Schließen dieser Handlungslücke erforderlich.

Die Beurteilung der Brandgefährdung erfolgt in Anlehnung an die TRGS800 [TRGS800,2010].

Anhand der Analyse von Brandschäden und der Brandversuche im Labormaßstab lassen sich Faktoren der Brandgefährdung einer Trocknungsanlage wie folgt ableiten:

Die Höhe der Brandgefährdung ist bei Trocknungsanlagen vorwiegend abhängig von den

- physikalisch-chemischen Eigenschaften und sicherheitstechnischen Kenngrößen (z. B. Zündtemperatur, Eintragsfeuchtigkeit, Fließverhalten im Trockner) und der üblichen Produktcharakteristik (z. B. Staubanfall im Zuge der Trocknung), sowie von der
- Art der Beheizung und Luftführung auf Grund der Möglichkeit des Zündquelleneintrages.

Definition der Brandgefährdung und Zuordnung der Brandgefährdungsklassen (BGK):

- Normale Brandgefährdung liegt vor, wenn auf Grund der Beheizungsart der Eintrag äußerer Zündquellen in das Trocknungsgut nicht zu erwarten ist und das Trocknungsgut eine im Verhältnis zur Trocknungstemperatur normale Entzündungscharakteristik aufweist.

→ BGK A

- Erhöhte Brandgefährdung liegt vor, wenn auf Grund direkter Beheizung der Eintrag äußerer Zündquellen in das Trocknungsgut erfolgen kann oder das Trocknungsgut eine im Verhältnis zur Trocknungstemperatur erhöhte Entzündungscharakteristik aufweist.
→ BGK B
- Hohe Brandgefährdung liegt vor, wenn auf Grund direkter Beheizung samt Wärmerückgewinnung der Eintrag von Zündquellen über die Zuluft zu erwarten ist.
→ BGK C

In Anlehnung an die Methodik der Einstufung des zu trocknenden Stoffes in Schutzklassen (SKT) und den daraus zu ergreifenden Schutzmaßnahmen des jeweiligen Trocknungsverfahrens [ESCIS6,2001], erfolgt die Schutzstufenzuordnung für das betrachtete System der Getreidetrockner.

Systematik der Brandgefährdungsklassifizierung:

Die Ermittlung der Brandgefährdungsklasse erfolgt analog der Entscheidungssystematik aus Kapitel 5 (Bild 5.8).

Der Entscheidungsduktus ist bei unterschiedlichen Beheizungsarten und unterschiedlichen Trocknungsgütern iterativ zu durchlaufen. Bei der Auswahl der zugehörigen Schutzstufen ist die höchste ermittelte Brandgefährdungsklasse zugrunde zu legen.

Brandgefährdungsklassifizierung:

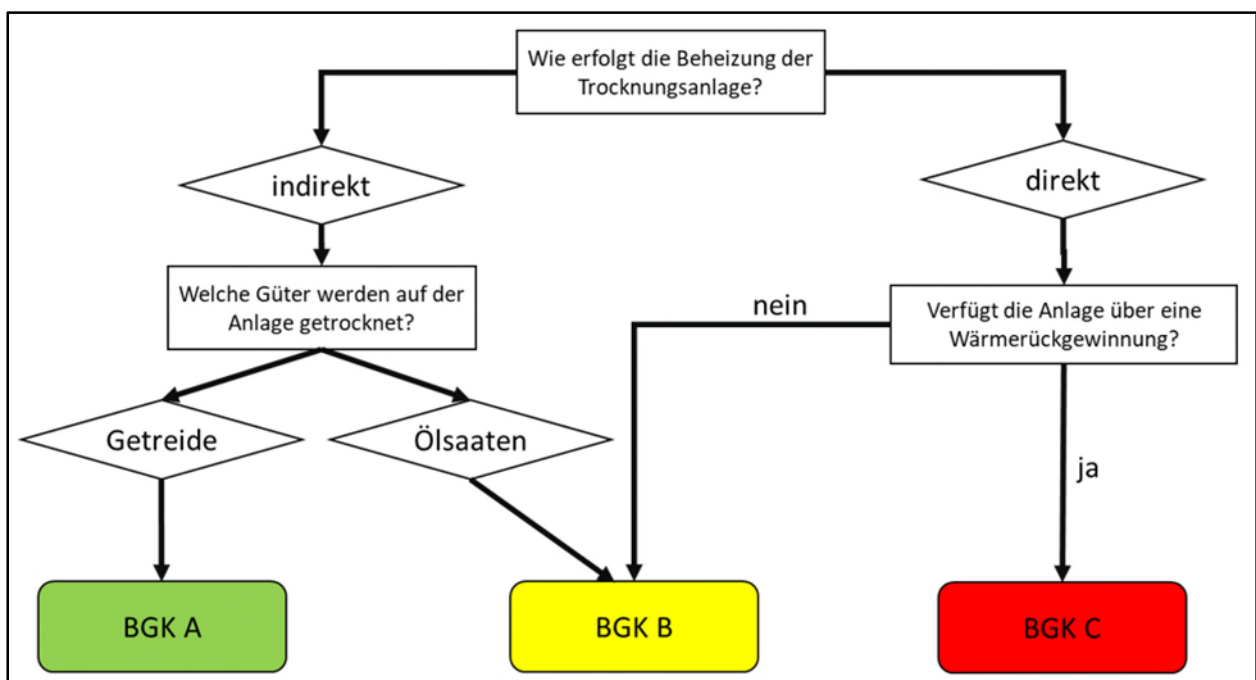


Bild 8.1: Entscheidungssystematik Brandgefährdungsklassifizierung

Den Brandgefährdungsklassen werden entsprechende Schutzstufen zugeordnet:

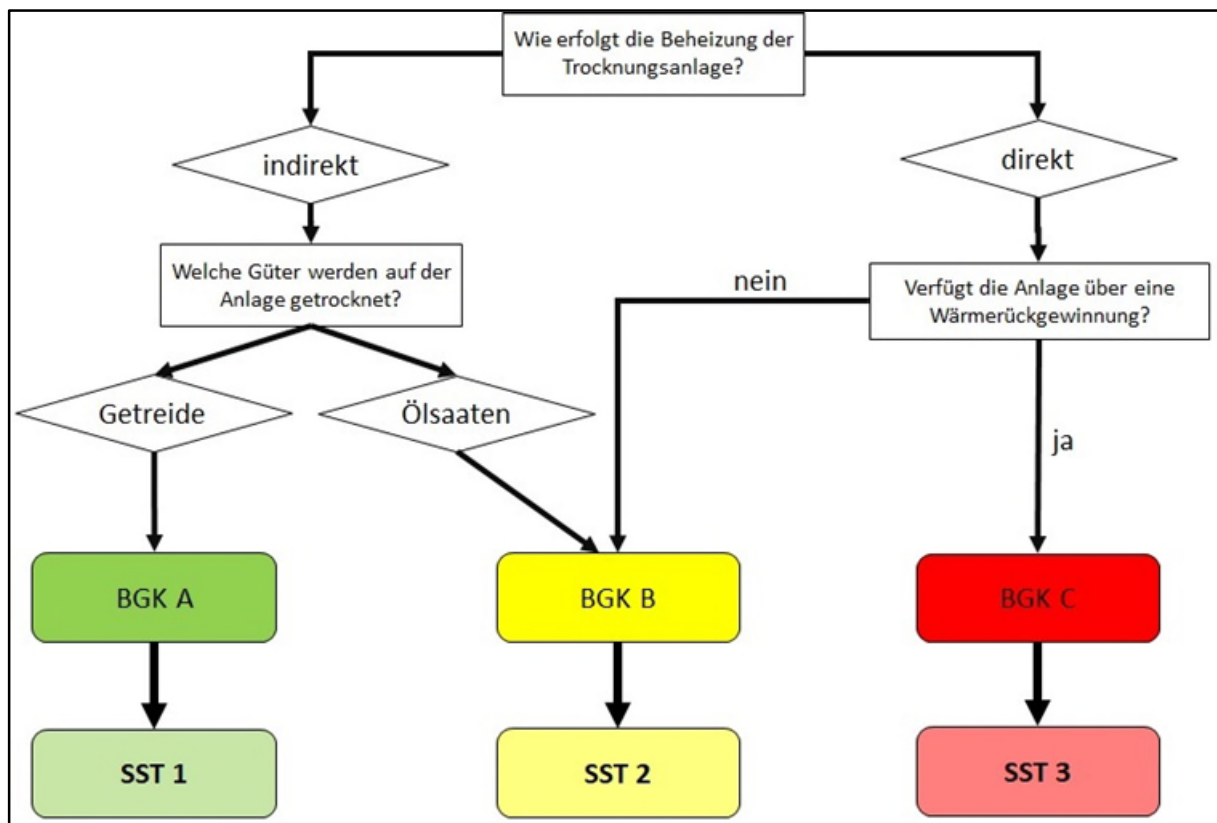


Bild 8.2: Zuordnung Brandgefährdungsklasse zu Schutzstufe

Grundanforderungen (in Anlehnung an DIN3379 [DIN3379,1975]):

- Flammüberwachung der Brenner
- Zweipunkt-Temperaturregler und Sicherheitstemperaturbegrenzer
- Beaufsichtigter Betrieb
- Einhaltung der in der Gebrauchsanleitung herstellerseitig zulässigen Trocknungshöchsttemperaturen und Hinweise
- Notfallplan gem. *Kapitel 7*

Definition der Schutzstufen Trocknungsanlage (SST):

SST 1: Zusätzlich zu den Grundanforderungen sind bauliche Schutzeinrichtungen vorhanden, die die Einhaltung der Betreiberpflichten unterstützen.

SST 2: Zusätzlich zu den Maßnahmen der Schutzstufe 1 sind Schutzeinrichtungen vorhanden, die eine Brandentstehung verhindern und im Falle eines Brandes die Auswirkungen hinsichtlich des Sachschadens und der Betriebsunterbrechung sowie eine Ausbreitung des Ereignisses abmildern.

SST 3: Zusätzlich zu den Maßnahmen der Schutzstufe 1 und 2 sind Schutzeinrichtungen vorhanden, die dennoch entstehende Brände zu einem Zeitpunkt detektieren, an dem die Einleitung von kurativen Maßnahmen möglich ist.

Tabelle 8: Schutzstufenkriterien von Trocknungsanlagen

Schutzstufe	Kriterien
SST 1 (zusätzlich zu Grundanforderungen)	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturfühler in Abluftstrom - Mittels Aufstiegshilfen und Podesten (in Abhängigkeit der Trocknergröße); Ziel: Einfache Erreichbarkeit der Kaskaden und der Luftführungskanäle - Bis zu 10 Temperaturfühler an Abluftkaskaden
SST 2 (zusätzlich zu SST 1)	<ul style="list-style-type: none"> - Funkenfänger in Zuluft und / oder Staubfangmatten vor der Frischluftansaugung - Aufstellungsort der Trocknungsanlage außerhalb eines Gebäudes, Abstand 5 m zu nichtbrennbaren / 20 m zu brennbaren Gebäudeteilen - Vorreinigung des Trocknungsgutes - halbstationäre Löscheinrichtung zur Speisung durch die Feuerwehr - Notaustrag im Brandfall in ungefährdeten Bereich - Bis zu 20 Temperaturfühler an Abluftkaskaden - Funken- / Glimmnestdetektion im Austrag
SST 3 (zusätzlich zu SST 1+2)	<ul style="list-style-type: none"> - Flächendeckende Temperaturüberwachung an den Abluftkaskaden oder Brandgasdetektion in der Abluft

Zusammenfassend können anhand der ermittelten Brandgefährdungsklasse die Schutzmaßnahmen der zugehörigen Schutzstufen an Getreidetrocknungsanlagen wie folgt visualisiert werden:

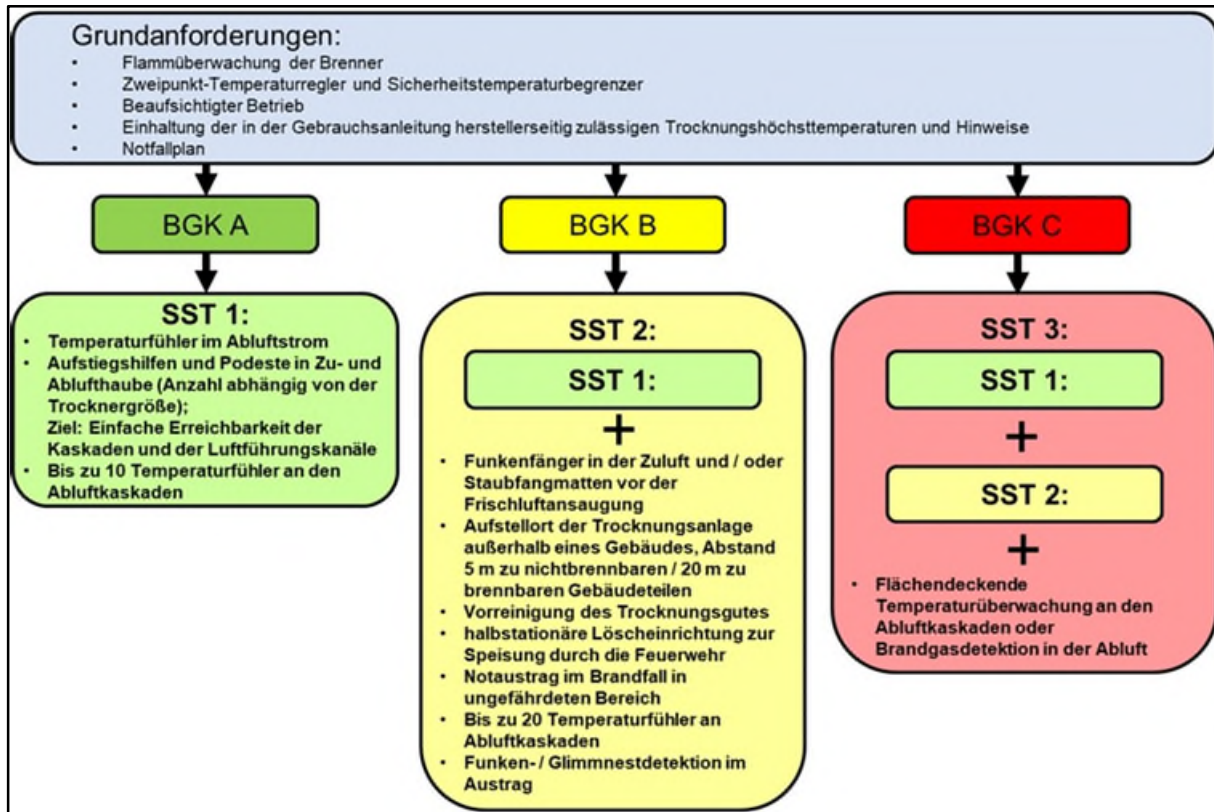


Bild 8.3: Visualisierung Maßnahmen additiv zu Schutzstufenerhöhung

Im Anhang F wird der Duktus der Zuordnung der Brandgefährdungsklassen zu den Schutzstufen sowie die Visualisierung der Maßnahmen ergänzend als Handblatt aufgeführt.

9 Ergebnis und Diskussion

Stationäre Getreidetrocknungsanlagen, wie sie in Deutschland vornehmlich zum Einsatz kommen, sind in ihrer Bauform und Funktionsweise oftmals vergleichbar.

Die aufgeführten Schadenfälle belegen, dass diese Trocknungsanlagen regelmäßig von Brandschäden betroffen sind.

Durch Auswertung von Schadenfällen (*Anhang A*) wurde ersichtlich, dass

1. insbesondere Anlagen während der Maistrocknung von Brandschäden betroffen sind und dass
2. es sich um Anlagen handelt, bei denen auf Grund der erforderlichen hohen Warmlufttemperatur eine direkte Luftherhitzung gegeben ist.
3. Insbesondere sind hierbei Anlagen von Schäden betroffen, die zusätzlich eine Wärmerückgewinnung aufweisen.
4. Branderkennungseinrichtungen waren in einer Vielzahl von Anlagen nicht vorhanden und
5. Brandbekämpfungsmaßnahmen wiesen ohne technische Hilfsmittel keine Schadenminderung dahingehend auf, dass eine zeitnahe Reparatur der Anlage möglich war.

Zur Verifikation literaturgenannter und ermittelter Schadenursachen der analysierten Schadenfälle wurde die Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung erforderlich, da bestehende Prüfverfahren zur Ermittlung der Selbstentzündungstemperatur nicht die Probe durchströmen. Mit der neuen Versuchseinrichtung konnte zum Entzündungsverhalten durchströmter Schüttungen nachgewiesen werden (*Anhang B*), dass

6. eine Selbstentzündung in Abhängigkeit einer längeren Verweilzeit und überhöhten Trocknungstemperaturen möglich ist und dass
7. auf Grund der Durchströmung nach der Entzündung eine schnelle Reaktion bei sehr hohen Temperaturen abläuft.
8. Eine „ungewollte“ verlängerte Verweilzeit des Trocknungsgutes kann durch inhomogenen Produktfluss auf Grund von z. B. Kernfluss, Fremdguteintrag oder ungünstiger Geometrie der Kaskaden eintreten (*Kapitel 3.3*).

Ferner wurde mittels Installation von Funkenerkennungselementen im Realbetrieb einer Trocknungsanlage der Nachweis erbracht (*Anhang C*), dass

9. bei direkter Luftherhitzung Funken / glimmende Partikel über die Zuluft bis zur Trocknungssäule gelangen.

10. Diese glimmenden Partikel eine Zündenergie aufweisen können, die zwar keine unmittelbare Zündung ganzkörniger feuchter Trocknungsgüter, aber die Entzündung von z. B. abgelagerten Staubanhaftungen als Initialzündung erwarten lassen. Die Schadenanalyse (*Anhang A*) zeigt ferner auf, dass Explosionsereignisse an Trocknungsanlagen nicht eingetreten sind und anhand der konventionellen Beurteilungssystematik eine Entzündung explosionsfähiger Gemische nicht zu erwarten ist. Unbemerkte Glimmnester können jedoch nach dem Austrag aus der Trocknungsanlage eine Zündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären in nachgeschalteten Anlagenteilen auslösen (*Kapitel 3.3*).

Die Analyse der rechtlichen Anforderungen (*Kapitel 4*) zeigt auf, dass für Hersteller / Inverkehrbringer und Betreiber sicherheitstechnische Anforderungen gegeben sind, diese jedoch in der praktischen Umsetzung nicht durchgängig anzutreffen sind. Die herstellerseitigen Hinweise zum Betrieb der Anlage stehen zum Teil im Widerspruch zum wirtschaftlichen und praktikablen Betrieb einer Trocknungsanlage.

Ferner weisen die für Trocknungsanlagen geltenden Regelwerke keinen Detaillierungsgrad zur Umsetzung der rechtlichen Anforderungen auf.

Die inzwischen zurückgezogene deutsche normative sicherheitstechnische Anforderung an Trocknungsanlagen erfüllte nicht mehr den Stand der Technik. Das Regelwerk der National Fire Protection Association weist einen wesentlich höheren Detaillierungsgrad auf und ließe sich auf hiesige Trocknungsanlagen auch anwenden.

Im Ergebnis zeigte die Analyse der Brandgefährdungsprozesse auf, dass konzeptionelle Defizite an Trocknungsanlagen vorliegen und die Synthese eines Brandsicherheitskonzeptes erforderlich ist.

Am System der Trocknungsanlage wurde anhand der analysierten Schadenfälle dargelegt, dass nicht ausschließlich eine Ursache für sich brandauslösend, sondern das Zusammenwirken mehrerer begünstigender Bedingungen in Betracht gezogen werden muss (*Kapitel 5*). Anhand des entwickelten Ansatzes der Beurteilungsmatrix interagierender Entzündungsfaktoren lässt sich methodisch ermitteln, welche begünstigenden Bedingungen einen Brand entstehen lassen können, um erforderliche Schutzmaßnahmen (*Kapitel 6*) abzuleiten [BRUE,2019].

Diese sind:

- **Bauliche Brandschutzmaßnahmen**
 - Aufstellort: Neuanlagen sollten auf dem Betriebsgelände außerhalb von Gebäuden und dort errichtet werden, wo im Brandfall eine Brandausbreitung auf benachbarte Gebäude und Einrichtungen auszuschließen ist. Ferner ist eine Aufstellung so zu wählen, dass im Bereich der Frischluftansaugung nicht mit einer Staub- / Schmutzansammlung zu rechnen ist.
 - Laufstege in der Zu- und Abluft: Um arbeitsschutzrechtlichen und herstellerseitigen Anforderungen während des Betriebes der Anlage gerecht zu werden, sind zur einfachen Zugänglichkeit der Anlage für das Betriebspersonal (und im Brandfall für die Feuerwehr) sichere Ein- und Aufstiegsmöglichkeiten an und innerhalb der Trocknungsanlage sowohl in der Zu- als auch in der Ablufthaube, vorzusehen.
- **Technische Brandschutzmaßnahmen**
 - Reinigung des Trockengutes: Zur Vermeidung eines inhomogenen Produktflusses in der Trocknungssäule durch Störstoffe (z. B. Halme oder Kolben) und dem Ausscheiden von entzündlichem Besatz (insbesondere Häutchen bei der Maistrocknung) ist das Trocknungsgut einer Vorreinigung zu unterziehen.
 - Staubfangmatten / Funkenfänger im Bereich Zuluft: Sofern, wie zuvor aufgeführt, die Ansaugung staubfreier Umgebungsluft durch den Aufstellort nicht sichergestellt werden kann, sind bauliche Maßnahmen wie Filtermatten oder ein Ansaugkanal aus einem Bereich mit staubfreier Luft indiziert. Um darüber hinaus auch der Gefährdung am Brenner entzündeter Partikel entgegenzuwirken, ist im Zuluftschacht ein Funkenfänger zu installieren.
 - Branderkennungseinrichtung: Sollte es auf Grund des Restrisikos nun doch zu einem Brand in der Anlage kommen, so müssen geeignete Branderkennungseinrichtungen (z. B. eine abluftseitige Temperaturüberwachung jeder Kaskade oder vorzugsweise eine Brandgasdetektion) einen Entstehungsbrand detektieren können.
 - Stationäre Löscheinrichtung: Um der Feuerwehr und ggf. dem Bedienungspersonal eine (weitestgehend gefahrlose) Brandbekämpfung zu ermöglichen, ist eine stationäre Löscheinrichtung vorzusehen. Der rechnerische Nachweis (*Anhang E*) ergab, dass diese mindestens trocken mit einem

Durchmesser von 75 mm und mit einem B-Anschluss für die Feuerwehr auszuführen ist. Im Kopfbereich des Vorratsbehälters sind Düsen zur flächigen Aufbringung des Löschwassers vorzusehen.

- Notaustragseinrichtung: Einhergehend mit der Flutung der Trocknungssäule ist eine Notentleerung einzuleiten. Hierfür ist eine Notaustragseinrichtung vorzusehen.
- Funken- / Glimmnestdetektion: Zur Verhinderung der Verschleppung von Glimmnestern in nachgeschaltete explosionsgefährdete (Lager-) Bereiche ist die Installation einer Funken- / Glimmnestdetektion mit automatischer Abschaltung der Förderwege vorzusehen.
- Organisatorische Brandschutzmaßnahmen
 - Beaufsichtigter Betrieb: Um mittelbare Hinweise auf einen Brand wahrnehmen und auf diese umgehend reagieren zu können, ist die Anlage ausschließlich beaufsichtigt zu betreiben.
 - Einhaltung von Prüf- und Reinigungsintervalle: Die herstellerseitig vorgegebene Wartungs-, Kontroll- und Reinigungsintervalle sind mindestens einzuhalten. Auf Grund örtlicher Gegebenheiten sind diese ggf. anzupassen. Sollte beispielsweise keine Vorreinigung des Trocknungsgutes erfolgen, so ist davon auszugehen, dass die Kontroll- und Reinigungsintervalle wesentlich kürzer zu fassen sind und dadurch der Trocknungsprozess häufiger unterbrochen werden muss.
 - Unterweisung der Mitarbeiter: Bediener der Anlage sind über mögliche Gefahren und das Verhalten im Brandfall zu unterweisen. Sie müssen ausreichend Kenntnis hinsichtlich der Bedienung der Anlage und der Funktion / Inbetriebnahme von vorhandenen Schutzeinrichtungen besitzen.

Bei der ganzheitlichen Betrachtung des Brandsicherheitskonzeptes sind auf Grund eines verbleibenden Restrisikos neben Schutzmaßnahmen auch Aspekte der Notfallfallplanung (*Kapitel 7*) vorzusehen, die sowohl präventive und als auch kurative Maßnahmen im Vorwege eines Brandes beinhalten sollen.

Zur Umsetzung des risikobasierten Brandsicherheitskonzeptes werden Trocknungsanlagen mittels eines neu entwickelten Duktus pränormativ in Abhängigkeit der Beheizung

und des Trocknungsgutes in drei Brandgefährdungsklassen (BGK A bis BGK C) eingeteilt. Den Brandgefährdungsklassen werden entsprechende Schutzstufen (SST) zugeordnet (*Kapitel 8*). Bei unterschiedlichen Beheizungsarten und Trocknungsgütern ist der Duktus iterativ zu durchlaufen. Bei der Auswahl der zugehörigen Schutzstufen ist die höchste ermittelte Brandgefährdungsklasse zugrunde zu legen.

Dabei werden folgende Grundanforderungen an alle Trocknungsanlagen gestellt:

- Flammüberwachung der Brenner
- Zweipunkt-Temperaturregler und Sicherheitstemperaturbegrenzer
- Beaufsichtigter Betrieb
- Einhaltung der in der Gebrauchsanleitung herstellerseitig zulässigen Trocknungshöchsttemperaturen und Hinweise
- Notfallplan

Diskussion:

Die Analyse von Brandschäden über mehrere Trocknungskampagnen (*Anhang A*) zeigt Analogien zu möglichen brandkritischen Faktoren (*Kapitel 7*) beim Betrieb von Trocknungsanlagen auf. Mittels einer neu entwickelten gasdichten Versuchsanlage konnte der Nachweis erbracht werden, dass durchströmte Schüttungen sich selbst entzünden können (*Anhang B*). Bedingt durch die fehlende Wiederholungsmöglichkeit des Versuches zur Selbstentzündung durchströmter Schüttungen kann das Ergebnis nur als orientierende Erklärung realer Brandgefährdungsprozesse herangezogen werden.

Allerdings kann der Versuchsablauf mit den Beobachtungen realer Brandereignisse in Übereinstimmung gebracht werden, sodass eine gute Übertragung realer Strömungsverhältnisse auf den Labormaßstab vermutet werden kann.

Somit konnte die mögliche Brandursache der Selbstentzündung an den untersuchten Schäden bestätigt werden. Ferner konnte anhand der neuen Versuchseinrichtung an unterschiedlichen Trocknungsgütern die grundsätzliche Möglichkeit der Branderkennung mittels Brandgasdetektion in einem frühen Stadium des Brandes bestätigt werden (*Anhang D1*). Über den Labormaßstab hinaus wurde im Realversuch die technische Umsetzung erfolgreich erprobt (*Anhang D2 + D3*), sodass auch hier eine Übereinstimmung der realen Verhältnisse mit dem Labormaßstab angenommen werden kann.

Mittels Weiterentwicklung des etablierten Entscheidungs-Abfrageschemas zum Erkennen von Explosionsgefährdungen ist eine Möglichkeit zum systematischen Erkennen von

Entzündungsfaktoren und deren Abhängigkeit zueinander entstanden. Dieses Beurteilungssystem dient dann zur Auswahl risikogerechter Maßnahmen (*Kapitel 5*).

Die Anwendbarkeit wurde am Beispiel der Trocknungsanlagen aufgezeigt, sollte aber für eine allgemeingültige Anwendbarkeit an weiteren (Trocknungs-)Verfahren erprobt werden.

Zusammenfassend erlauben die hier erlangten Erkenntnisse Herstellern und Betreibern von Anlagen zum Trocknen von Cerealien im industriellen Mengenmaßstab eine direkte Anwendbarkeit zur Verringerung der Brandgefährdung unter Einhaltung geltender Rechtsvorschriften.

Ferner haben die Erkenntnisse pränormativen Nutzwert zur Fortschreibung des Standes der Sicherheitstechnik und stellen eine Grundlage zur Ausweitung auf andere Trocknungsverfahren dar.

10 Ausblick

Die Trocknung von erntefrischem Getreide ist zur Herstellung der Lagerfähigkeit auch zukünftig unabdingbar.

Auf Grund der zunehmenden Schlagkraft der Erntemaschinen und der steigenden Effizienz in der Flächennutzung (Ertrag / Hektar) ist perspektivisch mit größeren Trocknungserfordernissen in kürzerer Zeit zu rechnen.

Zukünftig ist mit der fortwährenden Energiekostensteigerung eine Zentralisierung der Trocknungskapazitäten auf immer weniger, dafür aber größere und effizientere Anlagen zu erwarten.

Durch diese Tendenz ist vorhersehbar, dass bei Ausfall einer Anlage größere Mengen an Trocknungsgut auf andere Anlagen verteilt werden müssen.

Da Erntezeitpunkte regional zusammenfallen, ist davon auszugehen, dass in der näheren Umgebung gelegene Trocknungsanlagen ausgelastet sind und somit der Transport in weiter entfernt gelegene Anlagen erforderlich wird.

Aus Sicht des Sachwertschutzes ist somit zu erwarten, dass die Schadenhöhe eines einzelnen Brandschadens samt einhergehender Betriebsunterbrechung (bedingt durch steigende Werte der Einzelanlage, steigende Rohstoffpreise und Mehrkosten durch den Transport) zukünftig ebenso steigen wird.

Die Schadenerfahrungen zeigen, dass Brände an Trocknungsanlagen üblicherweise auf die Trocknungsanlage selbst begrenzt sind und ohne direkte Personengefährdung einhergehen. Daher könnte argumentiert werden, dass das Risiko des Sach- und Betriebsunterbrechungsschadens über eine Versicherungspolice ausreichend abgesichert ist und somit additive Maßnahmen zum Schutz von Trocknungsanlagen nicht erforderlich sind. Dieser Argumentation liegt jedoch keine ganzheitliche Betrachtungsweise zugrunde. Brandschäden schränken den regulären Betriebsablauf ein und beeinflussen die Wertschöpfungskette und Verfügbarkeit eines Betriebes dahingehend negativ, dass Lieferverträge nicht termingerecht (oder nur unter erhöhtem Aufwand) erfüllt werden können und es in der Folge zum Verlust von Kundenverbindungen oder gegebenenfalls zu einem Imageverlust kommen kann.

Im Zuge der turnusmäßigen Prolongation von Versicherungsverträgen wird ferner der Schadenverlauf in der Prämienfindung einer Police berücksichtigt. Auch eine Umdeckung des Versicherungsschutzes, z. B. auf Grund des Sonderkündigungsrechtes nach einem Schadenfall, könnte erforderlich werden.

Sofern Gebäude oder Betriebseinrichtungen finanziert sind, so ist ein ausreichender Versicherungsschutz häufig Grundlage eines Kreditvertrages.

Die Bauform und das Wirkprinzip von Trocknungsanlagen im deutschsprachigen Raum ist über Jahrzehnte nahezu unverändert geblieben. Alternative Trocknungsverfahren bzw. die Weiterentwicklung von Trocknungsprozessen könnten neben energetischen Aspekten auch positive Einflüsse hinsichtlich der Materialeigenschaften und des Brandrisikos mit sich bringen.

Da eine Änderung der Bauform von Trocknungsanlagen, die eine geringere Brandgefährdung erwarten lassen, nicht absehbar ist, ist perspektivisch eine Risikominderung ohne Umsetzung der aufgeführten Maßnahmen nicht in Sicht.

Es wäre erstrebenswert, wenn in Deutschland eine Norm geschaffen würde, die ein risikobasiertes Brandsicherheitskonzept an Getreidetrocknungsanlagen zum Inhalt hat. Hierdurch wird dem Betreiber ermöglicht, eine Anlage zu erwerben, die im Einklang mit geltendem Recht und betriebswirtschaftlichen Interessen betrieben werden kann.

Ausgehend von dem Entscheidungsduktus zur Festlegung von Brandgefährdungsklassen könnte aufbauend auf diese Ausarbeitung evaluiert werden, ob der Duktus auf andere Trocknungsverfahren übertragbar ist (z. B. auf Bandtrockner in der Holzindustrie oder Drehrohröfen bei der Grastrocknung), um auch hier ein risikobasiertes Brandsicherheitskonzept zu generieren.

Weitere wissenschaftliche Grundsatzarbeit könnte geleistet werden, wenn Prüfmethode durchströmter Güter hinsichtlich ihres Entzündungs- und Abbrandverhaltens normativ beschrieben werden, um sicherheitstechnische Kennwerte für realitätsnahe Bedingungen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [ARBSG,2015] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 07.08.1996 zuletzt geändert 22.12.2020
- [ASR2.2,2018] Technische Regeln für Arbeitsstätten, Maßnahmen gegen Brände, ASR A2.2, Mai 2018
- [BABRAU,2014] BABRAUSKAS, Vytenis, 2014; Ignition Handbook, Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science, ISBN 0-9728111-3-3
- [BACH,2012] BACHHIESL, Christian, 2012; Zwischen Indizienparadigma und Pseudowissenschaft, LIT Verlag, Münster, ISBN: 978-643-50412-8
- [BARTH,2022a] Persönliche Mitteilung zur Gastvorlesung der Lehrveranstaltung „Betriebssicherheit Überwachungsbedürftiger Anlagen“, Ursula AICH“ am Lehrstuhl „Methoden der Sicherheitstechnik (Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth)“, Bergische Universität Wuppertal
- [BARTH,2022b] Persönliche Mitteilung zur Zielsetzung und Entstehung des Merkblattes „Spurenerhaltung bei der Brandbekämpfung zur Brand- und Explosionsursachenermittlung“; Referat 2 der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes vfdb e.V., Entwurf Stand 02.2022
- [BARTH,2022c] Persönliche Mitteilung zum Erklärungsmodell für das Entstehen von Arbeitsunfällen, Vorlesung Methodologie und Methoden der Sicherheitstechnik
- [BAUA,2006] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und gewerbliche Berufsgenossenschaften: Ausbildungsunterlagen zur Fachkraft für Arbeitssicherheit, 2006

- [BECHEM,2020] BECHEM, Jonathan, 2020; Charakterisierung und Zündwirksamkeit von inerten heißen Partikeln für Staubschichten in verfahrenstechnischen Anlagen, Dissertation in der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal
- [BETRSV,2017] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV) vom 03.02.2015, zuletzt geändert 30.04.2019
- [BGN,1999] Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, R+V Allgemeine Versicherung AG, ca. 1999, Anforderungen an CO-Detektionssysteme für Sprühtürme
- [BGRCI,2014] Sicherheitstechnische Kenngrößen – Ermitteln und bewerten. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Merkblatt R 003 (BGI 747), Reihe Anlagensicherheit, Ausgabe 2/2014
- [BHKG,2015] Gesetz über den Brandschutz, die Hilfeleistung und den Katastrophenschutz (BHKG), 17.12.2015
- [BMJ,2008] Bundesministerium der Justiz (BMJ); Handbuch der Rechtsförmlichkeiten vom 22.08.2008, 3. Auflage ISSN: 0720-6100, abgerufen am 06.02.2022
- [BROECK,1996] BROECKMANN, B., ALFERT, F., ROGERS, R. L., 1996; Fire and explosionprotection in dryers / Brand- und Explosionsschutz in Trocknungsanlagen; Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft, ISSN 0949-8036, Springer-Verlag, Band/Heft: 56, 10; pp 383-387
- [BRUE,2019] BRUENING, Torge, 2019; Brandgefährlich: Sicherheit beim Umgang mit Getreidetrocknern; <https://fire-and-explosion.com/de/blog/2019/04/20/brandgefaehrlich-sicherheit-beim-umgang-mit-getreidetrocknern/>
- [CICHA,2004] CICHA, Jörg, 2004; Die Ermittlung von Brandursachen, Robert Boorberg Verlag GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-415-06482-9 3. Auflage

- [COMPES,1974] COMPES, P.C., 1974; Forschungsbericht Nr. 111, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Literaturexpertise über theoretische Grundlagen des Arbeitsschutzes.
- [CUSTER,1997] CUSTER, Richard L. P., MEACHAM, Brian J., 1997; Introduction to performance-based fire safety, Society of Fire Protection Engineers, ISBN: 0-87765-421-2, First Printing
- [CZICH,2000] CZICHOS, Horst, 2000; HÜTTE, Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 31. Auflage
- [DGUV,2019] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG, Erläuterung zum Regelwerk, <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/regeln-und-vorschriften/erlaeuterungen-zum-regelwerk/index.jsp>
- [DIN3379,1975] DIN 3379, 1975; zwischenzeitlich zurückgezogen; Gasverbrauchseinrichtungen; Körnertrockner
- [DIN51006,2005] DIN 51006, 2005; Thermische Analyse (TA) – Thermogravimetrie (TG) – Grundlagen
- [DIN19353,2016] DIN EN ISO 19353, Juli 2016; Sicherheit von Maschinen – Vorbeugender und abwehrender Brandschutz (ISO 19353:2015); Deutsche Fassung EN ISO 19353:2016
- [DIN19353,2019] DIN EN ISO 19353, Juli 2019; Sicherheit von Maschinen – Vorbeugender und abwehrender Brandschutz (ISO 19353:2019); Deutsche Fassung EN ISO 19353:2019
- [DRYS,2011] DRYSDALE, Dougal, 2011; An introduction to fire dynamics, ISBN 978-0-470-31903-1 third edition,
- [DVGW,2008] DVGW-Arbeitsblatt-W 405, 2008; Bereitstellung von Löschwasser durch die öffentliche Trinkwasserversorgung

- [ERGUN,2006] ERGUN, E., SENEAL, J. A., 2006; Prevention of dryer fires: Problem analysis and application of results, Powder handling & processing, ISSN: 0934-7348, Vogel Transtech Publ., Band/Heft: 18/3, pp 162-166
- [ESCIS1,1998] Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie der Schweiz, ESCIS, 1998, Schriftenreihe Sicherheit, Sicherheitstests für Chemikalien, Heft 1, Basel
- [ESCIS6,2001] Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie der Schweiz, ESCIS, 2001; Schriftenreihe Sicherheit, Trocknen von Feststoffen, Heft 6, 2. vollständig überarbeitete Auflage, Basel
- [FESTAG,2014] FESTAG, Sebastian, LEKSIN, Alexey, BARTH, Uli, 2014; Unfallursachenanalyse, XXIX. Sicherheitswissenschaftliches Symposium der GfS; Unfallanalyse zwischen Tatsächlichkeit des Schadens und Wahrscheinlichkeit der Ursache
- [FRANKE,1989] FRANKE, Albrecht, 1989; Spontaneous ignition - an often underestimated ignition source – examples from practice / Selbstentzündung – eine oftmals unterschätzte Zündquelle – Beispiele aus der Praxis, Brandschutz, Explosionsschutz: aus Forschung und Praxis, ISSN: 0138-5844, Staatsverl. d. DDR, Band/Heft 18, pp 126-134
- [FSA,2010] FSA e.V., Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 2010; Abschlussbericht Brandfrüherkennung bei der Getreidetrocknung durch CO-Detektion F-05-0803
- [GARCIA,2012] GARCIA-TORRENT, J., RAMIREZ-GOMEZ, A., QUEROL-ARAGON, E., GRIMA-OLMEDO, C., MEDIC-PEJIC, L., 2012; Determination of the risk of self-ignition of coals and biomass materials, Journal of hazardous materials, ISSN: 0304-3894, Elsevier, Heft: 213-214; pp 230-235

- [GEFSTV,2017] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV), Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die zuletzt durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist
- [GESTIS] GESTIS-Stoffdatenbank, GESTIS Staub-EX Datenbank Brenn- und Explosionskenngößen von Stäuben, www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank
- [GOTTS,1973] GOTTSCHALK, F., THIELE, Bruno, 1973; Literaturexpertise über theoretische Grundlagen des Arbeitsschutzes, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund, Forschungsbericht 111
- [HAUERT,2018] HAUERT, Frank, RADANDT, Siegfried, 2018; Brand- und Explosionsschutz in Mühle, Mischfutterwerk und Landhandel, AgriMedia GmbH, ISBN 978-3-86263-113-1, 2. Auflage
- [HURLEY,2016] HURLEY, Morgan J., 2016, SPFE Handbook of Fire Protection Engineering, ISBN 978-1-4939-2564-3, Fifth Edition
- [KARLS,1999] KARLSSON, Björn, QUINTIERE, James G., 1999; Enclosure Fire Dynamics, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-1300-7
- [KELLETER,2014] KELLETER, Jörg, GTE Industrieelektronik GmbH, 2014; nicht öffentlicher Versuchsbericht Brandgasdetektion
- [LEHDER,2007] LEHDER, Günter, SKIBA, Reinald, 2007; Taschenbuch Betriebliche Sicherheitstechnik, 5. Auflage, Erich Schmidt Verlag, ISBN: 3503100806
- [LEKSIN/
BARTH,2015] LEKSIN, Alexey, BARTH, Uli, 2015; Ab-/Brandverhalten von Stäuben im Fließbett: Modifikation der Brennprüfung nach VDI 2263 Blatt 1, Info-Brief Nr. 40, ProcessNet Fachgemeinschaft Anlagen- und Prozesssicherheit, S.10f.
- [LISTEC,2001] LISTEC® GmbH, 2001; Temperatur Sensor System List

- [LOTT,2012] LOTTERMANN, Johannes Wilhelm, 2012; Ansätze zur integrierten Brand- und Explosionssicherheit – Entwicklung, Validierung und normative Verankerung einer bilateralen, kohärenten Beurteilungssystematik am Beispiel staubführender Anlagen, Pro BUSINESS GmbH, ISBN 978-3-86386-313-5, 1. Auflage
- [MBO,2019] MUSTERBAUORDNUNG (MBO), Stand 2002 zuletzt geändert 27.09.2019
- [MDB] „Bedienungsanleitung Stela für MDB-XN 2/8-SU“, ohne Datum
- [MUEHL,2009] MÜHLBAUER, Werner, 2009; Handbuch der Getreidetrocknung, Grundlagen und Verfahren, AgriMedia GmbH, ISBN 978-3-86037-981-3, 1. Auflage
- [MUJUM,2015] MUJUMDAR, Arun S., 2015; Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition, CRC Press, ISBN 978-1-4665-9665-8
- [NACHTW,2005] NACHTWEH, Hans Joachim, 2005; nicht öffentliches Gutachten zur Ermittlung der Brandursache von Schadenr.: 510-40-05104039-9
- [NEUERO] NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH, ohne Datum; „Bedienungsanweisung Neuero für NDT 11-1“
- [NEUERO,2016] NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH, 2016; Schematischer Aufbau NDT
- [NFPA61,2020] NFPA 61, 2013; Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities, current edition 2020
- [PRODSG,2020] Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz - ProdSG), 08.11.2011, zuletzt geändert 19.05.2020
- [PRODSV,2011] Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. ProdSV), 12.05.1993, zuletzt geändert 08.11.2011

- [PTB,2014] Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 2014; Die gesetzlichen Einheiten in Deutschland
- [R+V,2005] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2005; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 510-40-05104039-9
- [R+V,2007a] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2007; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 440-40-07410042-1
- [R+V,2007b] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2007; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 410-40-07430124-8
- [R+V,2008] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2008; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 100-40-08170014-1
- [R+V,2009a] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2009; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 405-40-09190020-0
- [R+V,2009b] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2009; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 630-40-09765019-7
- [R+V,2010a] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2010; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 405-40-10410016-0
- [R+V,2010b] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2010; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.:406-40-10330007-1
- [R+V,2010c] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2010; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 100-40-10230014-9
- [R+V,2010d] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2010; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.: 710-40-10514017-0
- [R+V,2011] R+V Allgemeine Versicherung AG, 2011; nicht öffentliche Schadenakte Schadennr.:100-40-11500025-0

- [RAMIR,2009] RAMIREZ, Alvaro, GARCIA-TORRENT, Javier, AGUADOC, Pedro J., 2009; Determination of parameters used to prevent ignition of stored materials and to protect against explosions in food industries, Journal of hazardous materials, ISSN 0304-3894, Elsevier Heft: 168, 1; pp 115-120
- [RAMIR,2010] RAMIREZ, Alvaro, GARCIA-TORRENT, Javier, TASCÓN, Alberto, 2010; Experimental determination of self-heating and self-ignition risks associated with the dusts of agricultural materials commonly stored in silos, Journal of hazardous materials, ISSN 0304-3894, Elsevier Heft: 175, 1-3; pp 920-927
- [RL42EG,2006] Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)
- [ROMBER,2006] ROMBERGER Maschinenfabrik GmbH, 2006; Trocknungsanlage ECO-Star, „Luftwege innerhalb des Trockners“
- [SCAAR,2016] SCAAR, Holger, WEIGLER, Fabian, FRANKE, Georg, MELLMANN, Jochen, 2016; Untersuchung der Trocknungsluftströmung an einer neu entwickelten Geometrie für Dächerschachttrockner; LANDTECHNIK 71(3)
- [SCHMI,2007] SCHMIDT-SEEGER AG, 2007; Eichstaetter Str. 49, 92339 Beilngries
- [SEIDEL,2001] SEIDEL, Wolfgang, 2001; Werkstofftechnik, Verlag: Hanser, 5. Auflage 2001
- [SIHK] Südwestfälische Industrie- und Handelskammer zu Westfalen Handlungshilfe betriebliche Notfallplanung, ohne Datum
- [SKIBA,2000] SKIBA, Reinald, 2000; Taschenbuch Arbeitssicherheit, Erich Schmidt Verlag, 10. Auflage, ISBN: 3503057471

- [STEINB,2012] STEINBACH, Klaus, PUCHNER, Ulrich, REDMER, Thomas, VAN BEBBER, Peter, KRÖNKE, Klaus, FIEDLER, Heinz, 2012; Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung, Verlag VdS, 1. Auflage, ISBN: 978-3-936050-15-8
- [STELA,1992] STELA GmbH, 1992; „Technische Beschreibung – Betriebsanleitung – Stela Durchlauftrockner Saug-System“
- [STELA,2006] STELA Laxhuber GmbH, 2006; Handbuch stationärer Durch-/Umlauftrockner für Körnerfrüchte;
- [STELA,2018] STELA Laxhuber GmbH, 2018; Stationäre Trocknungsanlage AgroDry;
- [TGA,2017] Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl Chemische Sicherheit und Abwehrender Brandschutz, Labor der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, 2017; Versuchsergebnisse Thermogravimetrische Analyse von Mais
- [THIENE,2010] THIENEL, Karl-Christian, Herbsttrimester 2010, Werkstoffe I: Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe - Stahl und NE-Metalle -; Institut für Werkstoffe des Bauwesens; Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen; Universität der Bundeswehr München
- [TRGS400,2017] Technische Regeln für Gefahrstoffe; TRGS 400; Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, Ausgabe Juli 2017
- [TRGS720,2020] Technische Regeln für Gefahrstoffe - TRGS 720, Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines, Ausgabe Juli 2020
- [TRGS800,2010] Technische Regeln für Gefahrstoffe; TRGS 800; Brandschutzmaßnahmen, Ausgabe 2010

- [VDI2263,2022] VDI-Richtlinie 2263 Blatt 1, Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren - Beurteilung – Schutzmaßnahmen, Sicherheitstechnische Kenngrößen von Schüttgütern, Düsseldorf, Febr. 2022 sowie Vorgängerversion von 1990
- [VDS2234,2012] VdS 2234, 2012; Brand- und Komplextrennwände, Merkblatt für die Anordnung und Ausführung
- [VDS3821,2018] VdS 3821, 2018; Business Continuity Management – Hinweise für Unternehmen,
- [VDS4001,2021] VdS CEA 4001, 2021; VdS CEA-Richtlinie für Sprinkleranlagen, Planung und Einbau
- [VFDB41,2020] ZEHFUß, Jochen, 2020; Technischer Bericht vfdb TB 04-01, Leitfaden Ingenieurmethoden im Brandschutz, 4., überarbeitete und ergänzte Auflage März 2020
- [WEIGLE,2014] WEIGLER, Fabian, FRANKE, Georg, SCAAR, Holger, MELLMANN, Jochen, 2014; Experimente zum Partikelfluss an einer neu entwickelten Geometrie für Dächerschachttrockner; LAND-TECHNIK 69(1)
- [WEINS,2004] WEINSCHENK, Günter, R+V Allgemeine Versicherung AG, 2004; nicht öffentliche Aktennotiz Trocknerlöschversuch BayWa Kastl, Oberpfalz
- [YONG,2014] YONGZHANG, Cui, YUNXIA, Qu, MINGTIAN, Tang, PENG, Gao, GUOKAI, Zhang, 2014; Hot air ignition characteristics of cotton and corn straw pellet based on TG-DTG, Applied Mechanics and Materials ISSN: 1662-7482, Vols. 672-674, pp 164-167
- [ZHAO,2008a] ZHAO, Wei, LI, Zhengqi, WANG, Dawei, ZHU, Qunyi, SUN, Rui, MENG, Baihong, ZHAO, Guangbo, 2008; Combustion characteristics of different parts of corn straw and NO formation in a fixed bed, Bio-resource technology, ISSN: 0960-8524, Elsevier Applied Science Band/Heft: 99, 8; pp 2956-2963

- [ZHAO,2008b] ZHAO, Wei, LI, Zhengqi, ZHU, ZHAO, ZHANG, Fangshi, ZHU, Qunyi, 2008; Effect of air preheating and fuel moisture on combustion characteristics of corn straw in a fixed bed, Energy conversion and management, ISSN: 0196-8904, Pergamon Press Band/Heft: 49, 12; pp 3560-3565

Bildverzeichnis

- Bild 1.1: Fließschema der Arbeitsschritte und Herangehensweise
- Bild 3.1: Schematische Darstellung einer Trocknungsanlage mit Wärmerückgewinnung [NEUERO,2016]
- Bild 3.2: Luftwege innerhalb des Trockners [ROMBER,2006]
- Bild 3.3: Partikelströmungsprofil gefärbter Weizenkörner in der herkömmlichen Apparategeometrie [WEIGLE,2014]
- Bild 3.4: Ablagerungen in gereinigter Trocknungsanlage (eigene Aufnahme)
- Bild 3.5: Ablagerungen in gereinigter Trocknungsanlage (eigene Aufnahme)
- Bild 3.6: Druckverteilung im Schachttrockner [SCAAR,2016]
- Bild 3.7: Schematische Darstellung mit Wärmerückgewinnung [STELA,2018]
- Bild 3.8: Rost im Bereich des Flächenbrenners (eigene Aufnahme)
- Bild 3.9: Ansaugbereich des Brenners während der Trocknung, Steinfeld, 04.12.2014 (eigene Aufnahme)
- Bild 3.10: Ablagerungen im Ansaugbereich (eigene Aufnahme)
- Bild 3.11: Außenansicht Brenner, Wielen, 30.10.2017 (eigene Aufnahme)
- Bild 3.12: Teilabdeckung eines Kreuzbrenners mittels Prallblech, Wielen, 30.10.2017 (eigene Aufnahme)
- Bild 3.13: Ablagerungen im Wärmerückführungskanal, Oldenburg (eigene Aufnahme)
- Bild 3.14: Ablagerungen im Wärmerückführungskanal, Wielen (eigene Aufnahme)
- Bild 3.15: Ungesicherter Aufstieg zum Einblick in die Kaskaden, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)

- Bild 3.16: Aufstiegsmöglichkeit abluftseitig, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild 3.17: Festigkeitsabnahme durch Korrosion [SEIDEL,2001]
- Bild 3.18: Warmzugfestigkeit eines S235 [THIENE,2010]
- Bild 4.1: Rangfolge von Rechtsverbindlichkeiten in Anlehnung an [BARTH,2022a]
- Bild 4.2: „Arbeitsbühnen“ in Trocknerabluft (eigene Aufnahme)
- Bild 4.3: Zutrittsöffnung in Zuluftschacht (ca. 40 cm x 70 cm) (eigene Aufnahme)
- Bild 4.4: Fehlende Aufstiegshilfen im Zuluftschacht (eigene Aufnahme)
- Bild 4.5: Silos mit Trocknungsanlage, USA Michigan, Okt. 2013 (eigene Aufnahme)
- Bild 5.1: Gefährdungsmodell nach dem Kausalnexus (Gefährdung) und Finalnexus (Schädigung) nach Compes 1974 [COMPES,1974], [FESTAG,2014]
- Bild 5.2: Ungewissheit retrospektiver Analysen [FESTAG,2014]
- Bild 5.3: einfach – kompliziert – komplex [FESTAG,2014]
- Bild 5.4: Modell BAUA zu begünstigender Bedingung [BARTH,2022c]
- Bild 5.5: Einfluss mehrerer begünstigender Bedingungen
- Bild 5.6: Ursache – Wirkung – Folge – Modell (angelehnt an die Darstellung des ISHI-KAWA- bzw. Fischgräten-Diagramm) zur Erfassung möglicher Schadenursachen und deren begünstigenden Bedingungen in Anlehnung an [BARTH,2022b]
- Bild 5.7: Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm angewendet auf Schadenursachen und deren begünstigende Bedingungen an Trocknungsanlagen
- Bild 5.8: Auszug Duktus Explosionsgefährdungen [TRGS720,2020]

- Bild 5.9: Ursache – Wirkung – Folge – Diagramm zur Veranschaulichung der interagierenden Entzündungsfaktoren am Beispiel des inhomogenen Produktflusses
- Bild 6.1: Rangfolge Auswahl von Maßnahmen
- Bild 6.2: Ansaugbereich während der Trocknung, Steinfeld, 04.12.2014 (eigene Aufnahme)
- Bild 6.3: Zu vermeidende Ablagerungen (eigene Aufnahme)
- Bild 6.4: Beispiel externe Aufstiegsleiter (eigene Aufnahme)
- Bild 6.5: Beispiel Aufstiegsleiter mit Gitterroste (eigene Aufnahme)
- Bild 6.6: Anfall von Spelzen (eigene Aufnahme)
- Bild 6.7: Im Zuluftschacht installierter Funkenfänger (eigene Aufnahme)
- Bild 6.8: Temperatur-Messstellen Kaskade Abluftseite [LISTEC,2001]
- Bild 6.9: Detailaufnahme Temperatur-Messstelle [LISTEC,2001]
- Bild 6.10: Anschlussbox [LISTEC,2001]
- Bild 6.11: Alarm- und Voralarmbereiche [LISTEC,2001]
- Bild 6.12: Visualisierung [LISTEC,2001]
- Bild 6.13: Temperatur-Liste [LISTEC,2001]
- Bild 6.14: Graphische Darstellung Temperaturverlauf [LISTEC,2001]
- Bild 6.15: Schematischer Aufbau eines Trockners und potentielle Installationspunkte für CO-Detektion [SCHMI,2007]
- Bild 6.16: Beispielbild B-Anschluss, Stela-Trockner mit Löschanlage, Nov. 2006 Loiching (eigene Aufnahme)
- Bild 6.17: Löschwasserverteilung/-einbringung in Trocknungssäule, Stela-Trockner mit Löschanlage, Nov. 2006 Loiching (eigene Aufnahme)

- Bild 6.18: Löschwasserverteilung vor Einbau in Trocknerkopf (eigene Aufnahme)
- Bild 6.19: Notaustragseinrichtung (eigene Aufnahme)
- Bild 6.20: Im Abförderaggregat installierte Funken-/Glimmnestdetektion (eigene Aufnahme)
- Bild 6.21: Restgetreide während der Maistrocknung (eigene Aufnahme)
- Bild 6.22: Brückenbildung in „leerem“ Trockner (eigene Aufnahme)
- Bild 7.1: Beispielillustration des Schadenverlaufes mit und ohne BCM [VDS3821,2018]
- Bild 8.1: Entscheidungssystematik Brandgefährdungsklassifizierung
- Bild 8.2: Zuordnung Brandgefährdungsklasse zu Schutzstufe
- Bild 8.3: Visualisierung Maßnahmen additiv zu Schutzstufenerhöhung
- Bild A.1: Schematischer Aufbau des vom Schaden betr. Trockners; Fa. Goldsaat, Fritz Döring Maschinenfabrik, Remscheid [NACHTW,2005]
- Bild A.2: Außenansicht vom Brand betroffener Trockner [NACHTW,2005]
- Bild A.3: Zerstörter Bereich zwischen Kühlzone (unten) und Wärmezone (oben) [NACHTW,2005]
- Bild A.4: Brandbeaufschlagung an den Ableitblechen sowie Rapskörner außerhalb Trocknungssäule [NACHTW,2005]
- Bild A.5: Außenansicht vom Schaden betroffener Trockner, Neubrandenburg (eigene Aufnahme)
- Bild A.6: Sicherheitsthermostat vom Schaden betroffener Trockner, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.7: Ablufttemperaturmessung vom Schaden betroffener Trockner, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)

- Bild A.8: Maisaustrittsstelle vom Schaden betroffener Trockner, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.9: Stelle der ersten Raucherkenntnis des vom Schaden betroffenen Trockners, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.10: Thermische Schäden an der Außenhaut am vom Schaden betroffener Trockner, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.11: Blick auf 1. und 2. Trocknungssäule des vom Schaden betroffenen Trockners, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.12: Blick auf 3. und 4. Trocknungssäule des vom Schaden betroffenen Trockners, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.13: Blick in ausgebrannte Kaskaden I, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.14: Blick in ausgebrannte Kaskaden II, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.15: Verbrannter Mais, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild A.16: Ausgetragener Mais aus der vom Schaden betroffenen Anlage, Neubrandenburg 2007 (eigene Aufnahme)
- Bild B.1: Versuchseinrichtung [FSA,2010]
- Bild B.2: Wärmeschrank und Abluftleitungen [FSA,2010]
- Bild B.3: Nassabscheider [FSA,2010]
- Bild B.4: Messstellen der Versuchseinrichtung [FSA,2010]
- Bild B.5: Messgasaufbereitung [FSA,2010]
- Bild B.6: Messtechnik und Datenverarbeitung [FSA,2010]
- Bild B.7: Überblick Messschrieb [FSA,2010]

- Bild B.8: Messpositionen [FSA,2010]
- Bild B.9: Messschrieb von 15:10 h – 15:45 h [FSA,2010]
- Bild B.10: Messschrieb von 14:40 – 17:00 h [FSA,2010]
- Bild B.11: Versuchseinrichtung nach dem Versuch [FSA,2010]
- Bild B.12: Versuchseinrichtung nach dem Versuch [FSA,2010]
- Bild B.13: Aschereste nach dem Versuch [FSA,2010]
- Bild B.14: Grafische Darstellung der Brandausbreitung bei Ansprechen der Temperaturfühler
- Bild B.15: Abgleich der ermittelten Werte zur radialen Brandausbreitung
- Bild B.16: Darstellung zeitlicher Verlauf HRR zu umgesetzter Brandlast ohne N₂-Eintrag
- Bild C.1: Schematischer Aufbau der Trocknungsanlage mit Funkenerkennung
- Bild D.1: Versuchsbehälter [FSA,2010]
- Bild D.2: Im Wärmeschrank eingebauter Versuchsbehälter [FSA,2010]
- Bild D.3: Temperaturverlauf bei dem Versuch mit Mais im Wärmeschrank [FSA,2010]
- Bild D.4: Temperaturverlauf bei der neuen Versuchsanlage (Innenbehälter) mit CO-Messung [FSA,2010]
- Bild D.5: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter – Spülluft 8 l/min [FSA,2010]
- Bild D.6: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]
- Bild D.7: Kontrollversuch: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]
- Bild D.8: CO-Messung mit Magermilch im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

- Bild D.9: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]
- Bild D.10: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 235 °C) [FSA,2010]
- Bild D.11: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 245 °C) [FSA,2010]
- Bild D.12: Rapsprobe nach dem Versuch mit 245°C [FSA,2010]
- Bild D.13: CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]
- Bild D.14: Kontrollversuch: CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]
- Bild D.15: Trockner [FSA,2010]
- Bild D.16: Trockner mit Zuluftkanal und Abluftrohr [FSA,2010]
- Bild D.17: Entnahme des Messgases [FSA,2010]
- Bild D.18: Messgaskühler [FSA,2010]
- Bild D.19: Messgerät [FSA,2010]
- Bild D.20: Daten des Versuches mit Raps [FSA,2010]
- Bild D.21: CO-Eingabe [FSA,2010]
- Bild D.22: Referenzluftabsaugung an der Entlastungsklappe [FSA,2010]
- Bild D.23: Eingabe von Nebel in die Brennkammer [FSA,2010]
- Bild D.24: Austritt von Nebelschwaden [FSA,2010]
- Bild D.25: Schema des Trockners [FSA,2010]
- Bild D.26: Trocknergebäude mit einer Ansaugstelle für Zuluft [FSA,2010]

- Bild D.27: Trocknergebäude mit Zugangsebenen [FSA,2010]
- Bild D.28: Messgasentnahmestelle [FSA,2010]
- Bild D.29: Aufstellungsort Messgaskühler [FSA,2010]
- Bild D.30: Messgerät [FSA,2010]
- Bild D.31: Daten des Versuches mit Mais [FSA,2010]
- Bild D.32: Auszug aus dem Datenlogger [FSA,2010]
- Bild D.33: Schematischer Aufbau Prototyp [KELLETT,2014]
- Bild D.34: Ansicht Prototyp [KELLETT,2014]
- Bild D.35: Position der Sensorbox am Abluft-Ventilator des „neuen“ Trockners [KELLETT,2014]
- Bild D.36: Position der Sensorbox am Abluft-Ventilator des „alten“ Trockners [KELLETT,2014]
- Bild D.37: Ansicht/ Schematischer Aufbau Box mit Schutzgitter und Ventilator [KELLETT,2014]
- Bild D.38: Einbringung des Brandrauches in den „neuen“ Trockner in die Nebenstrom-Öffnung der Abluft-Seite [KELLETT,2014]
- Bild D.39: Einbringung des Brandrauches in den „alten“ Trockner mit Hilfe von Undichtigkeiten in der Wandverkleidung [KELLETT,2014]
- Bild D.40: Datenaufnahme [KELLETT,2014]
- Bild D.41: Signale der Sensoren am 28. 10. 2014 der Sensorbox am „neuen“ Trockner [KELLETT,2014]
- Bild D.42: Signale der Sensoren zwischen 21. 10. 2014 und 28. 10. 2014 der Sensorbox am „neuen“ Trockner [KELLETT,2014]

- Bild D.43: Signale der Sensoren am 28. 10. 2014 der Sensorbox am „alten“ Trockner [KELLETT,2014]
- Bild D.44: Signale der Sensoren zwischen 21.10.2014 und 28.10.2014 der Sensorbox am „alten“ Trockner [KELLETT,2014]
- Bild D.45: Messschrieb Vorversuche fraktionierte Maisbestandteile [TGA,2017]
- Bild D.46: synchronisierter Messschrieb Versuche Maisproben [TGA,2017]
- Bild E.1: Blick auf Kaskaden [WEINS,2004]
- Bild E.2: Befüllrohranschluss [WEINS,2004]
- Bild E.3: Löschwassereintrag [WEINS,2004]
- Bild E.4: Trocknungsgut- und Löschwasseraustrag [WEINS,2004]
- Bild E.5: Trocknungsgutabfuhr in Mulde [WEINS,2004]
- Bild E.6: Schematische Anordnung der Sprinklerköpfe in der Trocknersäule
- Bild F.1: Handblatt Entscheidungssystematik Brandgefährdungsklasse mit Zuordnung zu Schutzstufe
- Bild F.2: Handblatt Visualisierung Maßnahmen additiv zu Schutzstufenerhöhung

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Trocknungs- und Korntemperaturen; [STELA,2006], [R+V,2005]
- Tabelle 2: Reservierte Schadensummen (in EURO) ausgewählter Trocknerschäden
- Tabelle 3: Detaillierte Abschätzung der möglichen Ex-Gefährdungen und Zündquellen
- Tabelle 4: Wartungsintervalle [MDB]
- Tabelle 5: Wartungsintervalle [NEUERO]
- Tabelle 6: Beispiel Interaktion von 2 Faktoren
- Tabelle 7: Anwendung Beurteilungssystematik Trocknungsanlage
- Tabelle 8: Schutzstufenkriterien von Trocknungsanlagen
- Tabelle B.1: Ereignisübersicht Brandausbreitung Versuch
- Tabelle B.2: Heizwerte von Trocknungsgütern; Juli 2007, www.blt.bml-fuw.gv.at/vero/veroeff/0661_Energiekorn_Deckungsbeitragsvergleich.pdf
- Tabelle D.1: Verwendete Messgeräte [FSA,2010]
- Tabelle D.2: Messgaslaufzeiten Rapstrockner [FSA,2010]
- Tabelle D.3: Messgaslaufzeiten Maistrockner [FSA,2010]
- Tabelle D.4: Messablauf [KELLETT,2014]
- Tabelle D.5: Zusammenfassung Situation am Tag der Testbrände 28. 10. [KELLETT,2014]
- Tabelle D.6: Maisgries [TGA,2017]
- Tabelle D.7: Maisgries Referenz [TGA,2017]
- Tabelle D.8: Mais ATR Landhandel Feinanteil hellgries [TGA,2017]

- Tabelle D.9: Mais ATR Landhandel Feinanteil hellgries Referenz [TGA,2017]
- Tabelle D.10: Mais ATR Landhandel Grobanteil Schalen [TGA,2017]
- Tabelle D.11: Mais ATR Landhandel Grobanteil Schalen Referenz [TGA,2017]
- Tabelle E.1: Übersicht der $HRR_{max} (\dot{Q}_{max})$ und $HRR_A (\dot{Q}_A)$
- Tabelle E.2: Beispiel Löschwasserbedarf in Bezug zur Trocknergeometrie
- Tabelle E.3: Anzahl Sprinklerköpfe und Gesamtlöschwasserbedarf
- Tabelle E.4: Löschwasserversorgung nach DVGW Arbeitsblatt W 405 [DVGW,2008]

Anhänge

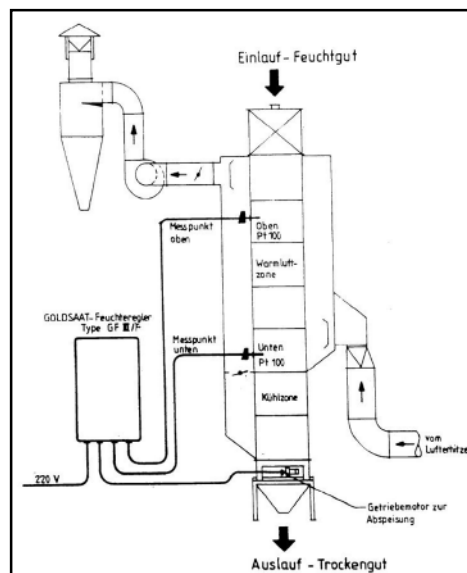
Anhang A – Untersuchung Brandereignisse	130
Anhang B – Selbstentzündung durchströmter Schüttungen	152
B.1 Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung.....	154
B.2 Diskussion der Ergebnisse.....	163
B.3 Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Wärmefreisetzungsrate	164
Anhang C – Nachweis des Eintrages von Zündinitialen über die Zuluft	171
Anhang D – Entwicklung alternativer Branderkennungsmöglichkeiten.....	174
D.1: Brandfrüherkennung bei der Getreidetrocknung durch CO-Detektion	174
D.2: Versuche über eine CO-Belastung beim Betrieb bestehender Durchlauf Trockner für Getreide	188
D.3: Versuchsbetrieb: Brandgas-Detektionssystem während der Maistrocknung	206
D.4: Bestimmung von differierenden Emissionsraten von Mais.....	216
Anhang E – Dimensionierung Löscheinrichtung Trocknungsanlage.....	222
E.1: Flutungsversuch einer Trocknungssäule.....	223
E.2: Brandlastbestimmung und Wärmefreisetzungsrate.....	226
E.3: Wärmekapazität von Löschwasser:.....	228
E.4: Dimensionierung der Löschwasserbeaufschlagung.....	229
E.5: Validierung der Dimensionierung der Lösch-(Hilfs)-Einrichtung auf Grundlage der örtlichen Brandbekämpfungsmöglichkeiten.....	231
E.6: Fazit	233
Anhang F – Duktus Brandgefährdungsklassen und Schutzstufen.....	234

Anhang A – Untersuchung Brandereignisse

Nachfolgend werden Brandereignisse an Trocknungsanlagen vorgestellt, die über mehrere Trocknungskampagnen hinweg begutachtet und systematisch analysiert wurden. Ziel der detaillierten Betrachtung ist das Erkennen von Analogien der jeweiligen Brandereignisse zueinander sowie zu möglichen Brandgefährdungsprozessen.

W., 2005 [R+V,2005]

Der Schaden entstand an einer Vakuum-Außentrocknungsanlage des Herstellers Goldsaat, Baujahr 1988. Der installierte Warmluftzeuger mit Ölbrenner hatte eine Nennleistung von 1.512 KW.



*Bild A.1: Schematischer Aufbau des vom Schaden betroffenen Trockners
[NACHTW,2005]*

Der Kessel mit dem Heizregister war in einem Heizraum aufgestellt, von dem aus die Warmluft über einen Gebläsekanal dem Trockenturm zugeführt wurde.

Das zu trocknende Gut – in diesem Fall Raps – wurde über einen Vorbehälter im oberen Teil des Trockenturmes eingegeben, von wo aus dieses automatisch über sogenannte Warmluftabteile nach unten in den Kühlbereich lief.

Dort wurde es über einen Sammeltrichter wieder entnommen, um von hieraus einem Silo als Endlager zugeführt zu werden.

Die Warmluft gelangte über einen Abluftventilator nach oben und wurde über einen Abluftventilator ins Freie geleitet.

Bei diesem Modell wurde der Trocknungsvorgang durch zwei Temperaturmessgeräte in dem Trockenturm überwacht, die der Steuerung des Ölbrenners zur Warmluftzeugung dienten. Eine Überwachung der Temperatur des Trockengutes war nur manuell möglich, so dass bei ansteigender Temperatur des Trockengutes die Beheizung nicht automatisch ausschaltete. Eine automatische Aufzeichnung der von den Kontrollgeräten gemessenen Temperaturen erfolgte nach Aussagen des Silomeisters seit Jahren nicht mehr.

Ferner würde bei Ausfall des Doppelelevators (dient der Beschickung des Trockners) die Zufuhr des Trockengutes zum Trockner unterbrochen und keine automatische Abschaltung zur Folge haben.

Eine regelmäßige Wartung und Reinigung konnten nachgewiesen werden.

Die Anlage wurde zum Schadenzeitpunkt rund um die Uhr betrieben, wobei bis ca. 23.00 Uhr am 02.08.2005 der Silomeister auf dem Betriebsgelände war und in der Schaltwarte den automatisch arbeitenden Trocknungsvorgang für den eingelagerten Raps durch Kontrollen in der Schaltwarte der Trocknungsanlage überwachte. Die Trocknungstemperatur war auf 60°C eingestellt.

Bis zum Verlassen des Betriebsgeländes wurde keine Störung in dem Trocknungsvorgang festgestellt.

Die Nacht hindurch war noch ein weiterer Mitarbeiter auf dem Betriebsgelände, der jedoch in einiger Entfernung zum Trockner Getreide verladen hat.

Dieser Trockner wurde (wie auch an anderen Standorten des Betreibers üblich) regelmäßig ohne personelle Aufsicht, in sogenannter Geisterschicht gefahren.

Auf dem angrenzenden Silodach waren Funkantennen eines Mobilfunkbetreibers installiert. Eine dieser Antennen meldete eine Störung an den zuständigen Techniker, der daraufhin gegen 02.00 Uhr vor Ort war und Brandgeruch im Siloturm vernommen hat.

Er informierte den Mitarbeiter des Betreibers auf dem Werksgelände, der mit der Verladung des Getreides beschäftigt war. Dieser wiederum informierte den Silomeister und im Anschluss den Betriebsleiter, der seinerseits den Geschäftsführer benachrichtigte. Der Geschäftsführer informierte nach seinem Eintreffen vor Ort die Feuerwehr, da er erkannte, dass mit eigenen Mitteln das Geschehen im Trockenturm nicht unter Kontrolle gebracht werden kann. Die Feuerwehr war gegen 03.00 Uhr vor Ort.

Der Schaden machte sich zunächst durch Verfärbungen und Verformungen an den Außenführungen des Gebläses bemerkbar – ohne dass Feuererscheinungen erkennbar waren.

Die Feuerwehr beendete gegen 05.00 Uhr ihren Löscheinsatz, (vermutlich) ohne detaillierte Kontrolle nach weiteren Brand-, bzw. Glimmnestern sowie ohne Stellung einer Brandsicherheitswache.

Gegen 06.30 Uhr wurde die Feuerwehr erneut gerufen, da es wieder zu brennen begann. Durch den Brandschaden wurde insbesondere an einer Seite der Trockenturm stark in Mitleidenschaft gezogen, während Rapskörner über den Lüftungskanal bis in das Heizsystem heruntergelaufen waren und dieses vollkommen verstopften.

Im Zentrum des Glimmbrandes wurden Abdeck- sowie Leitbleche vollkommen zerstört, was auf Glimmtemperaturen von über 1400 °C deutete.

Infolge des Temperaturanstieges in dem Abluftsystem wurden Schäden am Abluftventilator festgestellt.

Der Sachverständige zur Ursachenermittlung kam zu folgendem Schluss [NACHTW,2005]: „Aufgrund des bei der Branduntersuchung vorgefundenen Spurenbildes konnte der Brandentstehungsort im Eingabebereich der Warmluft in den Trockenturm eingegrenzt werden.

Nach Auswertung aller bei der Branduntersuchung vorgefundenen Spuren war erkennbar, dass sich der Schaden infolge Wärmestaus nicht ordnungsgemäß ablaufender Rapskörner und dadurch ansteigendem Luftdruck entwickelt hatte.

Diese Entwicklung konnte durch einen Stau in den Ableitblechen der Warmluftzone mit ansteigendem Druck der einströmenden Luft ausgelöst worden sein, wodurch Rapskörner in den Warmluftkanal gedrückt und auf der Stellklappe zwischen Kühlzone und Warmluftzone nicht weiter in die Kühlzone abgeleitet wurden.“



Bild A.2: Außenansicht vom Brand betroffener Trockner [NACHTW,2005]



*Bild A.3: Zerstörter Bereich zwischen Kühlzone (unten) und Wärmezone (oben)
[NACHTW,2005]*



Bild A.4: Brandbeaufschlagung an den Ableitblechen sowie Rapskörner außerhalb Trocknungssäule [NACHTW,2005]

N., 2007 [R+V,2007a]

Bei dem vom Brand betroffenen Trockner handelt es sich um einen Vakuum-Trockner der Fa. Stela, Baujahr 1992 mit einer Fassungskapazität von 75 t Mais und einer Trocknungsleistung von 15 t pro h (bei einem Wasserentzug von 15 - 16 %). Der Trockner besteht aus vier Säulen (die nicht einzeln betrieben werden können) mit jeweils sieben übereinanderstehenden Trocknungs- und Kühlelementen. Dacheinbauten dienen der Abstützung der Körnerschüttung sowie der Zu- und Abluftführung der Trocknungs- bzw. Kühlluft. Durch die Anordnung der Dächer wird die Schichtstärke der durchlaufenden Körnerfrüchte annähernd konstant gehalten. Der Produktaustrag wird über Austragswalzen vorgenommen.

Über dem obersten Trocknungselement befinden sich drei Vorratsbehälter.

Die Trocknungsanlage ist in eine Trocknungs- und Kühlzone unterteilt. Die Abluft wird durch vier Radialventilatoren abgesaugt und nach dem Durchströmen der Zentrifugalabscheider waagrecht in die freie Luftströmung eingeleitet. Zuluftseitig befinden sich eine Warmlufthaube sowie eine Kühlluftverteilkammer. Die Heißluftherzeugung erfolgt mittels zweier Gasbrenner mit nachgeschalteten Wärmetauschern, welche an der Warmlufthaube der Anlage angebaut sind. Somit handelte es sich um einen indirekt beheizten Getreidetrockner ohne Wärmerückführung. Ebenfalls in der Warmlufthaube ist ein Sicherheitsthermostat mit Wiedereinschaltsperrung eingebaut. Dieser schaltet bei Übertemperatur

die Gasbrenner und den Austrag aus, die Nachkühlzeit sowie die Hupe und Störlampe ein.



Bild A.5: Vom Schaden betroffener Trockner

Die vorhandene Brandmeldeeinrichtung ist ein Früherkennungssystem gegen Trocknerbrände. Sinn dieser Einrichtung ist es, entstehende Brandherde so frühzeitig lokalisieren und bekämpfen zu können, um Schäden am Trockengut und an Maschinen zu minimieren. Im Bereich der Lufteintritte an den Abluftrohren sind jeweils 5 Thermofühler angebracht, die ständig die Ablufttemperatur messen. Die Messwerte werden mit einem eingeebneten Sollwert verglichen. Wenn eine oder mehrere Messwerte einen höheren Wert erreichen als die maximal zulässige Temperatur wird ein Zeitrelais angesteuert, das Alarm in Form von Hupe und Blinklicht auslöst. Am Schaltschrank ist anhand der digitalen Temperaturanzeige sofort die Messstellenummer ersichtlich, die zur Auslösung des Alarms geführt hat.

Folgende Temperaturgrenzwerte waren zum Schadenzeitpunkt eingestellt:

Zuluft (Warmluft):	100 °C
Trockengut:	80 °C
Abluft:	60 °C

Eine Speicherung oder Aufzeichnung der Temperaturen erfolgte nicht.



Bild A.6: Sicherheitsthermostat



Bild A.7: Ablufttemperaturmessung

Am Brandtag wurde Mais mit einem Eingangsfeuchtegehalt von 35 % getrocknet. Die Trocknungssaison für Mais begann am 03.10.2007 und wurde ununterbrochen bis zum Schadentag durchgeführt. Geplant war das Ende der Maistrocknung Richtung Ende November.

Am Standort in Neubrandenburg wurde auf Grund der Energieausbeute in zwei Stufen der Mais getrocknet. In einem ersten Durchlauf wurde der Mais vorgetrocknet und zu einem späteren Zeitpunkt bis auf den erforderlichen Lagerfeuchtegehalt herunter getrocknet.

Zum Schadenzeitpunkt wurde Mais im ersten Trocknungsdurchgang getrocknet.

Gegen 11.40 Uhr erfolgte der Schichtwechsel, in dessen Zuge auch die Trocknungsanlage in Augenschein genommen wurde.

Dabei fiel auf, dass im Bereich der Kaltluftansaugung Mais aus dem Trockner trat (*Bild A.8*). Bei der folgenden Sichtkontrolle des Trockners bemerkte man eine leichte

Rauchentwicklung an den Kaskaden. Daraufhin wurde gegen 11.54 Uhr die Feuerwehr alarmiert und der Trocknungsprozess gestoppt.

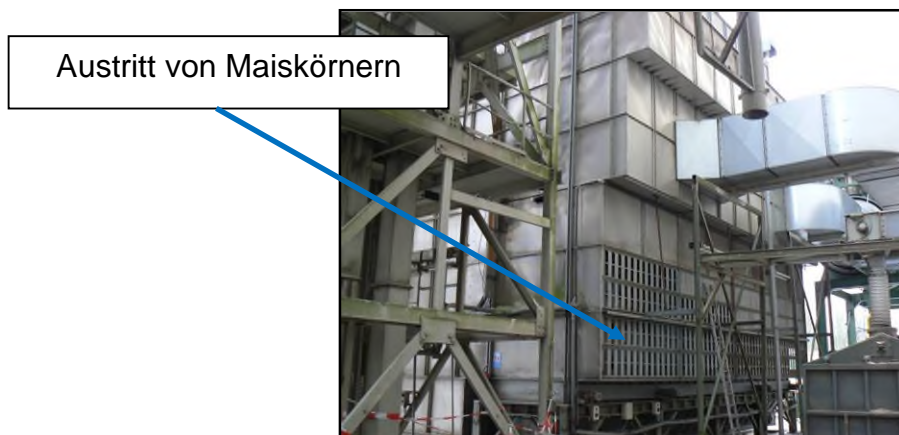


Bild A.8: Maisaustritt aus Trockner

Zu diesem Zeitpunkt hatte keiner der Temperaturfühler den eingestellten Grenzwert überschritten und Alarm ausgelöst.

Es war die größte Sorge des Bedienungspersonals, dass es bereits eine Glimmnestverschleppung über die Förderwege in den Silo gegeben haben könnte. Dies stellte sich zum Glück als nicht eingetreten dar.

Die inzwischen eingetroffene Feuerwehr unternahm erste Löschversuche von außen. Zeitgleich wurde provisorisch mit betriebseigenen Mitarbeitern ein Notaustragsweg des Maises aus dem Trockner geschaffen.

Dies erfolgte über den regulären Trogkettenförderer und Elevator in bereitgestellte LKW über ein zusätzlich installiertes Fallrohr. Die Feuerwehr löschte die ausgetragene Ware ab.

Der Trocknerbrand selbst konnte von der Feuerwehr nur in geringem Umfang bekämpft werden, da die geschlossene Bauweise einen Löschwassereintrag nur an den Stellen zuließ, an denen die Außenhaut aus Aluminium bereits geschmolzen war. Da nicht absehbar war, ob die Statik der Aluminiumkonstruktion angegriffen war, wurde mittels einer Drehleiter die Revisionsklappe im Trocknerkopf geöffnet und Löschwasser von dort aus eingebracht.

Die Löscharbeiten dauerten ca. 9 h an.

Der Getreidetrockner hat durch diesen Brand einen wirtschaftlichen Totalschaden erlitten.



Bild A.9: Stelle der ersten Rauchererkennung



Bild A.10: Thermische Schäden an Außenhaut

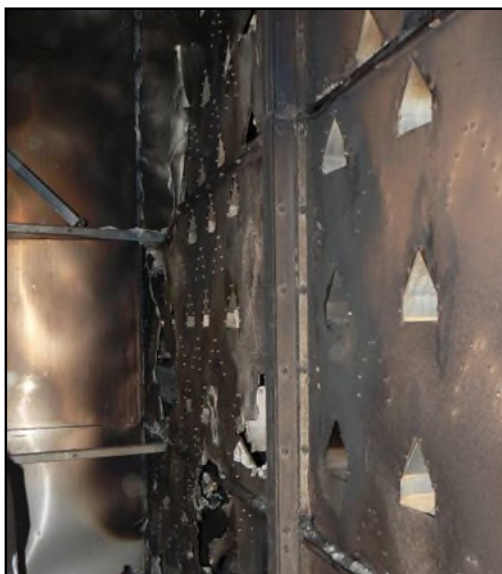


Bild A.11: Blick auf 1. und 2. Trocknungssäule



Bild A.12: Blick auf 3. und 4. Trocknungssäule



Bild A.13: Blick in ausgebrannte Kaskaden I

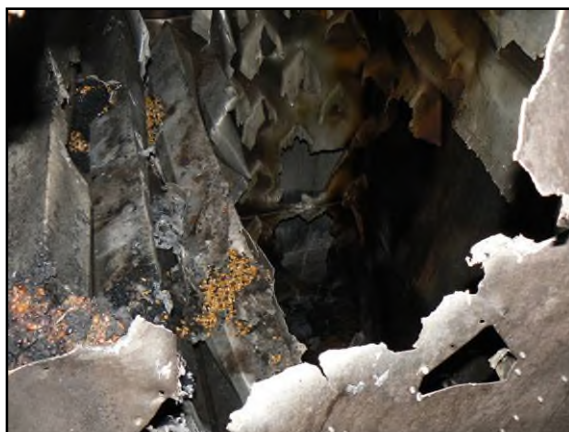


Bild A.14: Blick in ausgebrannte Kaskaden II



Bild A.15: Verbrannter Mais (Durchmesser ca. 10 cm)



Bild A.16: Ausgetragener Mais

Neben dem Trockner selbst sind die abführenden Transportsysteme (Elevator und Trogkettenförderer) durch den Kontakt mit Glimmnestern und Löschwasser zu Schaden gekommen.

Der ausgetragene und abgelöschte Mais wies einen Warenwert von 225,00 €/t auf – konnte jedoch ohne Mehrkosten einer Biogasanlage zugeführt werden. Die noch zu trocknenden ca. 3.000 t Mais wurden von einer anderen Trocknungsanlage getrocknet. Allein die Ein- und Auslager- sowie Transportkosten betragen rund 10 €/t.

Die neue Trocknungssaison begann im Juni/Juli 2008. Bis dahin musste ein neuer Trockner installiert sein, um weitere Betriebsunterbrechungskosten zu vermeiden.

Übersicht weiterer Trocknerschäden:

Die Angaben der folgenden Trocknerschäden resultieren aus Regulierungsunterlagen, Sachverständigengutachten, eigenen Erkenntnissen vor Ort und evtl. weiteren verfügbaren Unterlagen.

D., 2007 [R+V,2007b]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Gas
Wärmehückgewinnung	unbekannt
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	35 %
Schadenhergang	Relativ kurz vor Bemerken des Brandes ist der Mitarbeiter noch zur Temperaturkontrolle der beiden äußerlich angebrachten Thermostate auf dem ersten Boden des Trockners gewesen. Ungewöhnlichkeiten sind keine aufgefallen.
Schadenursache	Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ist vor dem Schadenereignis von einem Maiseintrag mit erhöhtem Feuchtigkeitsgehalt in den Trockner auszugehen. Durch die Reduzierung der Rieselfähigkeit des Maises können punktuelle Klumpenbildungen entstehen. Hierbei wird das Erntegut

gem. Sachverständigen	derart thermisch aufbereitet, dass es zum Aufquellen des Maises kommt. Durch die kontinuierliche Wärmezufuhr kommt es letztendlich zur Entzündung des Gutes.
Branderkennung	starker Rauchaustritt aus dem oberen Gebäudeteil
Hauptschadenbereich	Bereich Steigleiter; Dächer im mittleren Bereich zwischen den beiden Fühlerreihen; Dächer im rechten Bereich partiell
Brand-schutz-einrichtungen	keine

W., 2008 [R+V,2008]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Öl
Wärmerückgewinnung	unbekannt
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	37 %
Schadenhergang / Schadenursache gem. Sachverständigen	Am Tag vor dem Brand wurde die Anlage gereinigt und der Trockner mit Mais beschickt. Am Schadentag kam es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Überhitzung vor der Auslaufzone, sodass die warme Luft überhaupt nicht bis zu dem Kontaktthermometer gelangte. Aufgrund dieser Tatsache wurde eine Meldung von dem Thermometer an den Ölbrenner gegeben, dass nicht genügend Wärme für den Trocknungsvorgang vorhanden war. Daraufhin produzierte der Ölbrenner immer weiter warme Luft, bis es zur Erhitzung der Anbackungen mit anschließendem Brandausbruch kam.

Branderkennung	unbekannt
Hauptschadenbereich	gesamter Trockner oberhalb der Auslaufzone sowie Gebäude
Brand-schutzeinrichtungen	keine

D., 2009 [R+V,2009a]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt beheizt, Gas
Wärmerückgewinnung	ja
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	34 - 35 %
Schadenhergang	Der Brand im Trockner wurde am Schadentag gegen 20.00 Uhr von dem für die Trocknung zuständigen Mitarbeiter bemerkt. Ein Melder zeigte erhöhte Temperatur an und löste Hupenalarm aus. Trotz des Brandes wurde der Trockner von ihm noch geöffnet. Trockengut (Mais) lief aus der Kontrollöffnung, starke Hitzeentwicklung im Trockner wurde festgestellt. Der Mitarbeiter stellte die Gaszufuhr ab und legte die Anlage still. Danach rief der Mitarbeiter die Feuerwehr. Die Wehr löschte den Brand u.a. mit 600 – 700 l Wasser. Der Trockner wurde jedoch nicht geflutet. Nach dem Löscheinsatz wurde die Anlage leergefahren.
Schadenursache	Die Dächereinbauten in den Trocknungselementen der Anlage haben im Laufe der Jahre – auch bedingt durch die Reparaturen von vorheri-

gem. Sachverständigen	gen Brandschäden – Unregelmäßigkeiten erlitten. So war der ordnungsgemäße Fluss des Trockengutes nicht mehr gewährleistet. Hierdurch müssen sich verstärkt Ansammlungen von Mais gebildet haben, die sich dann entzündeten. Einen Nachweis, dass die Ursache ausschließlich in eventuell nicht ordnungsgemäßer Reparatur der Vorschäden zu sehen ist, wird nicht geführt werden können.
Branderkennung	Alarm durch Übertemperatur
Hauptschadenbereich	Durch den Brand wurde der Trockenturm weitgehend zerstört.
Brand-schutz-einrichtungen	erhöhte Anzahl an Temperaturfühlern

O., 2009 [R+V,2009b]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Gas
Wärmehückgewinnung	ja
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	Unbekannt, da im Vorratssilo eine Durchmischung verschiedener Anlieferungen erfolgt.
Schadenhergang	Am Vortag des Schadens wurde die Anlage leer gefahren und morgens gegen 6.00 Uhr wieder in Betrieb genommen. Gegen 7.30 Uhr schaltete die Anlage automatisch ab, woraufhin Bedienungspersonal ins Innere des Trocknungsgebäudes gingen und Brandrauch feststellten.

<p>Schaden- ursache gem. Sach- verständi- gen</p>	<p>Die überwiegenden Spuren und die sich hieraus ergebenden Kenntnisse stehen zwanglos und plausibel mit einer Verursachung des Brandes durch eine Überhitzung des Maises im Trocknungsvorgang im Einklang.</p> <p>Die überwiegenden Feststellungen und die sich hieraus ergebenden Kenntnisse lassen es als unwahrscheinlich erscheinen, dass eine brandrelevante Überschreitung der Temperatur der Heizluft/Trocknungsluft in einem ursächlichen Zusammenhang zum Schaden steht bzw. stand.</p> <p>Als Ursachen für eine bis zur Zündung provozierte Verweildauer des Trockengutes in der Trocknersäule können aufgezeigt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • eine Störung der Anlagengeometrie • eine Klumpenbildung durch erheblichen Feuchtigkeitsgehalt bzw. Feuchtigkeitseintrag • eine sogenannte „Nestbildung“ durch die Aufgabe von Maisstroh, Halmschnitt, Spelzen, Bruchstücke, Spindeln, Verunreinigungen oder Fremdstoffe als „Beimassen“ mit den Maiskörnern auf die Trocknersäule
<p>Brander- kennung</p>	<p>Abschaltung durch Übertemperatur (Grenztemperatur 150 °C)</p>
<p>Haupt- schaden- bereich</p>	<p>Starke Brandzehrung ist sowohl im abluftseitigen Bereich als auch im zuluftseitigen Bereich sichtbar. Auf Grund der Luftführung hatte der Brand auf der Zuluftseite seinen Ursprung und muss sich trichterförmig in Richtung Abluftseite ausgebreitet haben.</p>
<p>Brand- schutzein- richtungen</p>	<p>erhöhte Anzahl an Temperaturfühlern, Gitterroste zur Reinigung der Kaskaden, Löschanlage</p>

L., 2010 [R+V,2010a]

Trocknungsgut	Weizen
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Öl
Wärmehückgewinnung	nein
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	18 - 20 %
Schadenhergang	Am 04.08. wurde die Anlage gegen 09.00 Uhr in Betrieb genommen. Etwa eine halbe Stunde später bemerkte der Trocknerführer, dass der Brenner abschaltete. Ein Trichter der Anlage hatte die Leeranzeige zum Nachfüllen von Trockengut gemeldet. Beim Auffüllen des Trichters stellte der Mitarbeiter fest, dass Weizen aus der Anlage lief. Eine Außenwand war bereits durchgebrannt. Etwa gleichzeitig nahm er Brandgeruch wahr.
Schadensursache gem. Sachverständigen	-
Branderkennung	durch Mitarbeiter, als Außenverkleidung durchgebrannt ist
Hauptschadenbereich	unterer Bereich der Trockenzone, seitlich an der Außenfassade; Kaskadenblech zuluftseitig unbeschädigt, abluftseitig ca. 0,5 m x 0,5 m durchgebrannt
Brand-schutz-einrichtungen	Notaustrag

D., 2010 [R+V,2010b]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Gas
Wärmehückgewinnung	nein
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	40 %
Schadenhergang	Am 24.09. gegen 14.00 Uhr bemerkte der Müller Brandgeruch. Sofort wurde die Feuerwehr alarmiert. Nachdem seit etwa Juli Gerste und Weizen getrocknet wurden, wurde die Trocknung am Morgen des 24.09. auf Mais umgestellt. Es erfolgte eine Kontrolle, aber keine spezielle Reinigung. Die Steuerung der Anlage meldete als Fehler „Störung Trocknung“. Es wurde vom Hersteller festgestellt, dass ein Temperaturfühler angesprochen hatte.
Schadensursache gem. Sachverständigen	Die Trocknung von Getreide wurde bis Ende August durchgeführt. Danach stand die Trocknungsanlage ca. 3 Wochen still, bis der Trockner am Schadentag mit Mais befüllt und in den Trocknungsbetrieb ging. Es muss zwingend davon ausgegangen werden, dass die Trocknungssäule nicht vollständig geleert bzw. entleert war und tatsächlich ein relevantes „Nest“ von Getreide vorgelegen hat.
Branderkennung	Mitarbeiter
Hauptschadenbereich	unterer Bereich der Trockenzone im Übergang zur Kühlzone; Die Kaskaden sind großflächig bis zum Austrag mit augenscheinlich größerer Brandzehrung abluftseitig zerstört.
Brand-schutzeinrichtungen	Notaustrag

W., 2010 [R+V,2010c]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Gas
Wärmrückgewinnung	ja
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	35,2 % - 41,7 %
Schadenhergang	<p>Die Anlage wurde am 20.10.2009 gemäß Abnahmeprotokoll in Betrieb genommen. Die Kampagne 2009 konnte ohne offensichtliche Mängel durchgeführt werden. Es wurde jedoch nur eine Trocknungsleistung von 144 t/d von zugesagten 192 t/d erreicht.</p> <p>Bereits am 21.10.2010 gegen 21.30 Uhr und am 23.10.2010 gegen 12.00 Uhr ereigneten sich Brände in der Trocknungsanlage. Die Brandursachen konnten beide Male nicht ermittelt werden. Es wurden durch die Errichterfirma Teile im Trockner erneuert.</p> <p>Der dritte Brand ereignete sich dann am 26.10.2010 gegen 23.00 Uhr. Dieser Brand hat die eigentliche Trocknereinheit weitgehend zerstört. Die Feuerwehr war von Nachbarn um 23.26 Uhr alarmiert worden. Diese hatten Brandgeruch festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Mühlenwart der Versicherungsnehmerin (VN) den Brand noch nicht erkannt. Die Nachbarn informierten dann aber auch den Mitarbeiter der VN. Dieser konnte die Anlage noch entleeren und den Brand danach mit relativ wenig Wasser löschen.</p> <p>Wie oben beschrieben wurde mit der Anlage in dem Jahr die zweite Maistrocknungs-Kampagne gefahren. Bis zum ersten Brand am 21.10.2010 wurden etwa 350 t Mais getrocknet. Mit der Trocknung wurde am 12.10.2010 begonnen. In der Anlage wurde bisher ausschließlich Mais getrocknet.</p>

Schaden- ursache gem. Sach- verständi- gen	Anhaftungen von Besatz, Mais und Schmutz führten während des fortlaufenden Trocknungsprozesses innerhalb der Trocknungssäule zu der sogenannten Nestbildung. Das Trockengut bzw. das Nest kann die Trocknersäule nicht mehr passieren, „verweilt“, überhitzt sich und trocknet durch bis zur anschließenden Entzündung.
Brander- kennung	Nachbarn
Haupt- schaden- bereich	im Bereich der 5. und 6. Kaskade (von unten gezählt) zuluftseitig ein flächenmäßig kleiner Durchbrandbereich; trichterförmige Ausbreitung im Bereich der Außenwand mit Abschmelzung mehrerer Kaskadendächer und Durchbrand zur Abluftseite, ebenso Zerstörung diverser umgebender Sandwich-Außenwand-Elemente.
Brand- schutzein- richtungen	Notaustrag

O., 2010 [R+V,2010d]

Trock- nungsgut	Mais
Trock- nungsan- lage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt befeuert, Gas
Wärme- rückgewin- nung	ja
Eintrags- feuchtig- keitsgehalt	35 - 45 %, da im Vorratssilo eine Durchmischung verschiedener Anlieferungen erfolgt.
Schaden- hergang	Am 21.10. wurde mit der Trocknungskampagne gestartet. Am Samstag, den 30.10., wurde gegen Mittag die Trocknung gestoppt. Das bis zu diesem Zeitpunkt getrocknete Gut wurde in der Trocknungssäule belassen. Am 31.10. wurde gegen 16 Uhr die Trocknung wiederaufgenommen. Am

	02.11.2010 wurde gegen 09.30 Uhr dem Anlagenbediener auf der Visualisierung eine Erhöhung (über 50 °C) der Korntemperatur (Messfühler KT) angezeigt.
Schaden- ursache gem. Sachver- ständigen	Die überwiegenden Spuren und die sich hieraus ergebenden Kenntnisse stehen zwanglos und plausibel mit einer Verursachung des Brandes durch eine Überhitzung des Maises im Trocknungsvorgang, als Folge einer Verstopfung und hieraus folgend einer Verstopfung der Trocknungssäule durch Klumpenbildung im Einklang. Die als Verklumpungen bzw. als Nester gebildeten Ablagerungen von Maismassen verbleiben „stationär“ in der Anlage und werden nicht mit dem Massenstrom bewegt und ausgetragen. Dies führt zu einer „langzeitigen“ thermischen Aufheizung / Aufbereitung der Masse.
Brander- kennung	Ein Mitarbeiter ging aus der Schaltwarte und konnte Rauch aus der Abluft sehen. Die installierte Brandmeldeeinrichtung des Herstellers hatte nicht ausgelöst.
Haupt- schaden- bereich	Es sind zwei Brandbereiche im Trockner vorhanden: 1. Trocknungssäule: Im Bereich Abluft der Wärmerückführung / Außenwand ist ein Durchbrand der Aluminiumbleche eingetreten. Die innerhalb der Trocknungssäule befindlichen Kaskadendächer sind thermisch beaufschlagt, bzw. geschmolzen oder verbogen. Besonderheit: Im Bereich der Zuluft gibt es keine Brandzehrungen. Die Kaskadendächer sind zuluftseitig nicht beschädigt. 2. Trocknungssäule: Im Bereich zur Trennwand sind im Übergang von der Trocken- zur Kühlzone Abschmelzungen / Brandzehrungen auf einer Fläche von ca. 70 cm x 70 cm zu erkennen. Trichterförmig breiten sich die Abschmelzungen in den Bereich der Abluft aus. Die Kaskadendächer sind größtenteils abgeschmolzen, bzw. thermisch verformt. Abluftseitig erfolgte nur ein geringer Durchbrand. Insbesondere ist hier das Luftumleitblech zur Wärmerückführung durchgeschmolzen.
Brand- schutzein- richtungen	erhöhte Anzahl an Temperaturfühlern, Gitterroste zur Reinigung der Kaskaden, Löschanlage

W., 2011 [R+V,2011]

Trocknungsgut	Mais
Trocknungsanlage	Dächerschachttrockner
Beheizung	direkt beheizt, Gas
Wärmehückgewinnung	ja
Eintragsfeuchtigkeitsgehalt	36,4 %
Schadenhergang	Am 17.10. begann die Maistrocknungskampagne. Am 24.10. kam es zum Brand in der Trocknungsanlage.
Schadensursache gem. Sachverständigen	Am Schadentag kam es zur Entzündung von brennbaren Anhaftungen, Weizen und Besatz (nicht entfernter Weizen konnte in der Stillstandphase des Trockners weiter keimen), bedingt durch die Tatsache, dass eine höhere Trocknungstemperatur vorherrschte.
Branderkennung	Mitarbeiter
Hauptschadenbereich	im Bereich der 6. Trocknungskaskade nach oben fortsetzend mit Durchbrand zur siloabgewandten Seite.
Brand-schutzeinrichtungen	Notaustrag

Anhang B – Selbstentzündung durchströmter Schüttungen

Bei der sicherheitstechnischen Beurteilung von Trocknungsprozessen stellt die Selbstentzündlichkeit des Trocknungsgutes ein wichtiges Kriterium dar.

Unter einer Selbstentzündung wird der Vorgang verstanden, bei dem ein Stoff in Anwesenheit von Luft (Sauerstoff) ohne weitere Zündquelle zur Entzündung kommt. Die exotherme Wärmetönung beruht dabei auf einer Oxidationsreaktion mit der umgebenden Gasatmosphäre. Selbsterhitzungsfähige Stoffe sind Stoffe, die sich nur in großen Mengen (mehrere Kilogramm) und nach einem längeren Zeitraum (Stunden oder Tagen) entzünden. [BGRCI,2014]

Zur Ermittlung der Selbstentzündungstemperatur von Stoffen stehen unterschiedliche Prüfverfahren zur Verfügung, wie z.B. der Grewer-Ofen-Test, die adiabatische Warmlagerung oder Warmlagerung bei konstanter Temperatur.

Diese Prüfverfahren haben gemein, dass die Proben mit Luft umströmt oder zumindest nicht signifikant durchströmt werden.

Dementsprechend muss hinterfragt werden, inwieweit die im Prüfverfahren ermittelte Selbstentzündlichkeit auf Grund der Durchströmung des Produktes beim Betrieb von Däberschachttrocknern auf reale Verhältnisse übertragbar ist.

Nach Babrauskas [BABRAU,2014] ist eine theoretisch besser nachvollziehbare Konfiguration die der konvektiven Erwärmung, bei der ein Strom von heißem Gas mit bekannter Geschwindigkeit und Temperatur gegen eine Probe gerichtet ist. In der Praxis ist es jedoch schwierig, diese Art der Erwärmung zu arrangieren, denn wenn ein Hochtemperatur-Luftstrom auf die Probe geleitet wird, befinden sich in der Nähe wahrscheinlich ebenso heiße strahlende Oberflächen. Eine Erhöhung der Luftstromgeschwindigkeit (für mäßige Strömungsgeschwindigkeiten) erhöht einfach den konvektiven Wärmestrom. Dies führt dazu, dass das Material schneller zu pyrolysieren beginnt und sich schneller entzündet. Letztendlich kommt jedoch ein nicht-thermischer Effekt zum Tragen: Die Verweilzeit wird zu kurz, um die chemischen Reaktionen abzuschließen und dies wird zu einer Grenze für die Zündung. Die Verweilzeit ist die Zeit, die ein Molekül in einer Umgebung zur Verfügung hat, in der eine chemische Reaktion möglich ist, d.h. in der die Temperatur hoch genug ist. Zusätzlich zur Verringerung der Reaktionszeit, führt die Erhöhung der Geschwindigkeit des Luftstroms auch zur Verdünnung der Pyrolysegase.

Für Baumwoll- und Maisstrohpellets wurde nachgewiesen, dass die Entzündungscharakteristik in Abhängigkeit der Anströmtemperatur und Luftgeschwindigkeit steht

[YONG,2014]. Die Ermittlung der Selbstentzündungstemperatur ist jedoch immer abhängig von dem Versuchsaufbau und kann bei anderem Versuchsaufbau daher zu unterschiedlichen Ergebnissen führen [HURLEY,2016]. Weiteren Einfluss auf die spätere Anwendbarkeit der im Versuch ermittelten Selbstentzündungstemperaturen hat die Wärmeleitfähigkeit der Umgebungsbauteile [GARCIA,2012].

Des Weiteren nimmt auch die Verdunstung (welche ja erklärtes Ziel bei der Getreidetrocknung ist) Einfluss auf das Entzündungsverhalten [DRYS,2011].

Generell sollten bei landwirtschaftlichen Produkten die unter Laborbedingungen ermittelten Kennwerte nicht als uneingeschränkt übertragbar angesehen werden, da die spezifischen Stoffeigenschaften innerhalb derselben Sorten stark variieren können (z. B. auf Grund des Feuchtigkeitsgehaltes, Düngung, Bodenbeschaffenheit) [RAMIR,2009].

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Faktoren wurde in Zusammenarbeit mit der FSA e.V. ein Projekt zur Beurteilung der Selbstentzündungscharakteristik von Trocknungsgütern als mögliche Brandursache in Anlehnung an die real in Durchlauftrocknern vorliegenden Verhältnisse durchgeführt.

Hierbei galt es im ersten Schritt zu ermitteln, welche Durchströmungsverhältnisse in Durchlauftrocknungsanlagen anzunehmen sind und wie diese auf den Labormaßstab übertragen werden können.

Ausgewählt wurde eine Modifikation des Warmlagerversuches zur Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur, da hierbei auf vorhandene Labortechnik zurückgegriffen werden konnte, aber insbesondere ein Referenzieren der Ergebnisse gegenüber dem klassischen Warmlagerversuch möglich war.

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, bis eine Selbstentzündung eintritt. Die Zufuhr vorgeheizter Luft beträgt in der Regel 2 l/min. Der im 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 Wärmeschränk 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 wurden hierzu nicht zur Verfügung gestellt. 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. [FSA,2010]

B.1 Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung [FSA,2010]

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 Wärmeschränk 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 Wärmeschränk limitierten die Gestaltungsmöglichkeiten für die Versuchseinrichtung.



*Bild B.1: Versuchseinrichtung Bild B.2: Wärmeschränk und Abluftleitungen
beide [FSA,2010]*

Bild B.1 zeigt die Versuchseinrichtung im Wärmeschränk. 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 B.2* 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.

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



Bild B.3: Nassabscheider [FSA,2010]

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 acht 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 B.4* zu entnehmen.



Bild B.4: Messstellen in der Versuchseinrichtung [FSA,2010]

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 Halbflächenkreis 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.

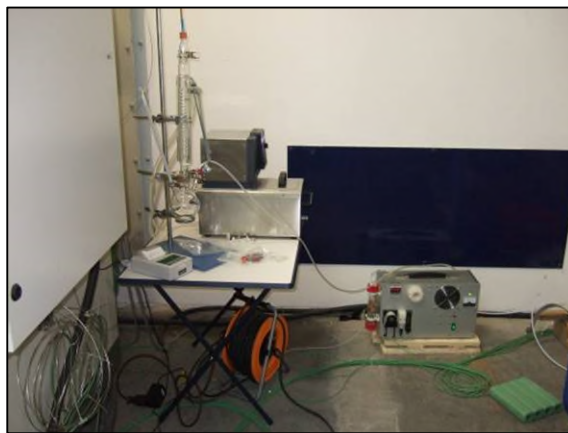


Bild B.5: Messgasaufbereitung [FSA,2010]

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



Bild B.6: Messtechnik und Datenverarbeitung [FSA,2010]

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. 1,8 l CO/min [...] für 400 cm³ auf das höhere Volumen von 7,12 l Mais um, ergibt sich ein Wert von 32,04 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 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 Wärmeschrank 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.

Der Einfluss der Durchströmung auf das Messergebnis konnte noch nicht abgeschätzt werden. Aus früheren Versuchen zum Explosionsschutz in Silofahrzeugen 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 Messpunkt vor dem Nassabscheider (s. Bild B.9) 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:

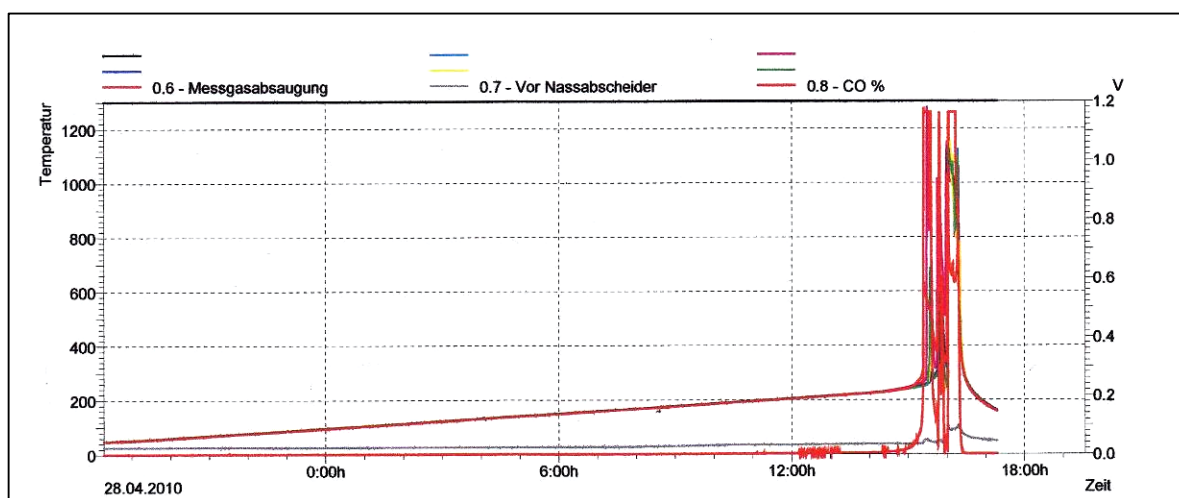


Bild B.7: Überblick Messschrieb [FSA,2010]

Die einzelnen Messpositionen und ihre farbliche Kennzeichnung sind der nachfolgenden Übersicht zu entnehmen:

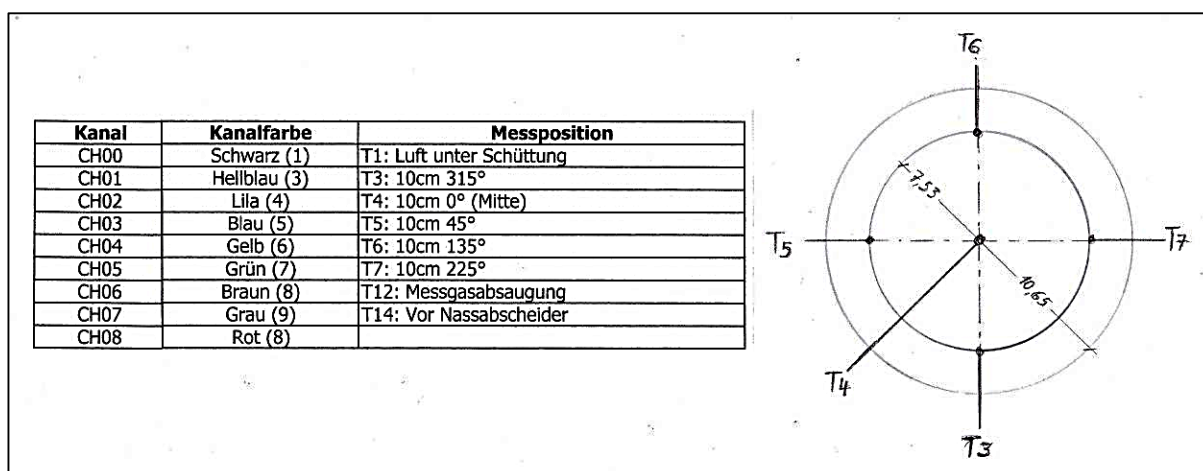


Bild B.8: Messpositionen [FSA,2010]

Wie zu ersehen ist, steigt die Aufheizphase bis ca. 225 °C gleichmäßig (14.20 Uhr). Alle Messpunkte innerhalb der Versuchseinrichtung stimmen gut überein.

50 Minuten später (15.10 Uhr) liegen die Temperaturen noch eng beieinander (ca. 234 – 250 °C). Wegen des in der Folge auftretenden schnellen Ablaufs der Ereignisse wird zuerst der Zeitraum zwischen 15.10 – 15.45 Uhr gesondert dargestellt.

An dieser Stelle einige Angaben zu den T₉₀-Zeiten:

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

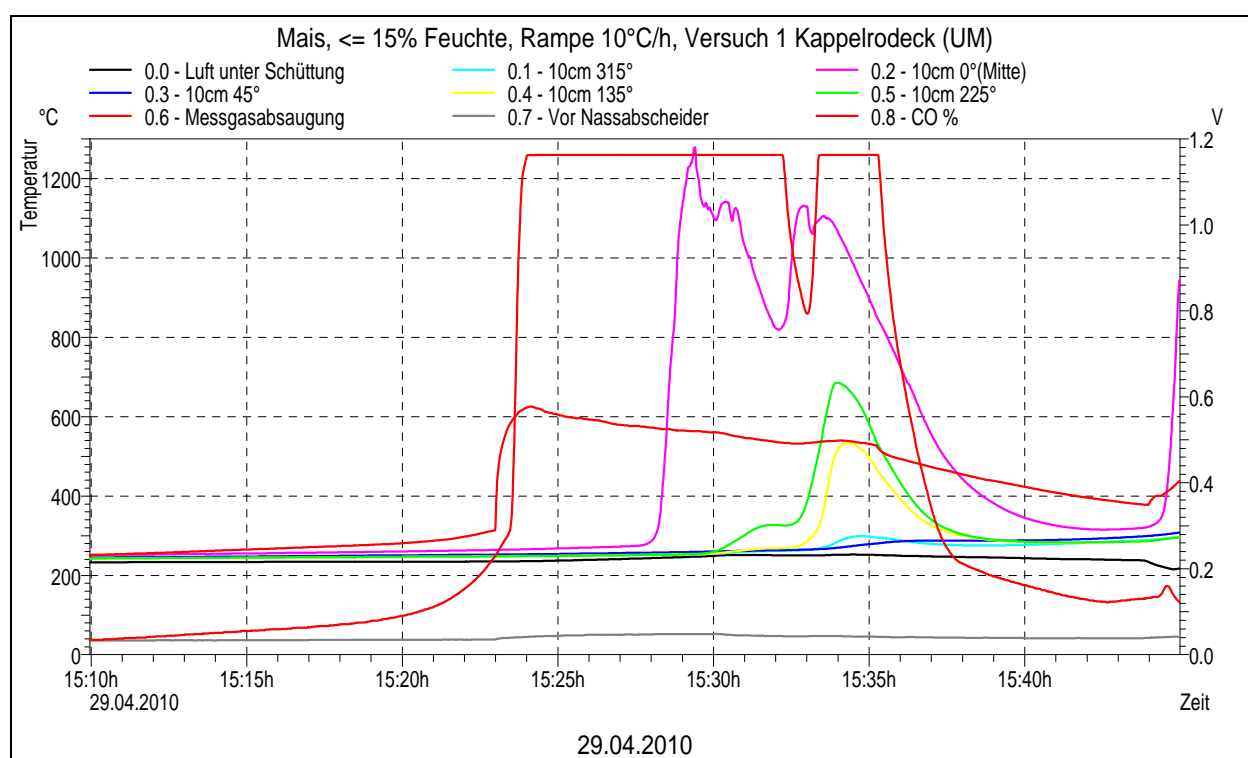


Bild B.9: Messschrieb von 15.10 – 15.45 Uhr [FSA,2010]

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 Maximums sind die CO-Werte außerhalb des Messbereiches. Die fallende Abgastemperatur lässt auf einen hohen Peak schließen, der langsam fällt. Nach 5 Minuten steigt die Temperatur

des in der Mitte der Schüttung platzierten Temperaturfühlers (T_4) 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 Uhr der Wärmeschrank abgestellt und mit Stickstoff geflutet.

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

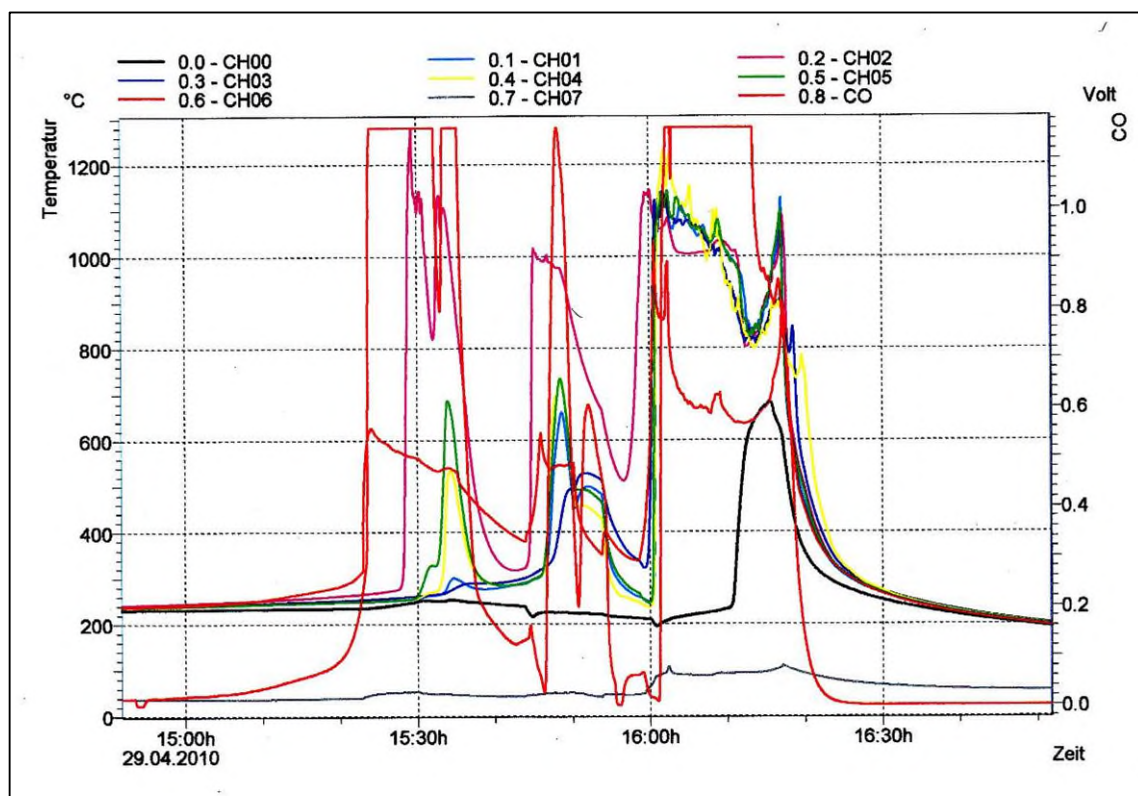


Bild B.10: Messschrieb von 14.40 – 17.00 Uhr [FSA,2010]

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 aufrechterhalten. Alle Temperaturfühler innerhalb der Versuchseinrichtung erreichten danach – mit Ausnahme des Fühlers in der Zuluft – maximale Temperaturwerte über 1.100 °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 Temperaturen 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 B.11: Nach dem Versuch Bild B.12: Nach dem Versuch
beide [FSA,2010]*



Bild B.13: Aschereste nach dem Versuch [FSA,2010]

B.2 Diskussion der Ergebnisse

Zur Verifizierung des Versuchsablaufes und Belastbarkeit der Ergebniswerte müssten Wiederholungsversuche durchgeführt werden. Bedingt durch den rasanten Abbrand und nur eingeschränkter Beherrschbarkeit der Reaktion, war die Durchführung weiterer Referenzversuche unter Einhaltung der gebührender Sorgfalt gegenüber der Versuchstechnik nicht vertretbar. Dementsprechend stehen die Ergebnisse unter dem Vorbehalt einer gewissen Unsicherheit.

Dennoch lassen sich die Erkenntnisse wie folgt festhalten und mit den Ergebnissen der Warmlagerversuche (siehe *Anhang D.1*) abgleichen [FSA,2010]:

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 Uhr Stickstoff in den Wärmeschrank eingebracht wurde, waren diese beiden Messstellen im Anstieg begriffen. Der Zeitabstand zu T_4 betrug 2 Minuten.

Trotz der Stickstoffzufuhr zeigten 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 1.100 °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.

Es scheint, 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.

Der Versuch gibt auch einen Hinweis darauf, wie der Schaden (*Anhang A, W., 2005*) 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 [FSA,2010].

Abschließend kann festgestellt werden, dass trotz der Unsicherheit eines nur einzelnen Versuchsablaufes, die Ergebnisse in Korrelation zum Warmlagerversuch mit Mais ohne erhöhte Durchströmung des Produktes mit Luft und den Erkenntnissen aus realen Brandereignissen an Trocknungsanlagen (*Anhang A*) stehen und als plausibel einzustufen sind.

B.3 Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Wärmefreisetzungsrate

Am Beispiel von Maisstroh wurde nachgewiesen, dass die Abbrandgeschwindigkeit abhängig vom Luftstrom ist [ZHAO,2008a].

Überträgt man die Versuchsergebnisse der durchströmten Schüttung im zeitlichen Verlauf zum Ansprechen der einzelnen Temperaturfühler aus *Anhang B.1*, in Abhängigkeit ihrer Lage aus Bild B.8, so kann geometrisch eine Abschätzung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit vorgenommen werden. Da die Temperaturfühler auf einer Ebene angeordnet sind, wird näherungsweise von einer kreisförmigen Brandausbreitung nach dem geometrischen Ausbreitungsmodell für die Brandentwicklungsphase [VFDB41,2020] ausgegangen.

$$v_{aus} = \frac{r}{t} \quad (\text{B.3.1})$$

mit:

v_{aus}	=	konstante Brandausbreitungsgeschwindigkeit [m/min]
r	=	radiale Brandausbreitung [m]
t	=	Zeit [min]

Anhand der vorliegenden Messschriebe, die den Temperaturanstieg des jeweiligen Messfühlers in Abhängigkeit der Zeit darlegen, wird zur graphischen Ermittlung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit das Ansprechen als jeweiliges Ereignis angesehen.

Tabelle B.1: Ereignisübersicht Brandausbreitung Versuch

Ereignis: Temp.-Anstieg von	Zeitpunkt	Zeit (min)
Ablufttempfühler	t_0	0
T_4	t_5	5
$T_6 + T_7$	t_7	7
$T_3 + T_5$	t_{10}	10

Dabei ist zum Zeitpunkt t_0 anfänglich unklar, wo sich innerhalb der Schüttung der Entstehungsort des Brandes befindet.

Da sich die Temperaturfühler T_6 / T_7 sowie T_3 / T_5 jeweils zeitgleich im Anstieg befinden, die Ausbreitungsgeschwindigkeit als konstant und auch horizontal angenommen werden kann, so müssen diese ausgehend vom Brandentstehungsort auf einer Kreisbahn mit gleichem Radius liegen. Somit ergibt sich für die Zeitpunkte t_7 (orange) und t_{10} (rot) ein jeweiliger Kreis mit zugehörigem Radius r . Die Mittelpunkte dieser Kreise stellen somit den Brandausbruchbereich dar und lassen auch für den Zeitpunkt t_5 (gelb) die Erstellung

eines Kreises zu. Der schwarze Kreis stellt die Außenwand des Versuchsbehältnisses dar.

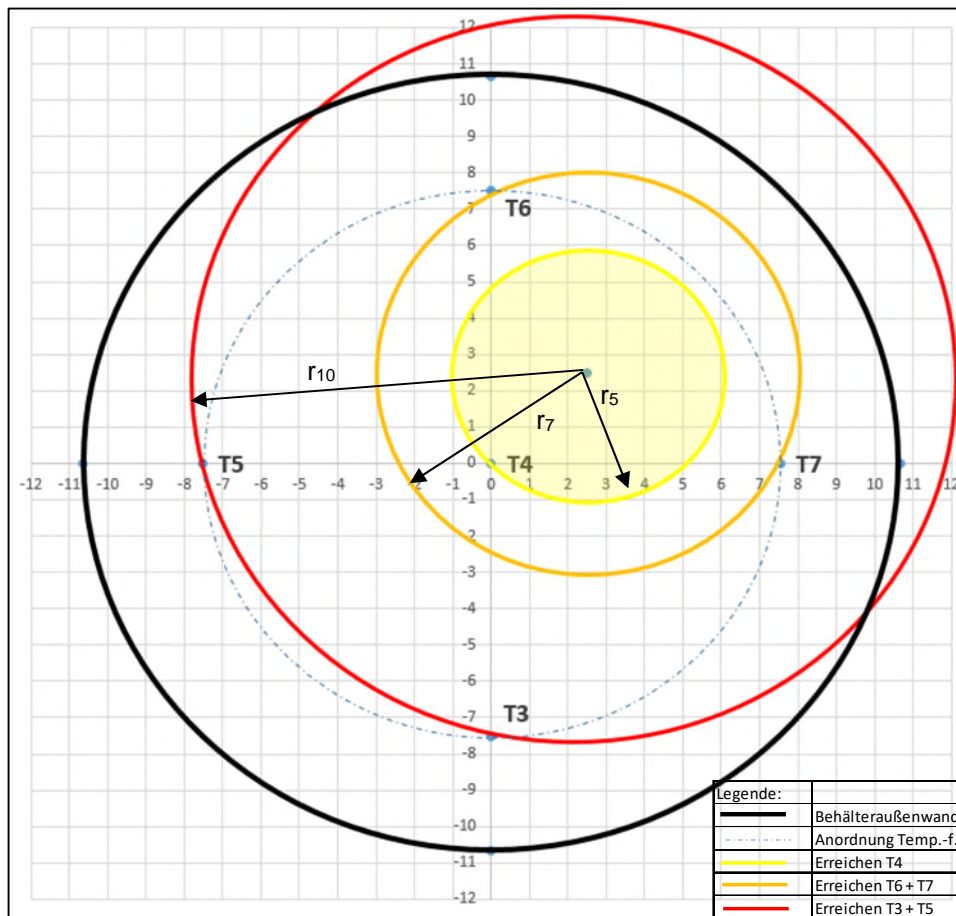


Bild B.14: Grafische Darstellung der Brandausbreitung bei Ansprechen der Temperaturfühler

Anhand der graphischen Auswertung lassen sich folgende Werte abmessen:

Tabelle B.2: Graphische Auswertung

Zeitpunkt	Zeit (min)	Radius	Werte (m)
t_0	0		0
t_5	5	r_5	0,0352
t_7	7	r_7	0,0538
t_{10}	10	r_{10}	0,0922

Die gemessenen Werte werden anschließend in ein Koordinatensystem $r(t)$ übertragen (Bild B.15). Es ist zu erkennen, dass die ermittelten Radien in Abhängigkeit der Zeit (blaue Linie) eine nahezu konstante Brandausbreitung (schwarz gestrichelte Linie) abbilden.

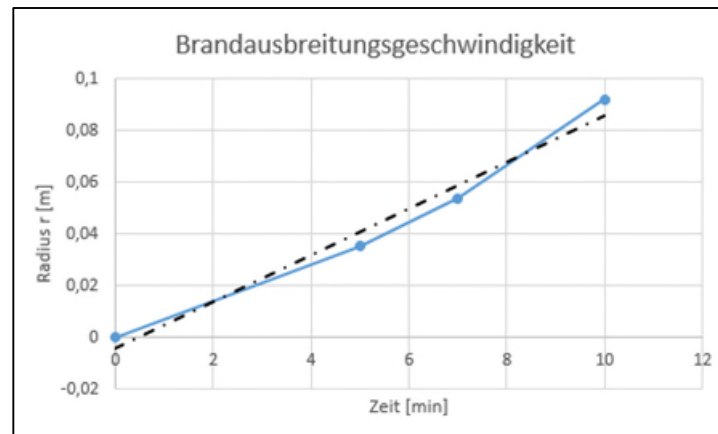


Bild B.15: Abgleich der ermittelten Werte zur radialen Brandausbreitung

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der modifizierten Versuchseinrichtung betrug:

$$v_{aus} = \frac{r}{t} = \frac{0,0922 \text{ m}}{10 \text{ min}} = 0,00922 \text{ m/min} \approx \mathbf{0,01 \text{ m/min}} \quad (\text{B.3.1})$$

Subjektiv betrachtet erscheint die Ausbreitungsgeschwindigkeit eher gering. Bei der objektiven Betrachtung sind jedoch die vorliegenden Versuchsbedingungen durch das Einbringen des Stickstoffs zu berücksichtigen. Das Einbringen des Stickstoffs sollte eigentlich die Reaktion zum Erliegen bringen und lässt somit den Wert auch subjektiv realistisch erscheinen.

Übertragen auf reale Bedingungen in Trocknungsanlagen ist zu beachten, dass bei zunehmender Produktfeuchte die Abbrandgeschwindigkeit abnimmt und bei steigender Zulufttemperatur die Abbrandgeschwindigkeit zunimmt [ZHAO,2008b]. Verfahrenstechnisch ist bei Durchlauf-trocknungsanlagen im Übergang von der Trocknungs- zur Kühlzone mit der niedrigsten Produktfeuchtigkeit zu rechnen und die Abbrandgeschwindigkeit in diesem Bereich am höchsten anzunehmen.

Brandlastberechnung:

Die Brandlast Q [kJ] ist die Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem bestimmten Bereich frei werden könnte und ergibt sich für den zuvor genannten Versuch nach [VFDB41,2020]:

$$Q \text{ [MJ]} = H * V * \rho \quad (\text{B.3.2})$$

mit:

H	=	Heizwert Mais nach Tabelle B.2 15,4 MJ/kg
V	=	Volumen Mais im Versuchsbehälter 7,12 Liter (0,00712 m ³)
ρ	=	Dichte trockener Mais ungefähr 780 kg/m ³

Hieraus ergibt sich hier folgende Brandlast:

$$Q \text{ [MJ]} = H * V * \rho = 15,4 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 0,00712 \text{ m}^3 * 780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{20,7 \text{ MJ}}$$

Tabelle B.2: Heizwerte von Trocknungsgütern

Trocknungsgut	Heizwert [kWh/kg]	Heizwert [MJ/kg]	Wassergehalt [%]
Mais	4,3	15,4	12,6
Weizen	4,1	14,8	13,1
Gerste	4,1	14,7	13,2
Raps	6,2	22,2	9,0

Die Heizwerte von [MJ/kg] auf [kWh/kg] wurden im Verhältnis 1 kWh/kg = 3,6 MJ/kg umgerechnet [PTB,2014].

Wärmefreisetzungsrate:

Als Energiefreisetzungsrate oder Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate – HRR) wird die Energie pro Zeiteinheit bezeichnet, die ein Objekt, wenn es brennt, abgibt [KARLS,1999].

Bei der Berechnung der Wärmefreisetzungsrate ist zu unterscheiden, ob es sich um einen brandlastgesteuerten oder ventilationsgesteuerten Brand handelt. Bei einem brandlastgesteuerten Brand ist die Wärmefreisetzung durch die brennende Oberfläche der Brandlasten begrenzt. Der ventilationsgesteuerte Brand ist eine Art des Abbrandes, bei dem in dem jeweiligen Raum, gemessen an den vorhandenen Brandstoffen, nicht ausreichend Verbrennungsluft zur Verfügung steht.

Die Verbrennung im Raum wird somit durch die ein- und ausströmenden Gasanteile limitiert.

Vereinfacht lässt sich die maximale Wärmefreisetzungsrate bei einem ventilationsgesteuerten Raumbrand wie folgt beschreiben, wobei bei der Verbrennung organischer Brandlasten eine nahezu konstante Wärmefreisetzung pro Masseneinheit verbrauchtem Sauerstoff stattfindet [vfdb41,2020] / [KARLS,1999].

Bedingt durch die geschlossene Bauweise der Versuchseinrichtung (ebenso wie bei Trocknungsanlagen) und der maschinell erzwungenen Luftdurchströmung des Trocknungsgutes, ist bei einem Brand von einem ventilationsgesteuerten Brand auszugehen.

Daraus ergibt sich [vfdb41,2020]:

$$\dot{Q}_{max,v}[MW] = \dot{m}_L * E_L * \chi_{O_2} \quad (B.3.3)$$

mit: \dot{m}_L = Zuluftmassenstrom [kg/s]

E_L = Wärmefreisetzungskonstante Luft = 3,03 MJ/kg_L

χ_{O_2} = Sauerstoffnutzungsgrad bei Vollbrandphase: max. 0,89

und: \dot{m}_L ist abhängig von der Zulufttemperatur

$$\dot{m}_L = \rho * \dot{V} \quad (B.3.4)$$

mit ρ bei atmosph. Druck von 1013,25 hPa und 20°C = 1,2041 kg/m³

wenn Zuluft 230°C:

$$\rho_{230^\circ C} = \frac{p}{R * T_{230^\circ C}} \quad (B.3.5)$$

mit: p = 1013,25 hPa = 101325 [kg/m*s²]

R = individuelle Gaskonstante trockene Luft = 287,05 [J/kg*K]

$T_{230^\circ C}$ = 273,15 K entsprechen = 0°C → 503,15 K

$$\rho_{230^\circ C} = \frac{101325 \text{ kg} * \text{kg} * \text{K} * \text{s}^2}{287,05 \text{ kg} * \text{m}^2 * 503,15 \text{ K} * \text{m} * \text{s}^2} = 0,70 \text{ kg} / \text{m}^3$$

In der Versuchseinrichtung ist analog einer Trocknungsanlage während des Trocknungsbetriebes und eine gleichmäßige Durchströmung des Trocknungsgutes gegeben.

Auf Grundlage des Versuchsaufbaus ist eine Anströmgeschwindigkeit von 0,3 m/s anzunehmen.

Der Volumenstrom ergibt sich aus:

$$\dot{V}[\text{m}^3/\text{s}] = A * v \quad (\text{B.3.6})$$

mit: A = Zuluftfläche [m^2], hier: $A = \pi * r^2 = \pi * 0,1065\text{m}^2 = 0,0356\text{m}^2$
 v = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

$$\dot{Q}_{max,v}[\text{MW}] = A * v * \rho * E_L * \chi_{O_2} \quad (\text{B.3.7})$$

$$= 0,0356\text{m}^2 * 0,3 \text{ m/s} * 0,70 \text{ kg/m}^3 * 3,03 \text{ MJ/kg} * 0,89$$

$$= 0,0202 \text{ MJ/s} = 0,0202 \text{ MW} = \mathbf{20,2 \text{ kW}}$$

Stellt man nun den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (HRR) zu der umgesetzten Brandlast dar, so würde sich ohne Stickstoffeintrag anhand der Wärmefreisetzungsrate folgender Brandverlauf annehmen lassen:

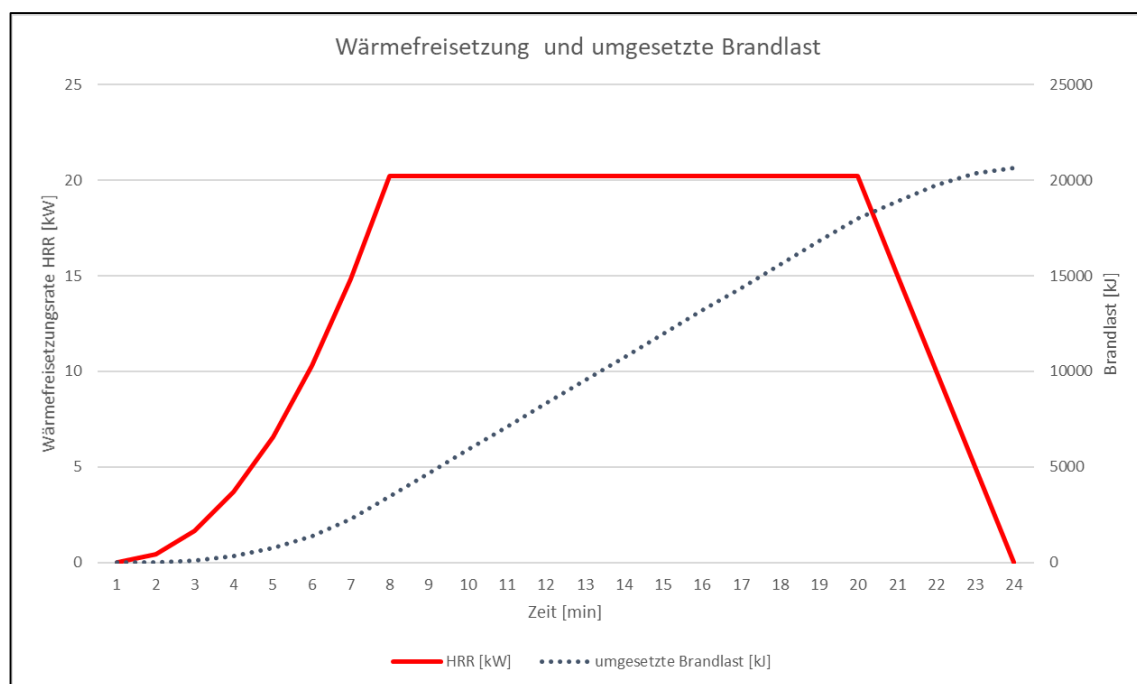


Bild B.16: Darstellung zeitlicher Verlauf HRR zu umgesetzter Brandlast ohne N_2 -Eintrag

Daraus ableitend, wäre ohne Stickstoffeintrag ein vollständiger Abbrand des Maises bereits nach ca. 24 Minuten zu erwarten gewesen und nicht nach rund 60 Minuten.

Anhang C – Nachweis des Eintrages von Zündinitialen über die Zuluft

Anhand der folgenden Versuchsanordnung sollte die Frage beantwortet werden, ob glimmende Partikel mit der Trocknungsluft durch den Zuluftkanal getragen werden.

Es konnte die Firma T&B electronic GmbH dafür gewonnen werden, entsprechende Detektionstechnik an vereinbarter Stelle zu installieren und nach Ende der Trocknungssaison die Ergebnisse auszulesen.

Versuchsort:

Es wurde eine Trocknungsanlage in Oldenburg ausgewählt, die seit Ihrer Erstinstallation bereits zwei Brandschäden erlitten hat.

Nach dem zweiten Brandschaden wurde die Anlagentechnik dahingehend verändert, dass die Wärmerückgewinnung demontiert wurde.

Daten der Trocknungsanlage:

Anlagenhersteller: Stela

Baujahr: 2008

Typ: MDB-XN 2/8-SU; Gesamtkapazität des Trockners ca. 85 t Mais, die Trocknungsleistung beträgt bei einer Trocknung von 35 % auf 15 % ca. 15 t/h

Vorreinigung: nein

ja

Funkenmeldetechnik:

Eingebaut wurden im Bereich der Umlenkung der Zuluft (siehe *Bild C.1*) zwei tageslichtempfindliche Lichtleiterfunkenmelder FSL-3 mit je 3 Armen, also insgesamt 6 Erkennungspunkten. Die Auswahl dieser Meldertypen erfolgte auf Grund der zu erwartenden Zulufttemperaturen (diese Lichtleiterfunkenmelder können in Temperaturbereichen von bis zu 300 °C eingesetzt werden). Ferner erlaubten diese Meldertypen den Zuluftkanal flächendeckend zu überwachen.

Der Überwachungsbereich wurde so ausgewählt, dass eine Fehlauslösung durch den regulären Brennerbetrieb auszuschließen ist. Herstellerseitig wird orientierend eine Detektionsgrenze von 1 mJ Zündenergie angegeben.

Einbauort der Funkenerkennung (die eingezeichnete Wärmerückgewinnung wurde deinstalliert):

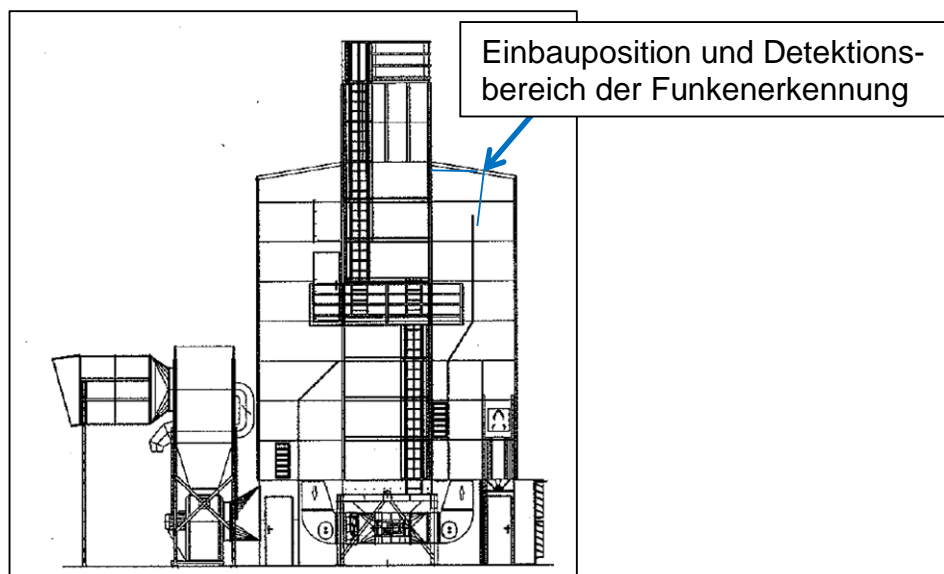


Bild C.1: Schematischer Aufbau der Trocknungsanlage mit Funkenerkennung

Versuchsablauf:

Vor Beginn der Maistrocknungskampagne 2012 wurde die Funkenerkennungstechnik installiert und etwaige Alarme aufgezeichnet. Nach Ende der Maistrocknungskampagne erfolgte das Auslesen der Speichereinheit. Alarme an das Bedienungspersonal wurden nicht ausgegeben. Es sollte während der Trocknung ausschließlich aufgezeichnet werden.

Versuchsergebnisse:

Die Aufzeichnung der Funkenerkennung mit dem ersten Alarm erfolgte am 17.09.2012 und der letzte Alarm am 09.11.2012.

Diese Zeitspanne liegt genau im Zeitfenster der Maistrocknung 2012.

Um Fehlalarme im regulären Betrieb von Funkenerkennungs-/und Funkenlöschanlagen zu vermeiden, ist üblicherweise als Alarmschwelle das Auftreten von mindestens 4 Funken innerhalb von 5 s hinterlegt.

In dieser Zeit wurden 28 Alarmereignisse, die auf Funkendetektion zurückzuführen sind, aufgezeichnet.

Betrachtet man nur die Ereignisse, die mindestens 4 Funken innerhalb des 5 s Zeitfensters beinhalteten, so sind folgende markante Ereignisse festzustellen:

Datum:	Zeit:	Funkenanzahl:
18.09.2012	11:45:15	4
28.09.2012	16:41:49	6
09.10.2012	10:10.07	4
15.10.2012	06:26:57	4
17.10.2012	06:37:27	4
09.11.2012	12:05:42	4

Diskussion des Ergebnisses:

Der Versuchsaufbau zeigt, dass während der Trocknung wiederkehrend Funken über die Zuluftthaube in den Bereich der Trocknungssäule gefördert wurden.

Ein Ansprechen der Funkenerkennung gibt erst einmal nur Aufschluss darüber, ob glimmende Partikel über die Zuluftthaube transportiert werden.

Ein Brandereignis ist während dieses Zeitraumes an der Trocknungsanlage nicht beobachtet worden. Dass die detektierten Funken keinen Brand ausgelöst haben, kann an mehreren Faktoren liegen:

- die Wahrscheinlichkeit der Zündung steigt mit der Anzahl an Funken
- Funken müssen auf eine trockene Staubansammlung „treffen“
- die Zündenergie lag unterhalb der Mindestzündenergie (MZE) von brennbaren Stäuben

Dies bedeutet im Umkehrschluss jedoch nicht, dass Funken, die über die Zuluftthaube transportiert werden, als Zündquelle ausgeschlossen werden können. Im Gegenteil: Der Nachweis auf Vorhandensein von glimmenden Partikeln im Zuluftschacht wurde erbracht und die fehlende Entzündung stellt möglicherweise nur einen Glücksfall darstellt.

Anhang D – Entwicklung alternativer Branderkennungsmöglichkeiten

Bislang in Trocknungsanlagen verbaute Branddetektionstechnik basiert auf dem Prinzip der Temperaturüberwachung. Ein Ansprechen ist abhängig von der Anzahl und dem Installationsort der Messfühler, der Größe des Brandes (Wärmefreisetzungsrate) und des Luftvolumenstromes. Diese Art der Branderkennung setzt voraus, dass es bereits zu einem Brand gekommen ist. Die Schadenerfahrung zeigt, dass Brände bei nicht flächendeckender, abluftseitiger Temperaturüberwachung (*siehe Kap. 6.2 Branderkennungseinrichtung*) erst zu einem Zeitpunkt detektiert werden, wenn bereits umfangreiche Schäden an der Anlage entstanden sind und eine zeitnahe Instandsetzung während der laufenden Trocknungskampagne nicht erfolgen kann.

Alternative Branderkennungsmöglichkeiten sollen daher brandkritische Zustände während des Betriebs der Trocknungsanlage zu einem Zeitpunkt erkennen, bei dem durch Einleiten von Gegenmaßnahmen bestenfalls der Brandausbruch verhindert wird oder in einem so frühen Stadium des Brandes ansprechen, dass nach Einleitung von Schutzmaßnahmen eine zeitnahe Instandsetzung der Anlage möglich ist.

Daher stellt sich die Frage, inwiefern eine alternative Branderkennung mittels Brandgasdetektion erfolgen könnte, wobei aus Versuchen an Maisstroh bekannt ist, dass die Emissionsraten von Kohlenstoffmonoxid (CO) abhängig von dem Luftvolumenstrom sind [ZHAO,2008a].

D.1: Brandfrüherkennung bei der Getreidetrocknung durch CO-Detektion [FSA,2010]

Ablauf des Projektes [FSA,2010]

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?
- 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?

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.

CO-Entwicklung bei Warmlagerversuchen [FSA,2010]

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.

Versuche im Wärmeschrank [FSA,2010]

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 pro h treten bei den Warmlagerversuchen in dem Wärmeschrank auf.

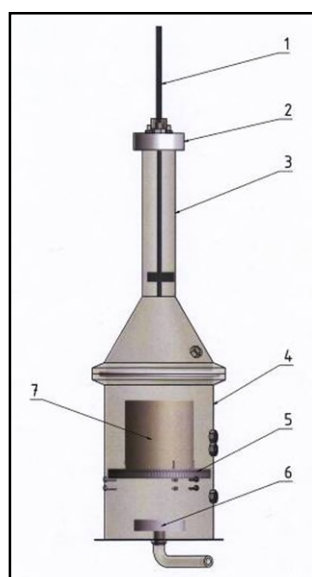
Durch Versuche, bei denen Prüfgas mit 1 Vol.% CO in unterschiedlichen Mengen (1 l/min bis 12 l/min) unter verschiedenen Betriebsbedingungen zugeführt wurde, (Luftumwälzventilatoreinstellung wie beim Warmlagerversuch, Luftumwälzventilator ausgeschaltet), konnte nachgewiesen werden, dass die Messwerte 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.

Entwicklung einer neuen Versuchsapparatur

Gasdichte Wärmeschränke sind nur als Sonderanfertigung erhältlich. Je nach Hersteller und Ausstattung sollten sie zwischen 8.000 und 15.000 € kosten. Deshalb wurde eine eigene Versuchseinrichtung konstruiert, die in den bestehenden Wärmeschrank eingebaut werden kann, sodass die bei Warmlagerversuchen mit 400 cm³ entstehenden Brandgase ohne die bisherigen Beeinflussungen gemessen werden können. [FSA,2010] Neben der Gasdichtheit war eine weitere Anforderung, dass mit der neu entwickelten Versuchsapparatur eine Durchströmung der Versuchsproben erfolgt, um so das Entzündungs- und Abbrandverhalten durchströmter Trocknungsgüter (*Anhang B*) sowie deren Pyrolysegasemissionen für eine mögliche Brandführerkennung auf Basis einer Brandgasdetektion zu ermitteln.

Prüfverfahren, die diese Anforderungen erfüllen, konnten nicht identifiziert werden, so dass eine neue Versuchsanordnung entwickelt wurde.



- Versuchsbehälter:
1 Messgassonde
2 Kondensatbehälter
3 Oberteil mit Flansch
4 Unterteil mit Flansch
5 Halter für Probenbehälter
6 Luftverteiler
7 Probenbehälter (400 cm³)

Bild D.1: Versuchsbehälter [FSA,2010]



Bild D.2: Im Wärmeschrank eingebauter Versuchsbehälter [FSA,2010]

Einfahren der Versuchseinrichtung mit dem Produkt Mais und Messergebnisse [FSA,2010]

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).

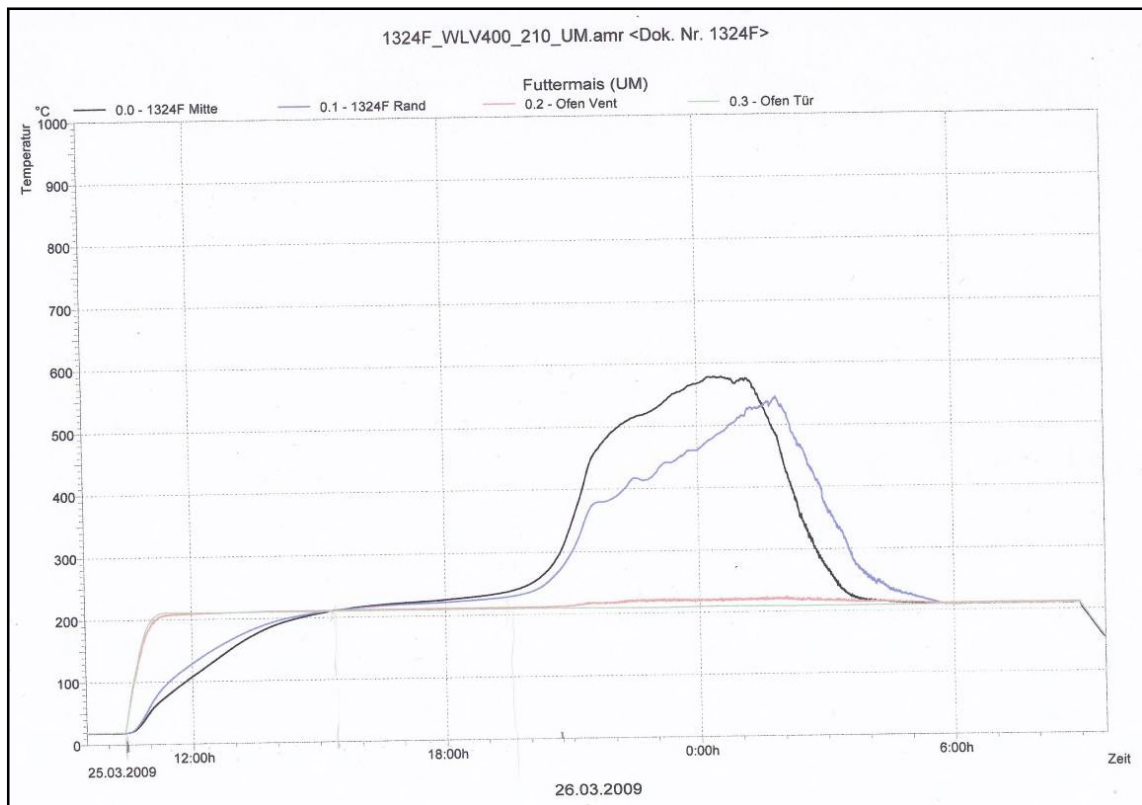


Bild D.3: Temperaturverlauf bei dem Versuch mit Mais im Wärmeschrank [FSA,2010]

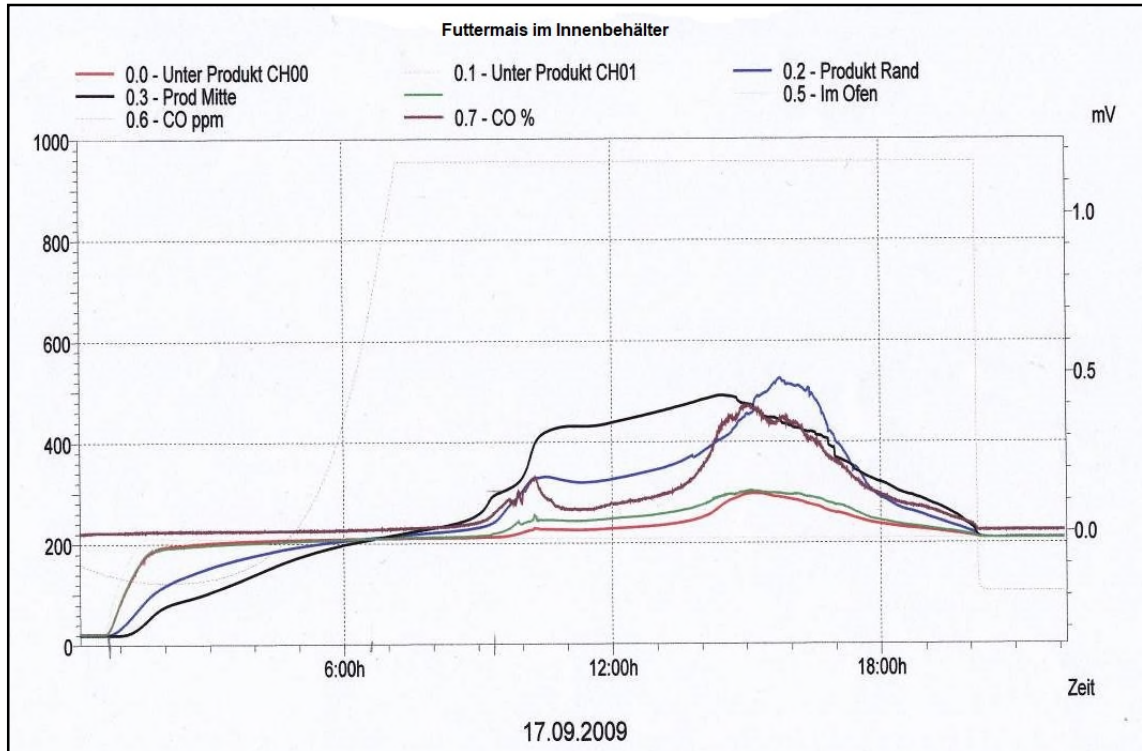


Bild D.4: Temperaturverlauf bei der neuen Versuchsanlage (Innenbehälter) mit CO-Messung [FSA,2010]

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.

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 Messschriebe).

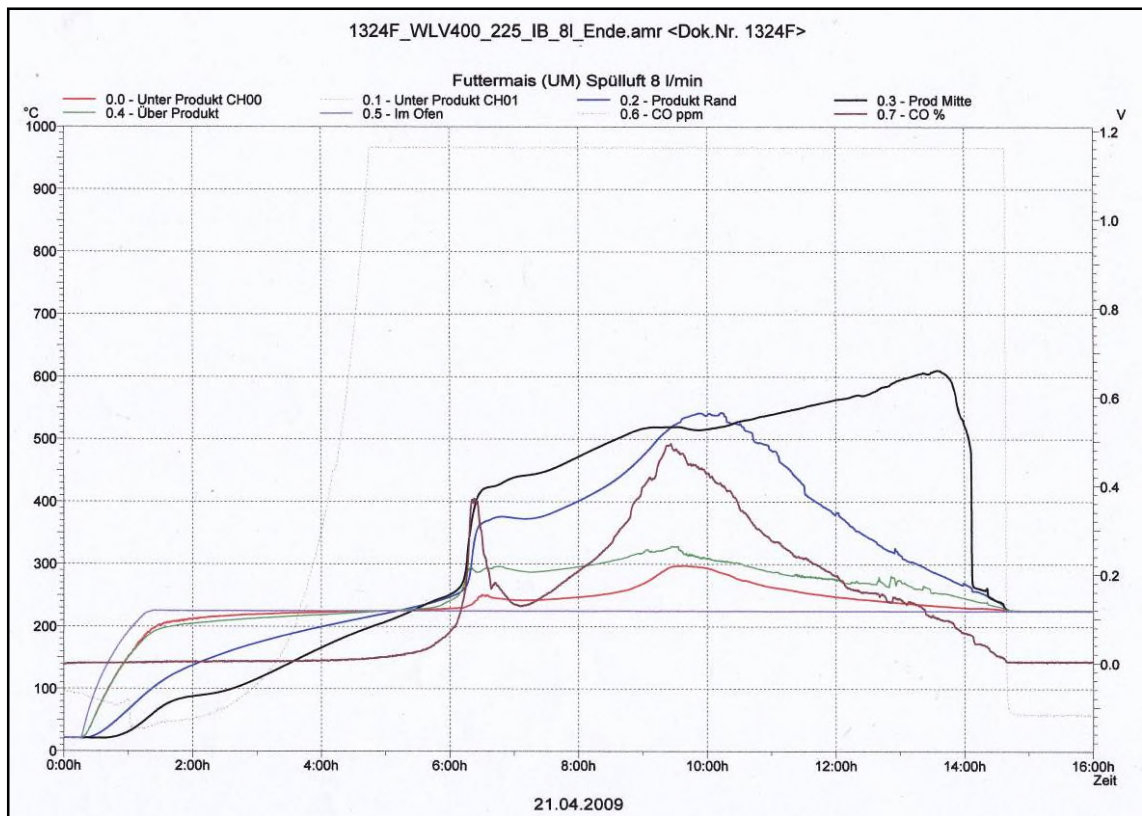


Bild D.5: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter – Spülluft 8 l/min [FSA,2010]

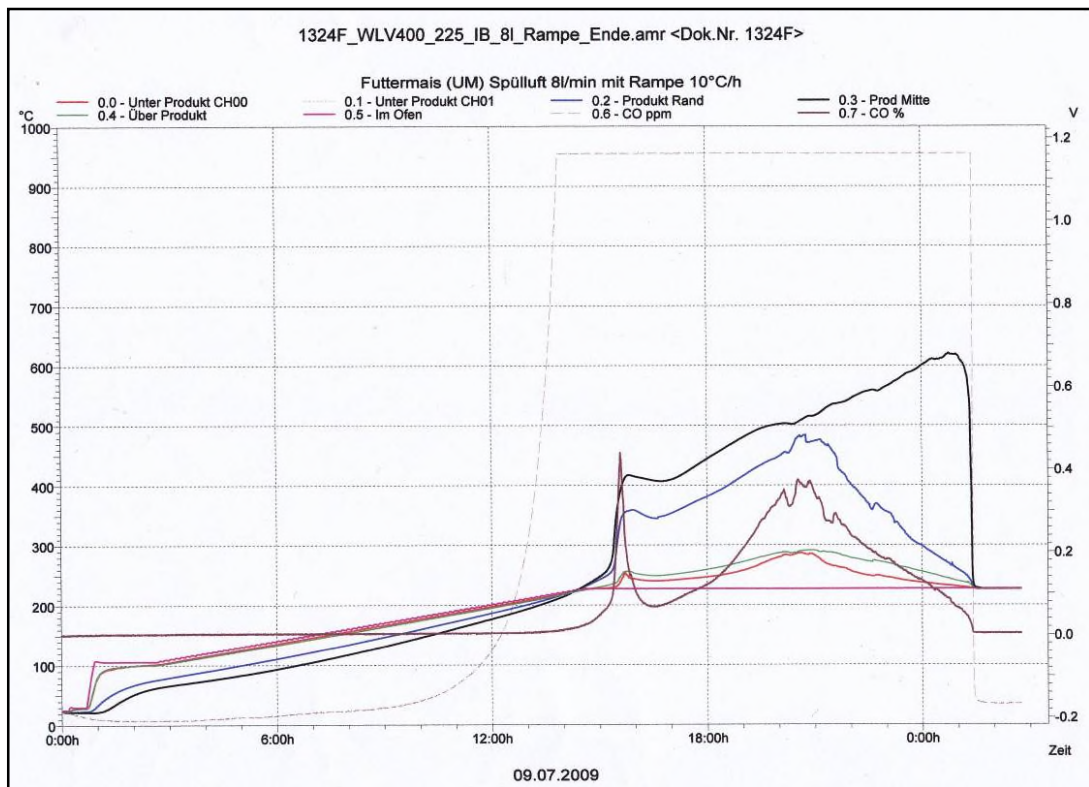


Bild D.6: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

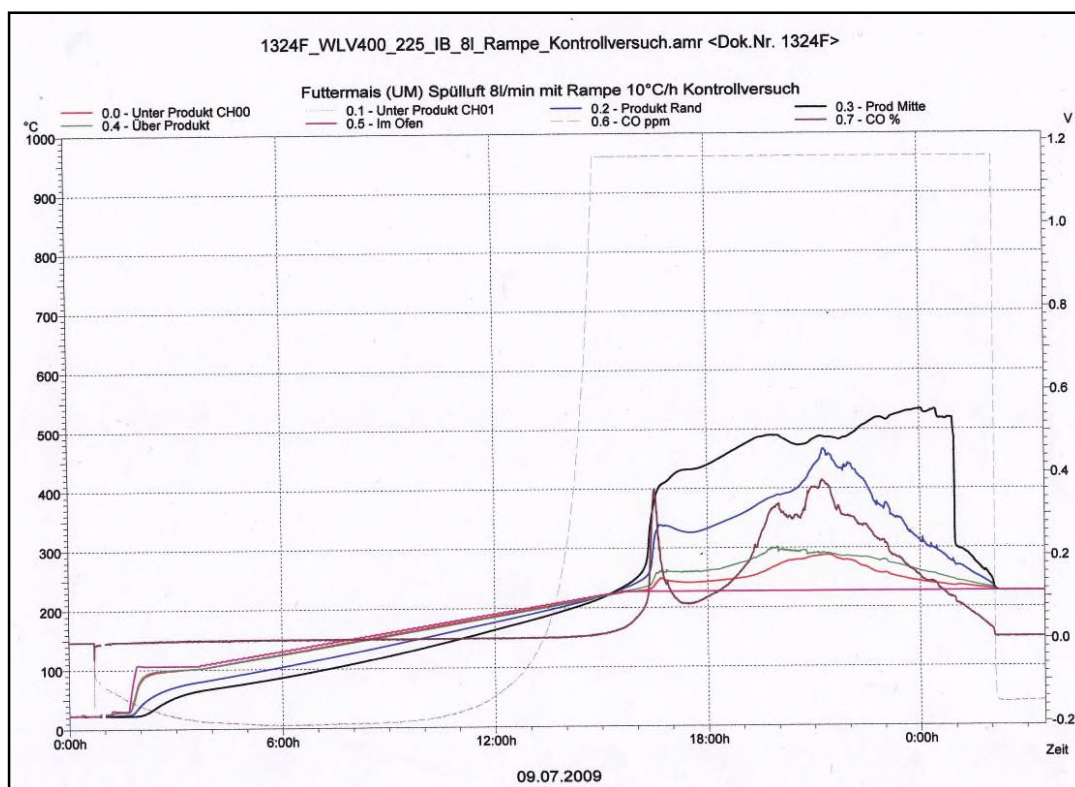


Bild D.7: Kontrollversuch: CO-Messung mit Mais im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

Ein Vergleich der Messkurven der Versuche mit 8 l/min im normalen Warmlagerversuch und der Versuch 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.

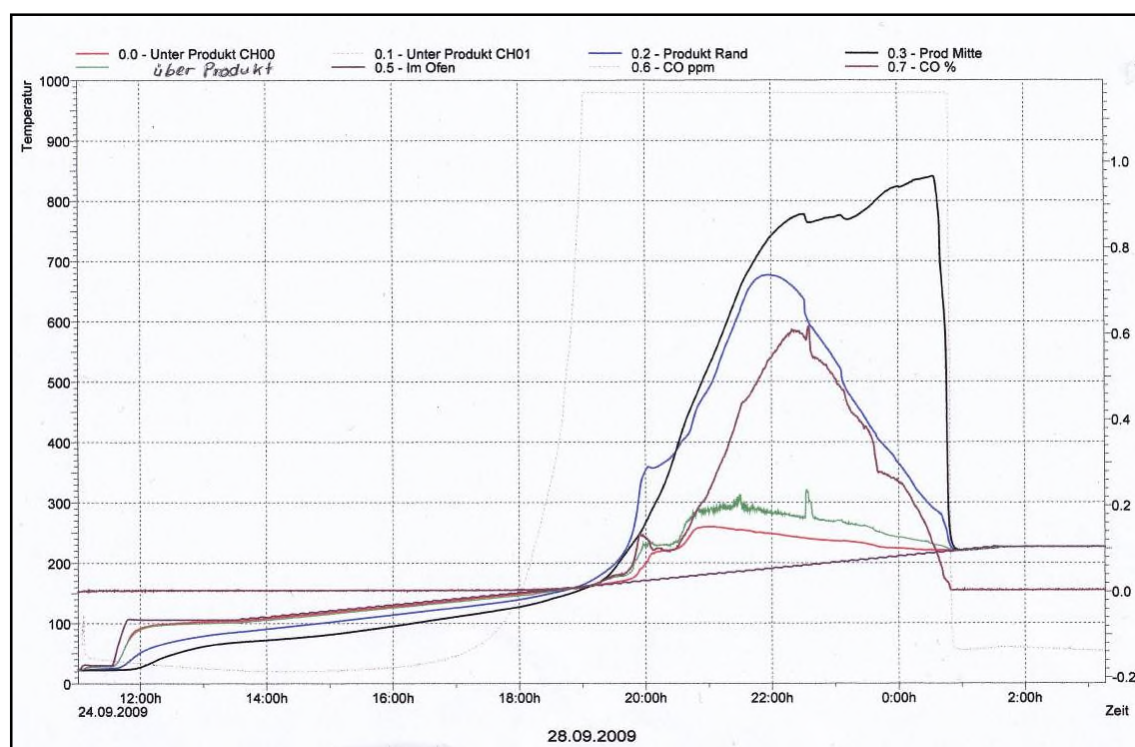


Bild D.8: CO-Messung mit Magermilch im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

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 Glimmester aber größer sein, um die gleiche CO-Emission zu erreichen. [FSA,2010]

Betrachtet man die Temperaturverläufe bei Mais im klassischen Warmlagerversuch zu den Ergebnissen in der neu entwickelten Versuchseinrichtung, so ist festzustellen, dass die Temperaturverläufe zwar nicht identisch, jedoch hinsichtlich Zeitverlauf und Maximaltemperatur in gleichen Dimensionen liegen. Hinsichtlich der CO-Emissionsrate zeigten die Vorversuche auf Grund der fehlenden Gasdichtheit des Wärmeschrankes, dass hier kein Abgleich der Ergebnisse zwischen klassischem Warmlagerversuch und den durchgeführten Versuchen in der neuen Versuchseinrichtung zielführend sind.

Die Auswertung der Versuche mit Mais sowie der Referenzprobe Milchpulver in der neu entwickelten Versuchsanordnung ergeben, dass CO-Emissionsraten bei der Entzündung auftreten, die eine Brandfrüherkennung auf Basis einer Brandgasdetektion ermöglichen. Eine Aussage hingegen, ab welcher CO-Emission in Korrelation zu dem in Brand geratenem Volumen eine Detektion möglich ist, kann anhand dieser Versuchsmethode nicht abgeleitet werden. In welchem Stadium eines Brandes eine Detektion mittels Brandgasdetektion erfolgen kann, ist somit abhängig von der Sensibilität der Messtechnik und des Brandfortschrittes.

CO-Emissionen von Raps [FSA,2010]

Die unter den bisherigen Bedingungen durchgeführten Versuche (8 l/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).

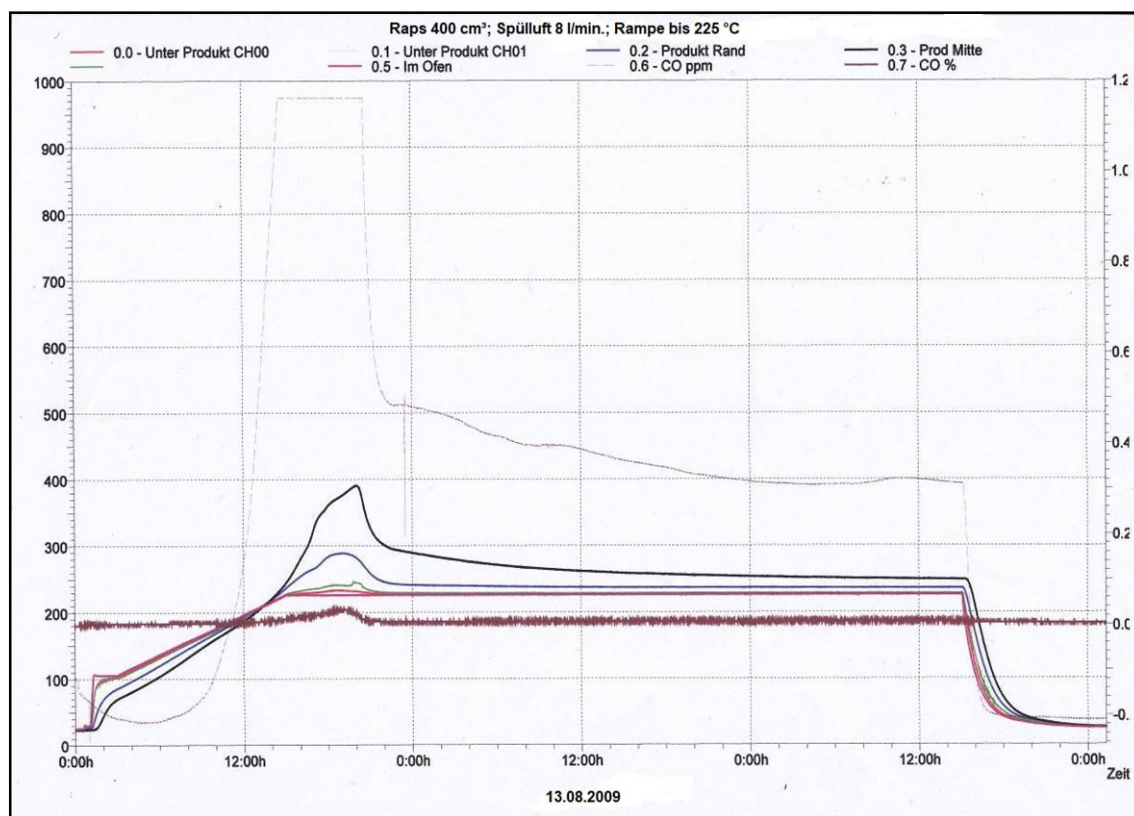


Bild D.9: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C)
[FSA,2010]

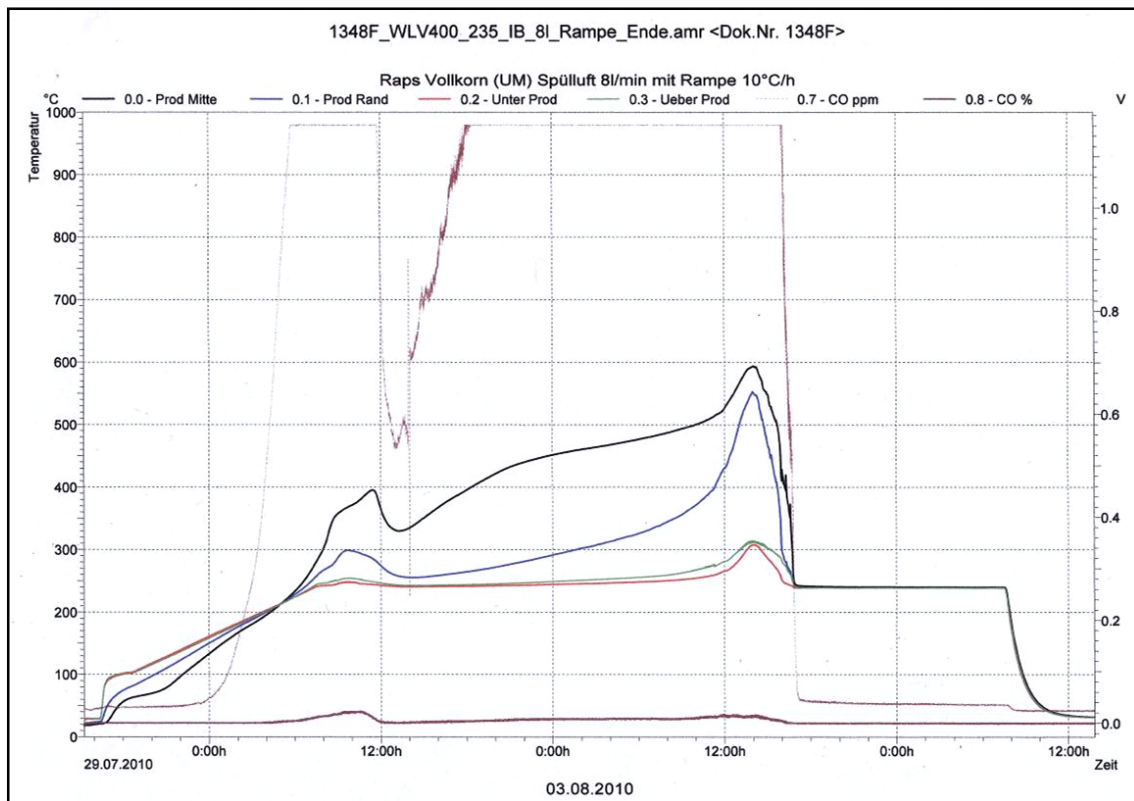


Bild D.10: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 235 °C)

[FSA,2010]

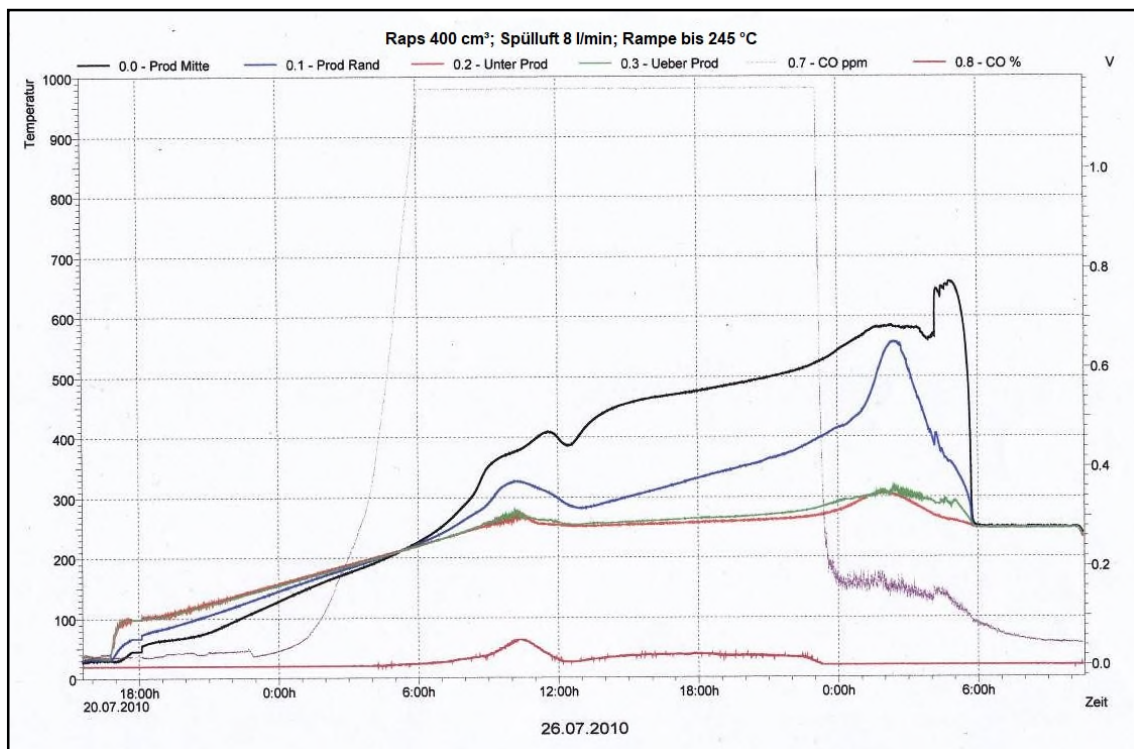


Bild D.11: CO-Messung mit Raps im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 245 °C)

[FSA,2010]

Einen Eindruck von der Rapsprobe nach dem Versuch mit 245 °C gibt das *Bild D.12*.

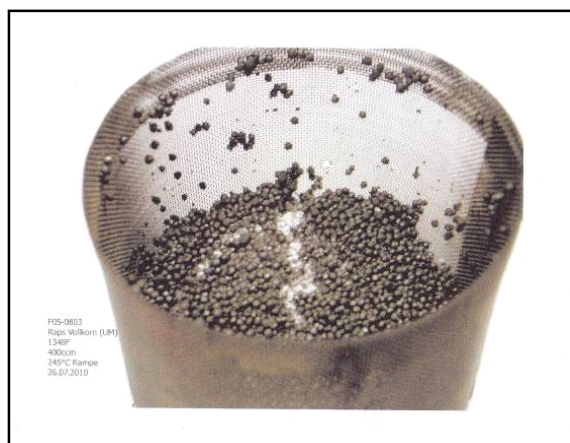


Bild D.12: Rapsprobe nach dem Versuch mit 245 °C [FSA,2010]

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.

CO-Emission von Weizen [FSA,2010]

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 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.

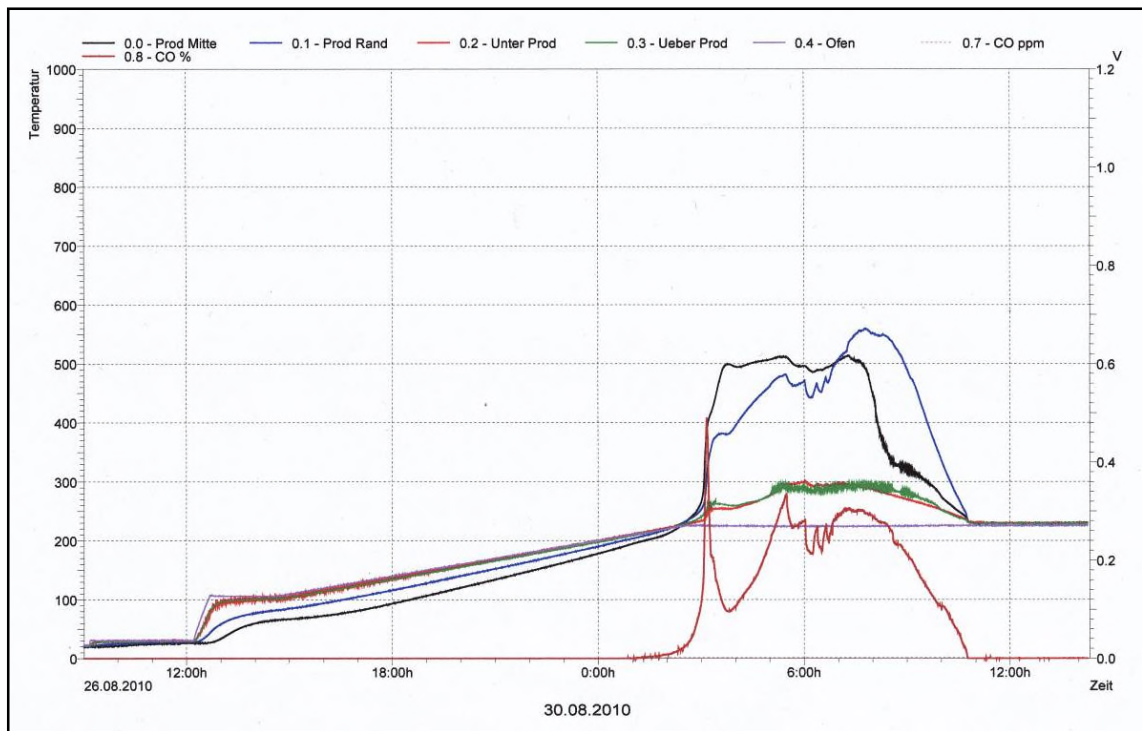


Bild D.13: CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8 l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

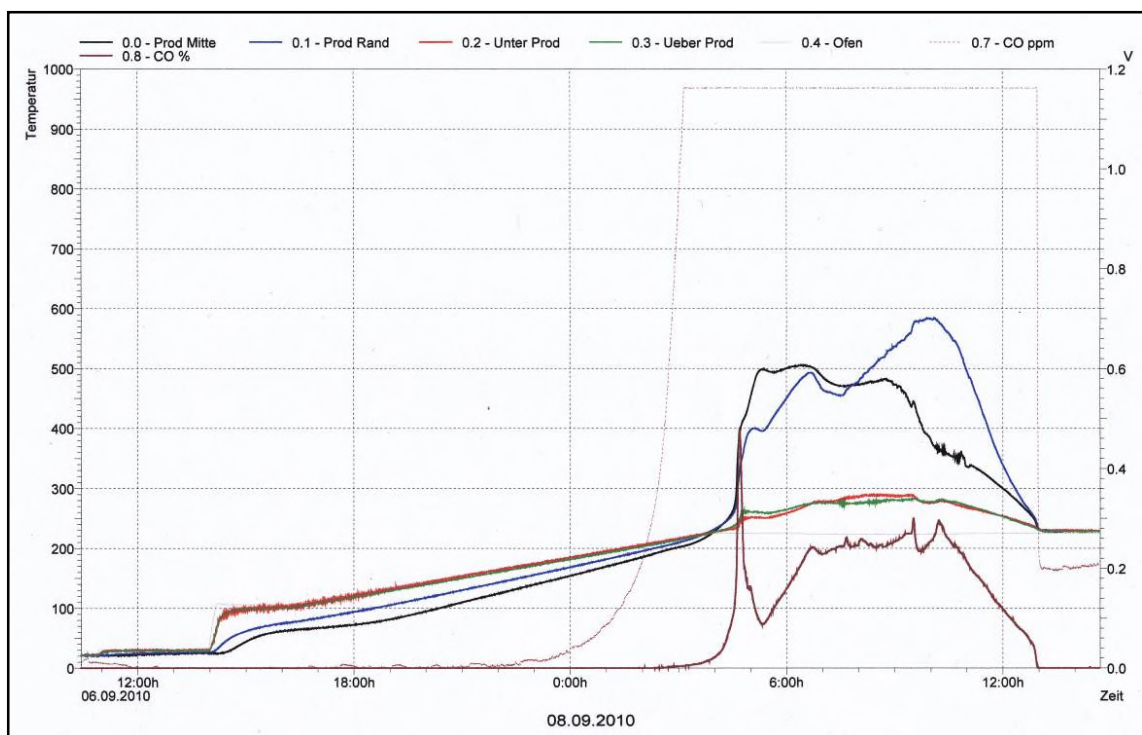


Bild D.14: Kontrollversuch: CO-Messung mit Weizen im Innenbehälter (Spülluft 8l/min, Rampe bis 225 °C) [FSA,2010]

D.2: Versuche über eine CO-Belastung beim Betrieb bestehender Durchlauftrockner für Getreide

Versuche an einer Anlage im Saugbetrieb während der Trocknung von Raps [FSA,2010]

Die Anlage ist ein einfacher Trockner ohne Luftrückführungen. Der wesentliche Unterschied zum üblichen Funktionsprinzip 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.

Versuchsaufbau [FSA,2010]

Der Trockner, an dem die Messungen vorgenommen wurden, ist direkt vor ein Silogebäude gesetzt worden (*Bild D. 15*). 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 Warmluftherzeuger (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 Dächerschachttrockners gelangt die Luft in den Abluftschacht, der durch die Tür unten rechts begangen werden kann. Abluft und Kühlluft werden über das Abluftrohr (*Bild D.16*) auf den obersten Siloboden geführt. Dort stehen der Zentrifugalabscheider und der Saugventilator.



Bild D.15: Trockner [FSA,2010]



Bild D.16: Trockner mit Zuluftkanal und Abluftrohr [FSA,2010]

Kurz vor dem Austritt ins Freie wurde das Messgas aus dem Abluftrohr entnommen (*Bild D.17*). Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen wurde das Gas über eine beheizte Messgasleitung dem Messgaskühler (*Bild D.18*) zugeführt. Anschließend erfolgte

die Weiterleitung in einer Teflonleitung bis zum Aufstellungsort des Messgerätes (*Bild D.19*) im Silokeller.



Bild D.17: Entnahme des Messgases [FSA,2010]



Bild D.18: Messgaskühler [FSA,2010]



Bild D.19: Messgerät [FSA,2010]

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.

Tabelle D.1: Verwendete Messgeräte [FSA,2010]:

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	Fa. Ahlborn
Software	AMR WinControl 6	akrobit software GmbH
Schreiber	Kompensograph Typ C1015	Fa. Siemens

Messergebnisse [FSA,2010]

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

Tabelle D.2: Messgaslaufzeiten [FSA,2010]:

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 sich 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.

Der Ausdruck aus dem Datenlogger gibt einen Überblick über die CO-Emissionen während des ganzen Tages. Ausgenommen sind die Zeiten von 14.30 - 16.30 Uhr und um 18.00 Uhr, in denen Versuche gefahren wurden. Auf die weiteren gekennzeichneten Bereiche (*Bild D.20*) wird im Folgenden näher eingegangen (Messschrieb mit den Daten des Versuches mit Raps).

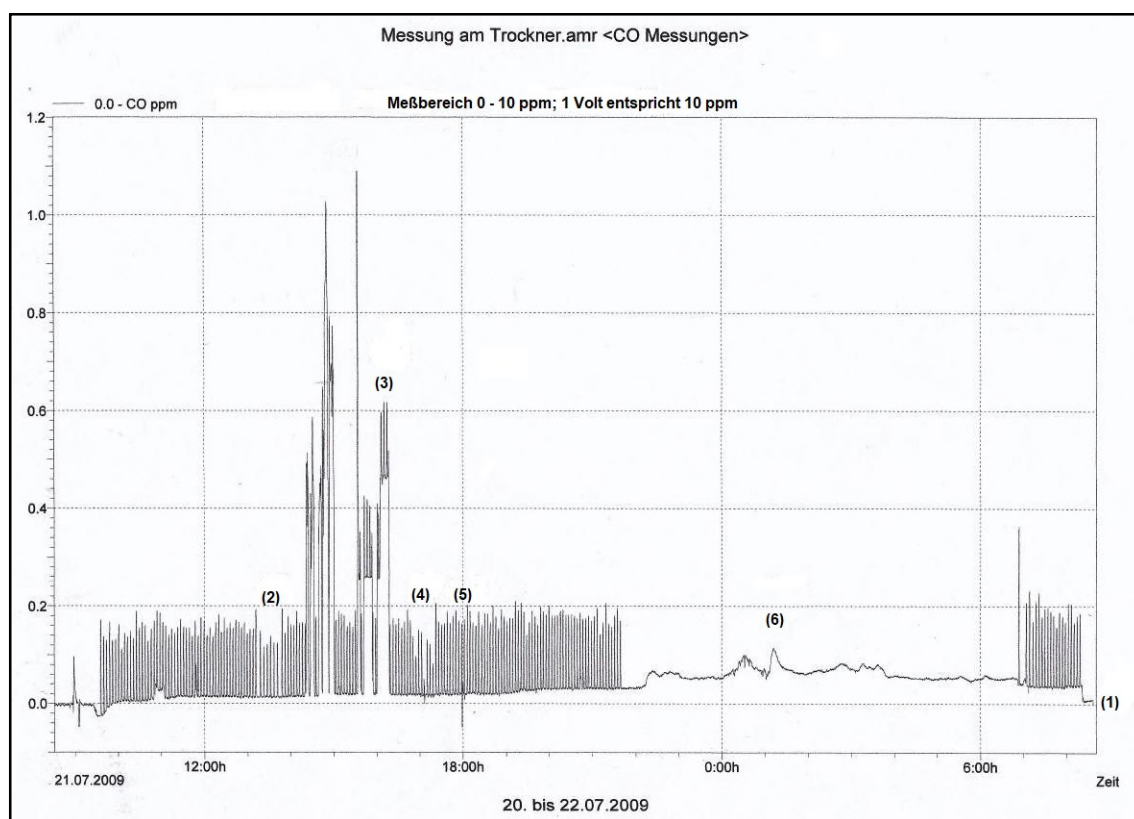


Bild D.20: Daten des Versuches mit Raps [FSA,2010]

Der Messschrieb weist eine Grundbelastung mit CO auf. Bei einem indirekt beheizten Wärmetauscher ist eine intermittierend auftretende CO-Belastung der Abluft jedoch nicht zu erwarten. Fremdgasen konnten ausgeschlossen werden, da die Anlage – mit Ausnahme der Förderwege für das Produkt – keine Verbindung mit anderen Anlageteilen 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 verringerten sich um ca. 27 % von durchschnittlich 1,45 ppm auf 1,14 ppm. Höhere Temperaturen und längere Laufzeiten wirkten positiv auf das Zündverhalten des Brenners.

(3) Durch die Zugabe von CO-Gas sollten

- die Laufzeit des Gases durch den Trockner kontrolliert und
- 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 D.21*).



Bild D.21: CO-Eingabe [FSA,2010]

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.

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 D.22*).



Bild D.22: Referenzluftabsaugung an der Brennkammer [FSA,2010]



Bild D.23: Eingabe von Nebel in die Entlastungsklappe [FSA,2010]

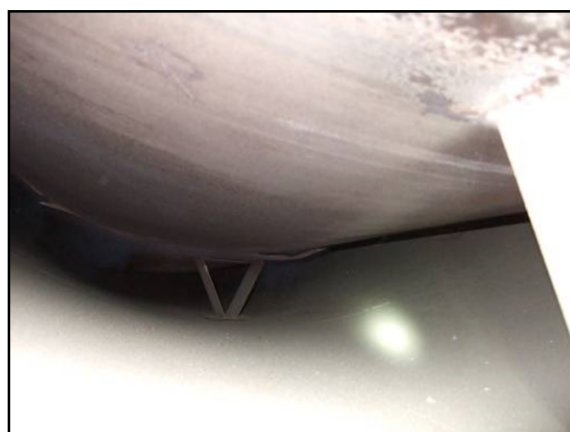


Bild D.24: Austritt von Nebelschwaden [FSA,2010]

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 mittels Nebelmaschine nachgewiesen werden. Vor dem Versuch wurde der Abgaskanal zum Kamin mit Planen notdürftig verschlossen. Danach erfolgte die Flutung der Brennkammer mit dem Nebel (*Bild D.23*). Dabei konnte beobachtet werden, wie Nebelschwaden in den Ansaugbereich der Zuluft für den Wärmetauscher gelangten (*Bild D.24*).

(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.

Diskussion der Ergebnisse [FSA,2010]

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 70.000 m³/h angegeben. Während des gemessenen Trocknungsprozesses war der Volumenstrom gedrosselt. Der real eingestellte Volumenstrom ist dem Betreiber 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 eine Minute hat der Abluftventilator einen Volumenstrom 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 52.200 m³/h; für 4 l/min und einen Messwert von 4,5 ppm 53.340 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 (siehe Anhang D.1), 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, die das zu trocknende Produkt durchströmen, sind vermutlich nicht im Sinne der Produktqualität.

Versuche an einer Anlage im Druckbetrieb während der Trocknung von Mais [FSA,2010]

Der Dächerschachttrockner entspricht auch dem Funktionsprinzip, 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 darunterliegenden 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 gereinigt 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.

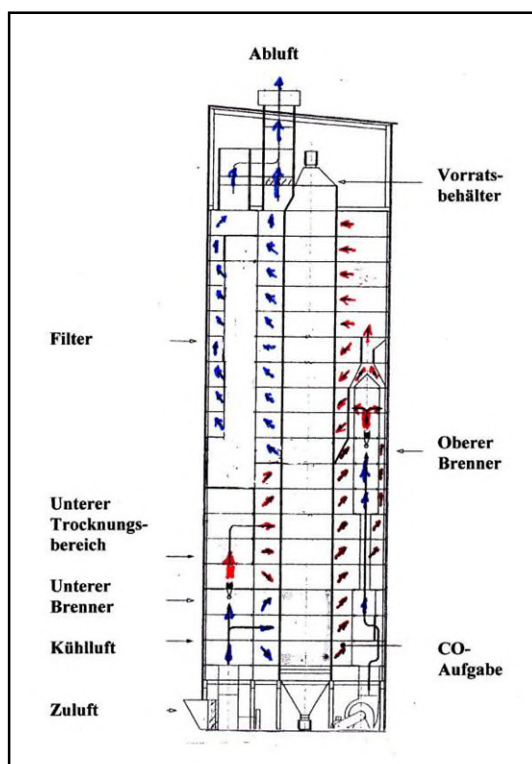


Bild D.25: Schema des Trockners [FSA,2010]

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 Austrags-einrichtung 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 Korntemperatur 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 62.665 kg/h und zwei sind mit je 98.760 kg/h angegeben, insgesamt also 260.185 kg/h. Bei einer Abluft mit 70 °C und 80 % Luftfeuchte ist von einem Volumen – auch bei unbekanntem Druckverhältnissen – von weit über 300.000 m³/h auszugehen.

Versuchsaufbau [FSA,2010]

Auch bei diesem Trockner wurde das Messgas aus der Abluft und die Referenzluft vor einer Ansaugöffnung für die Frischluft angesaugt. *Bild D.26* und *D.27* geben einen Eindruck vom Trocknergebäude, *Bild D.28* und *D.29* von der Gasentnahmestelle aus dem Abluftschacht und dem Aufstellungsort für den Messgaskühler.

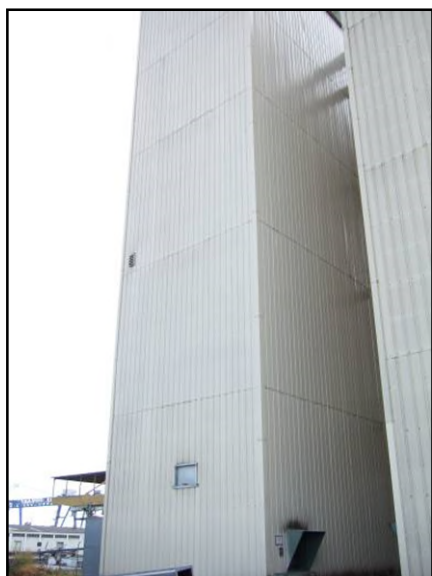


Bild D.26: Trocknergebäude mit einer Ansaugstelle für Zuluft [FSA,2010]



Bild D.27: Trocknergebäude mit Zugangsebenen [FSA,2010]

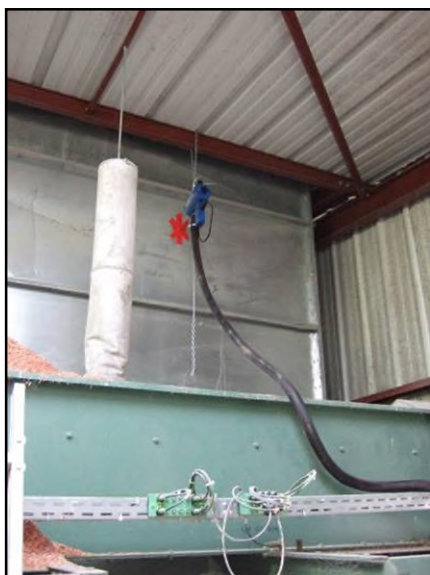


Bild D.28: Messgasentnahmestelle



Bild D.29: Aufstellungsort Messgaskühler

beide [FSA,2010]

Die auftretende Raumverstaubung gestattete nur eine Aufstellung des Messgaskühlers in der Nähe des Eingangs. Die Messtechnik (verwendete Geräte wie unter Tabelle D.1) stand in einem Container neben dem Trocknergebäude.



Bild D.30: Messgerät [FSA,2010]

Messergebnisse [FSA,2010]

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

Versuche mit Prüfgas (30 ppm)

Tabelle D.3: Messgaslaufzeiten [FSA,2010]:

1.	Ansaugstelle Referenzluft – Messgerät	ca. 8 s
2.	Messgassonde Siloboden – Messgerät	ca. 23 s
3.	Aufgabe von CO-Gas im Trockner (s. Schema des Trockners): Aufgabestelle im Bereich der Abluft nach der Kühlung (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.	ca. 32 s

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 Austrageinheit, Abtransport nicht möglich – wird auch die Pilotflamme ausgeschaltet.

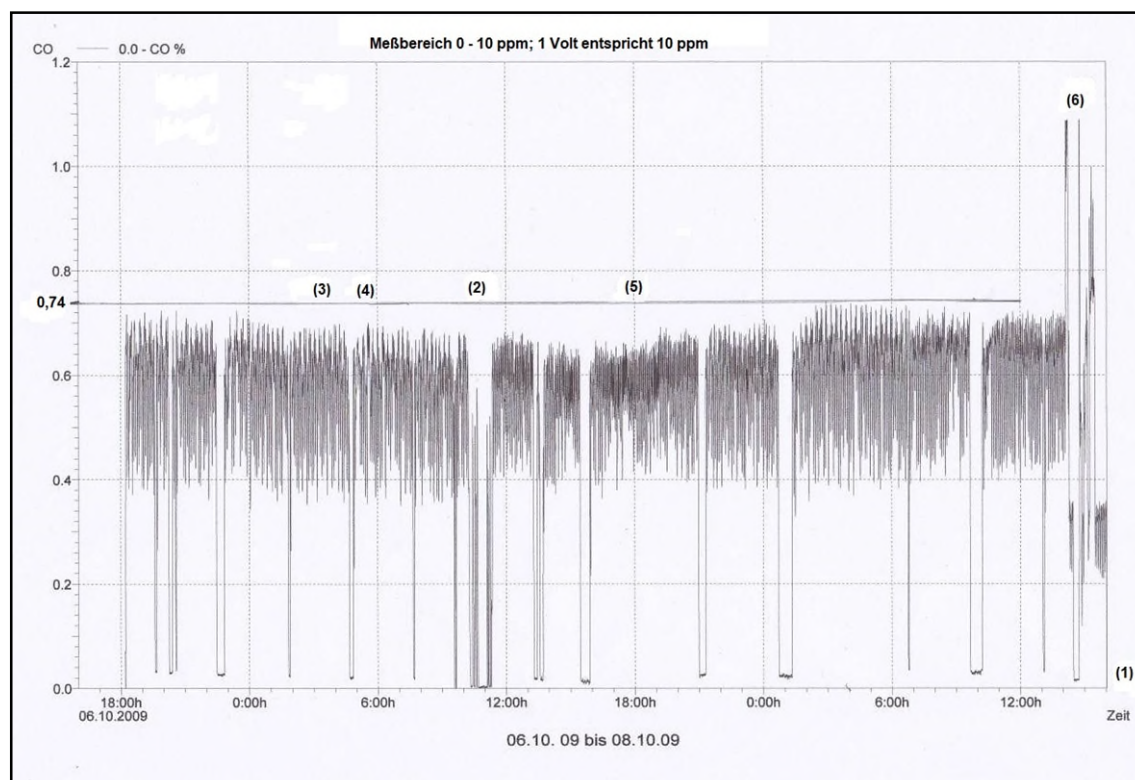


Bild D.31: Daten des Versuches mit Mais [FSA,2010]

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 erweckte 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 ließen sich auf den relativ kleinen Maßstab zurückführen (Geschwindigkeit des Schreibers 6 cm/h). Auffallender war, dass im Bereich **(5)** der CO-Anstieg deutlich geringer war. Das deutete auf eine bessere Verbrennung des Gases hin. Wahrscheinlich war dies auf höhere Temperaturen zurückzuführen. Eine Überprüfung im Nachhinein war 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 hinausführte. 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.

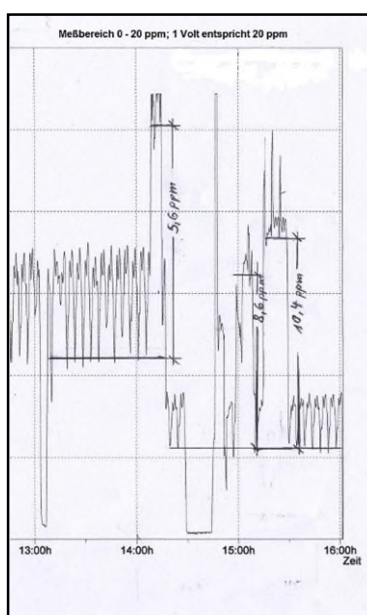


Bild D.32: Auszug aus dem Datenlogger [FSA,2010]

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.

Diskussion der Ergebnisse [FSA,2010]

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 zuvor 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 64.286 m³/h, bei 10 l/min und 8,6 ppm – 69.767 m³/h, bei 12 l/min und 10,4 ppm – 69.230 m³/h.

Anhand dieser überschlägigen Abschätzung ergeben sich Werte des Abluftvolumenstroms, die nicht deckungsgleich mit den Herstellerangaben sind. Betrachtet man die Bauweise des Trockners, das Verfahren der Warmlufterzeugung durch Flächenbrenner, die Luftverteilung und den Aufgabepunkt des CO (siehe *Bild D.25*), dann ist eine mögliche

Erklärung für diese Abweichung, dass eine Strähnenbildung 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 im Falle einer Strähnenbildung Brandereignisse sicher erkennen zu können.

Nach den bisherigen Erkenntnissen über die CO-Emissionen von Mais 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 350.000 m³/h und gleichmäßiger Verteilung erbrächten 4,5 l/min einen erkennbaren Anstieg von 0,77 ppm.

Möglichkeiten des Einsatzes der CO-Detektion in Dächerschachttrocknern [FSA,2010]

Grundsätzlich ist die CO-Detektion geeignet, Glimmnesten 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 Aufstellungsräume 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 einbezogen 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.

Anforderungen an Brandgas-Detektionssysteme [FSA,2010]

In Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, Technischer Aufsichtsdienst, Dynamostr. 7-9, 68165 Mannheim, hat die R+V Allgemeine Versicherung AG in Wiesbaden einen Anforderungskatalog an CO-Detektionssysteme für Sprühtürme in der Milchwirtschaft aufgestellt. [BGN,1999]

Die Umgebungs- und Einsatzbedingungen in Sprühtrocknern und in Getreidetrocknern unterscheiden sich jedoch.

Die Abluft ist mit Feuchtigkeit nahezu gesättigt. Ferner sind in der Abluft Staubbestandteile vorhanden, die in Kombination mit Feuchtigkeit die Messtechnik „verkleben“. Beachtet werden muss zudem die zuvor genannte Strähnenbildung und Grundlast durch die direkte Befeuernng.

Im Gegensatz zu Milchsprühtürmen sind Getreidetrocknungsanlagen deutlich kostengünstiger in der Anschaffung.

Dies macht es schwer, kostenintensive Messgastechnik mit aufwendiger Messgasreinigung vom Betreiber einzufordern. Ferner muss das Instandhaltungserfordernis in Relation zum Bedienungspersonal gehalten werden.

D.3: Versuchsbetrieb: Brandgas-Detektionssystem während der Maistrocknung

Ort: Landwirtschaftliche Bezugsgenossenschaft EG Damme, Standort Steinfeld

Datum: 28.10.2014

Beteiligte: GTE: J. Kelleter; R+V: T. Brüning

Ausfertigung des Berichts [KELLETER,2014]: Dr. Kelleter, 30.10.2014, überarbeitet 03.11.2014

Neuer Prototyp mit Ansaugung und Spülung

Zur Vermeidung von Kondensationseffekten wurden zwei Prototyp-Messboxen aufgebaut, die die Pumpen zur Ansaugung und Rückspülung sowie die je 4 Halbleitergassensoren des GSME Melders enthalten.

Tabelle D.4: Messablauf [KELLETER,2014]:

Zeit (Sekunden)	Funktion	Hinweise
0	Druck - Spülen	Verunreinigungen aus der Leitung werden ausgeblasen
6	Ruhe	Die Sensoren werden regeneriert / ein neuer Nullpunkt wird festgelegt
30	Ansaugen	Es wird so lange angesaugt, bis Luft aus dem Trockner an den Sensoren ankommt.
35	Pause / Messung	Die Sensorsignale werden zeitaufgelöst erfasst.

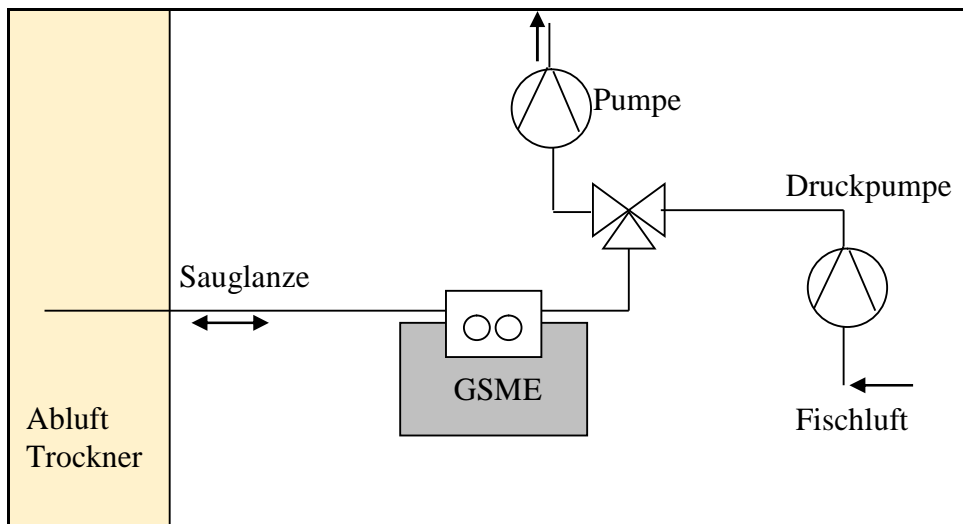


Bild D.33: Schematischer Aufbau Prototyp [KELLETT,2014]

Anordnung:

Absaugung aus der Trocknerabluft nach dem Ventilator mit Hilfe einer Lanze (Außendurchmesser 6 mm, 5 Bohrungen je 2 mm)

Messmodus: 5 s Saugen, 25 s Pause, 6 s Spülen, 24 s Pause.

Sensoren: H₂, CO, Kohlenwasserstoffe KW (phenolische), KW (ungesättigte)

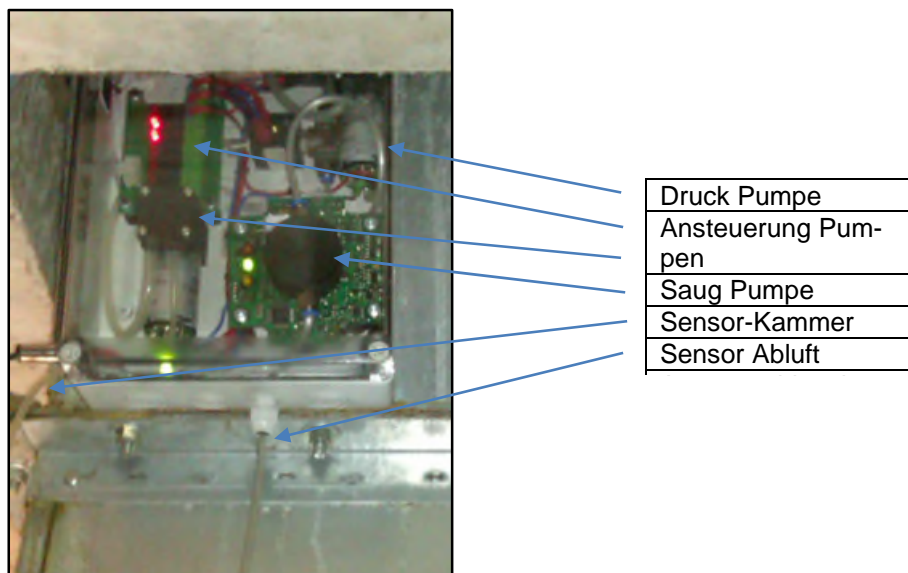


Bild D.34: Ansicht Prototyp [KELLETT,2014]

Chronologie der Trocknungskampagne (Dokumentation vor Ort) und Versuchsablauf:

Fr. 10.10.2014 Beginn der Trocknungskampagne (Mais)

Sa. 18.10.2014

ca. 02.00 Uhr Beenden der Trocknung, Nachkühlen, Produkt verblieb in den Säulen

ca. 04.00 Uhr Nachkühlen beendet, Abluftventilatoren abgeschaltet

Mo. 20.10.2014 Einbau Brandgasdetektion in beide Trockner in Steinfeld

Mo. 27.10.2014

13.28 Uhr Verladung von Kalk, für ca. 15 min; Ohne Einfluss

ca. 14.00 Uhr Wiederaufnahme der Trocknung

ca. 21.30 Uhr Beenden der Trocknung, Nachkühlen, Produkt verblieb in den Säulen

ca. 23.30 Uhr Nachkühlen beendet, Abluftventilatoren abgeschaltet

Di. 28.10.2014

ca. 06.00 Uhr Wiederaufnahme der Trocknung

ca. 10.15 Uhr Versuchsbeginn mit der Verschwelung von Mais mit Einleitung in die Abluft von Trockner „neu“

10:15 Uhr Start Schwelversuch Trockner „neu“

10.22 Uhr Sichtbare Rauchentwicklung

10.51 Uhr Abschalten der Heizeinrichtung, nachglimmen

11.31 Uhr Versuchsbeginn mit der Verschwelung von Mais mit Einleitung in Undichtigkeiten von Trockner „alt“

11.35 Uhr Sichtbare Rauchentwicklung

12.07 Uhr Abschalten der Heizeinrichtung, nachglimmen

Einbau der Sensorbox:

Die Position der Box wurde zu Beginn ungünstig gewählt. Da sich die Sensoren am unteren Ende des Ansaugschlauches befanden, ist Kondenswasser tröpfchenweise in die Sensorkammer gelangt und hat sich dort angesammelt. Nach Umpositionierung, wie im Bild zu erkennen, befand sich die Sensorkammer dann oberhalb des Ansaugschlauches, so dass Kondenswasser direkt wieder ausgespült wurde und zurück in den Abluftstrom gelangte.

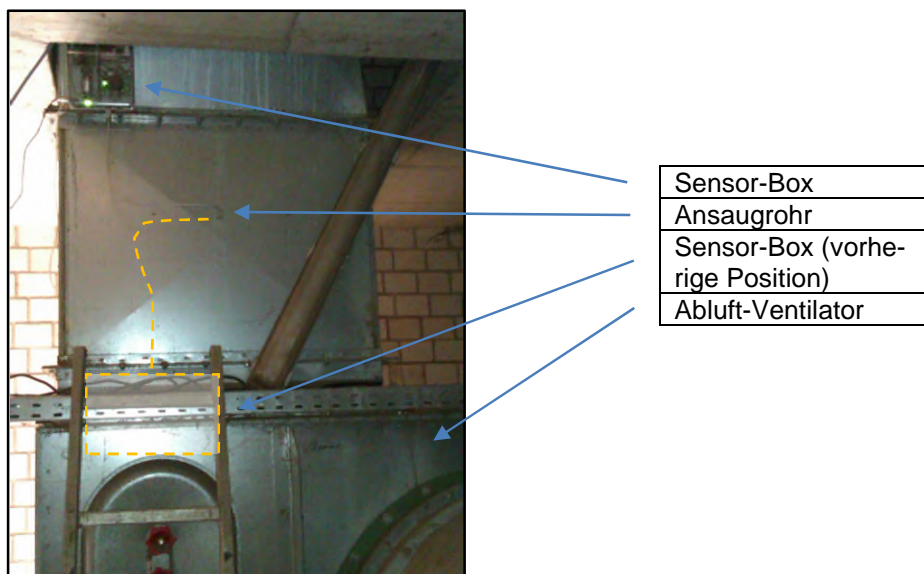


Bild D.35: Position der Sensorbox am „neuen“ Trockner [KELLETT,2014]

Die Position hier wurde trotz ungünstiger Position unterhalb des Ansaugrohres nicht verändert, da hier keine Kondensatbildung im Schlauchsystem beobachtet wurde. Dies kann sowohl an der erhöhten Temperatur in diesem Raum liegen als auch an der vermutlich höheren Luftdurchsatzmenge des Trockners.

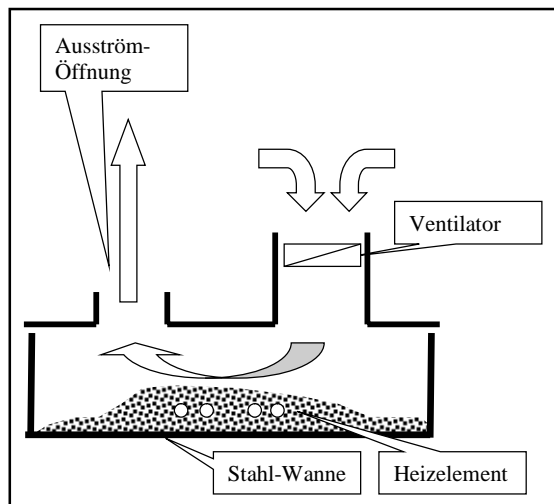


Bild D.36: Position der Sensorbox am „alten“ Trockner [KELLETT,2014]

Brandversuch

Material: ca. 2 kg Mais; vorgetrocknet, ca. 8 % Feuchtegehalt

Heizelement: 500 W Grillanzünder;



*Bild D.37: Ansicht/Schematischer Aufbau Box mit Schutzgitter und Ventilator
[KELLETT,2014]*



*Bild D.38: Einbringung des Brandrauches in den „neuen“ Trockner in die Nebenstrom-
Öffnung der Abluft-Seite [KELLETT,2014]*

Damit wird vermieden, dass die Brandgase einmal durch das „Produkt“ Mais durchströmen und dort partiell kondensieren.

Einbringung des Brandrauches in den „alten“ Trockner mit Hilfe von Undichtigkeiten in der Wandverkleidung. Ein Teil des Brandrauches wird aufgrund des Unterdrucks in den Luftstrom des Trockners gesaugt und gelangt dort weiterhin teilweise durch das Produkt. Bei diesem Versuch wurde auf die Abdeckung der Brandwanne verzichtet, da kein Funkenflug beobachtet wurde.

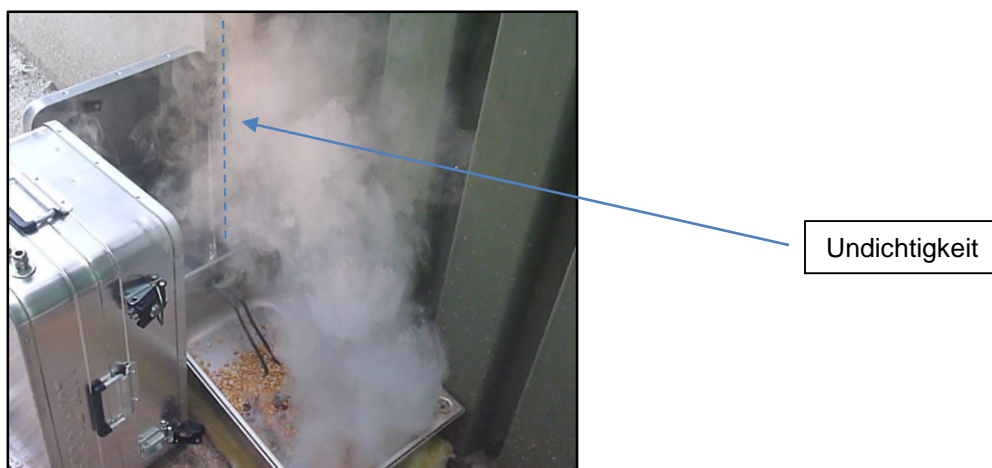


Bild D.39: Einbringung des Brandrauches in den „alten“ Trockner mit Hilfe von Undichtigkeiten in der Wandverkleidung [KELLETT,2014]

Alle Sensorsignale (auch die unverarbeiteten Rohsignale) werden mit Hilfe eines Laptop-Computers aufgenommen und gespeichert. Der Laptop verbleibt für die gesamte Versuchsphase am Standort.

Die Alu-Kiste schützt vor Staub.



Bild D.40: Datenaufnahme [KELLETT,2014]

Das Signal für KW (Kohlenwasserstoffe, phenolartige) ist weiterverarbeitet mit Hilfe folgenden Filters: Glättung der Amplitudendifferenz aus Ansaug- und Spülsignal; die Zeitkonstante der Glättung beträgt 5 Minuten.

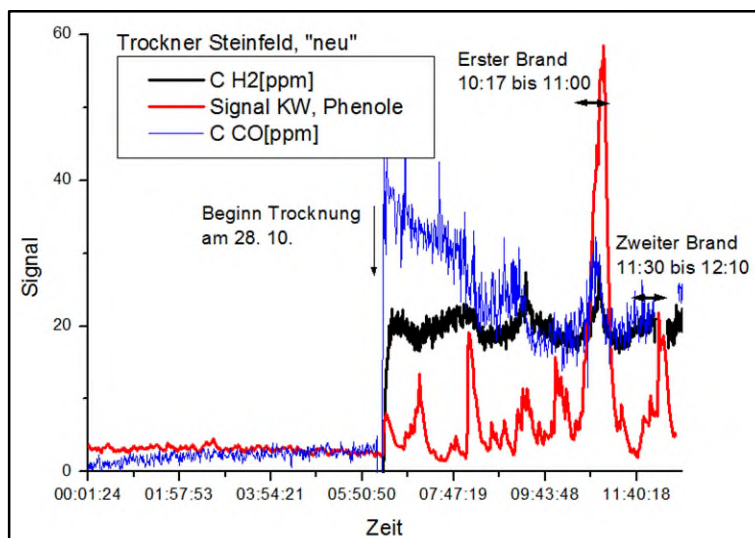


Bild D.41: Signale der Sensoren am 28.10.2014 der Sensorbox am „neuen“ Trockner [KELLETT,2014]

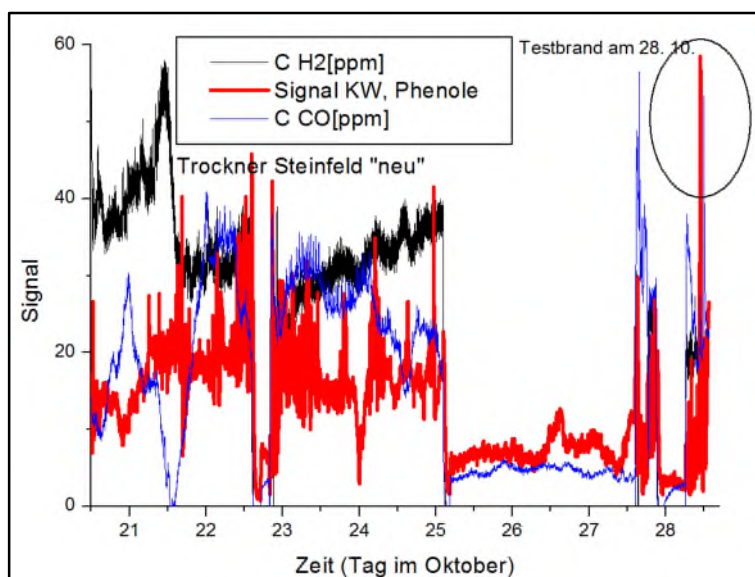


Bild D.42: Signale der Sensoren zwischen 21.10.2014 und 28.10.2014 der Sensorbox am „neuen“ Trockner [KELLETT,2014]

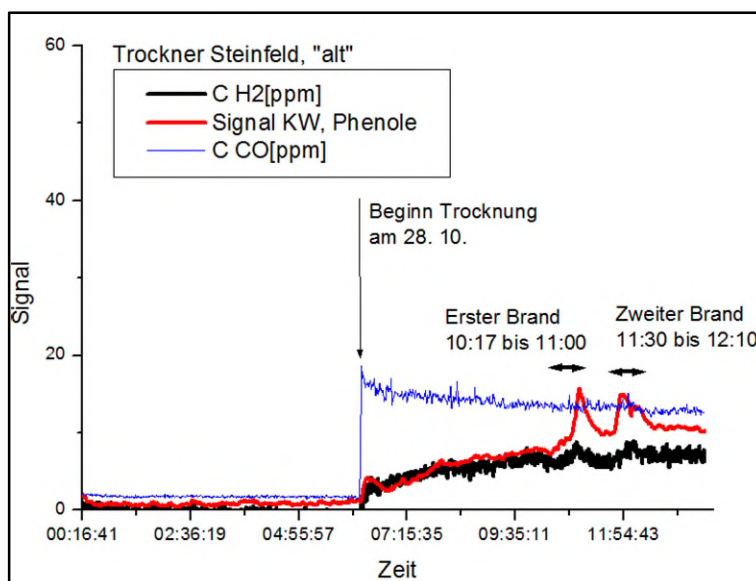


Bild D.43: Signale der Sensoren am 28.10.2014 der Sensorbox am „alten“ Trockner [KELLETT,2014]

Die abklingende Kurve symbolisiert die kontinuierliche Abnahme des Grades der Ausdünstung des Materials.

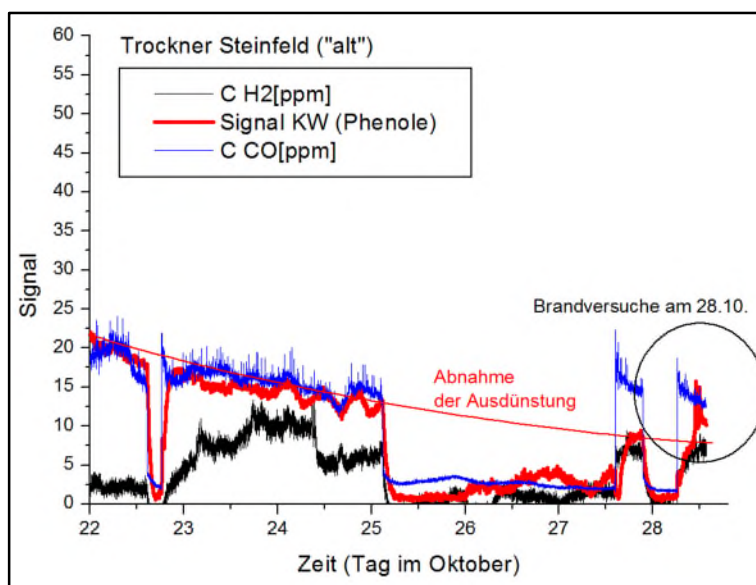


Bild D.44: Signale der Sensoren zwischen 21.10.2014 und 28.10.2014 der Sensorbox am „alten“ Trockner [KELLETT,2014]

Diskussion der Ergebnisse:

a) Signale während der Trocknung

Wenn der Brenner gestartet wird, werden die üblichen Flammenabgase CO und H₂ beobachtet. Die Signalhöhen bei dem neuen Trockner sind ca. doppelt so hoch wie beim alten Trockner. Weiterhin werden Signale des Kohlenwasserstoff-Sensors beobachtet. Diese sind für die Situation des Signalhintergrunds auf Ausdünstung des Getreides zurückzuführen.

Bei der Anordnung am neuen Trockner wird eine deutlichere Signalschwankung beim Kohlenwasserstoff-Signal beobachtet. Die Ursache hierfür kann in Kondenswassertröpfchen liegen, die ggf. in der Sensorkappe verdampfen. Die im Tropfen gelösten Bestandteile können ein solches Signal generieren. Ob dieser Effekt durch die geänderte Anordnung vermindert wird, ist noch nicht geklärt.

b) Signale während des Brandversuchs

Etwa 20 Minuten nach Einschalten des Heizelements werden erste Signalanstiege aufgrund der Testbrände verzeichnet. Die Signale steigen daraufhin stetig an; Bei Abbruch des Brandversuchs jeweils nach etwa 40 Minuten erreichen die Signale ihren Maximalwert.

c) Signale während des Stillstandes

Während des Stillstands liegen alle Signale nahe Null.

d) Situation mit Brand bei Stillstand

Diese Situation wurde noch nicht betrachtet. In der Übergangsphase wird immer zunächst der Brenner abgeschaltet, danach kühlt das Material bei laufender Ventilation ab. Während dieser Phase wird ein Brand erkannt.

Tabelle D.5: Zusammenfassung Situation am Tag der Testbrände 28.10 [KELLETT,2014].

	Sensor	Stillstand	Flammenabgas	Signal Testbrand
Trockner alt	CO	<5	20	kein Anstieg
	H ₂	<5	15	Anstieg um 3
	KW	<5	ca. 7 bis 10	Anstieg um 7
Trockner neu	CO	<5	30	Anstieg um 10
	H ₂	<5	20	Anstieg um 7
	KW	<5	ca. 10, Peak 20	Anstieg um 50

Schlussfolgerung:

In der vorliegenden Situation Getreidetrockner „Direkte Trocknung“ mit Abgas einer Gasflamme lässt sich ein Schwelbrand von Mais (Trocknungsgrad kleiner 10%) mit einer Abbrandrate von einigen 100 g pro Stunde gut detektieren.

Extrapoliert man dieses Ergebnis auf spätere zu erwartende höhere Abbrandraten, so wird ein ausreichend hohes Signal zum Hintergrund erzielt.

Nach der Testdauer von einer Woche im Regelbetrieb sind keine Beeinträchtigungen der Sensorik zu erkennen; Lediglich bei Kondenswasser zeigt sich ein Einfluss. Wird die Anordnung so geändert, dass das Kondenswasser ablaufen kann, sollte sich keine weitere Beeinträchtigung durch Kondensat einstellen.

Fragestellung:

Wie in den vorherigen Abschnitten dargestellt, ist eine Branddetektion mittels Gasanalyse und hinterlegter Alarmschwellen grundsätzlich möglich.

Bei dem durch Schadenereignisse am häufigsten betroffenen Trocknungsgut Mais zeigten Analysen der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, dass eine beachtliche Streuung der Werte von Trockenmasse, Rohasche, Rohprotein, Rohfett und z. T. der Rohfaser vorliegen, welche z. B. aus Sorte, Anbaugebiet, Erntezeitpunkt/Reifegrad resultieren.

Damit stellt sich nun die Frage, ob unterschiedliche stoffliche Eigenschaften eine signifikant differierende Emissionsrate an Zersetzungsstoffen erwarten lassen und somit signifikante Abweichungen zu erkennen sind, die bei den Alarmschwellen der Brandgasdetektion dahingehend zu berücksichtigen sind, dass im Rahmen der Brandgasdetektion Verzögerungen/ein Versagen der Systematik zu erwarten wäre.

Ziel ist demnach zu ermitteln, inwiefern sich unterschiedliche Maisproben in ihrem Brandverlauf und Emissionsraten unterscheiden.

D.4: Bestimmung von differierenden Emissionsraten von Mais

Resultierend aus den zuvor durchgeführten Realversuchen an Trocknungsanlagen zur Brandgasdetektion stellte sich die Frage, welchen Einfluss unterschiedliche Maissorten und Bestandteile des Trocknungsproduktes auf Emissionsraten der zu detektierenden Zersetzungsprodukte haben.

Da bereits in Vorversuchen im Labor dargelegt wurde, dass bei den Emissionsraten ein vergleichbares Niveau zu erwarten ist (siehe unten), so wurde die Frage dahingehend erweitert, inwiefern Differenzierungen in der Massenänderung (Abbrandverhalten) der einzelnen Bestandteile des Mais, bzw. seines Besatzes zu erwarten sind.

Hierfür wurden im Labor der Universität Wuppertal, der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik, Lehrstuhl Chemische Sicherheit und Abwehrender Brandschutz im Zeitraum vom Januar 2017 bis Februar 2017 entsprechende Versuche durchgeführt [TGA,2017].

Beschreibung Thermogravimetrische Analyse [DIN51006,2005]

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) ist eine analytische Methode bzw. Methode der thermischen Analyse oder Thermoanalytik, bei der die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur und Zeit gemessen wird. Die Probe wird dazu in einem kleinen Tiegel aus temperaturstabilem und inertem Material (z. B. Platin oder Aluminiumoxid) in einem Ofen auf Temperaturen bis zu 2.400 °C erhitzt. Der Probenhalter ist an eine Mikrowaage gekoppelt, welche die Massenänderungen während des Aufheizvorgangs registriert. Ein Thermoelement nah am Tiegel misst die Temperatur. Moderne TGA-Geräte erlauben über einen angeschlossenen Computer eine Einstellung der Endtemperatur, der Heizrate, des Gasstroms oder Ähnliches. Während der Analyse wird der Probenraum je nach Bedarf mit verschiedenen Gasen gespült. Meist verwendet man reinen Stickstoff, um eine Oxidation zu vermeiden (auf Vakuumdichtheit der gesamten Apparatur achten). In manchen Fällen wird jedoch auch mit Luft, Sauerstoff oder anderen Gasen gespült. Beim Erhitzen kann die Probe durch Zersetzungsreaktionen oder Verdampfen flüchtige Komponenten an die Umgebung abgeben oder aus der Umgebung z. B. durch Oxidation Reaktionspartner aufnehmen. Die Gewichtsab- bzw. -zunahme und die Temperatur, bei welcher die Gewichtsänderung stattfindet, kann spezifisch für eine untersuchte Probe sein. Daraus können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Stoffes gezogen werden.

Die Ergebnisse von Vorversuchen der reinen TGA/DSC-Messungen sind recht unauffällig – dazu wurden verschiedene Bestandteile (eine hellere Fraktion, vermutlich also größtenteils „Fruchtfleisch“, eine dunklere, eher grobe, vermutlich Schale etc.) des bereitgestellten und zuvor gemahlenen Maises mit einem käuflichen Maismehl verglichen, wobei keine allzu signifikanten Unterschiede auffielen [TGA,2017].

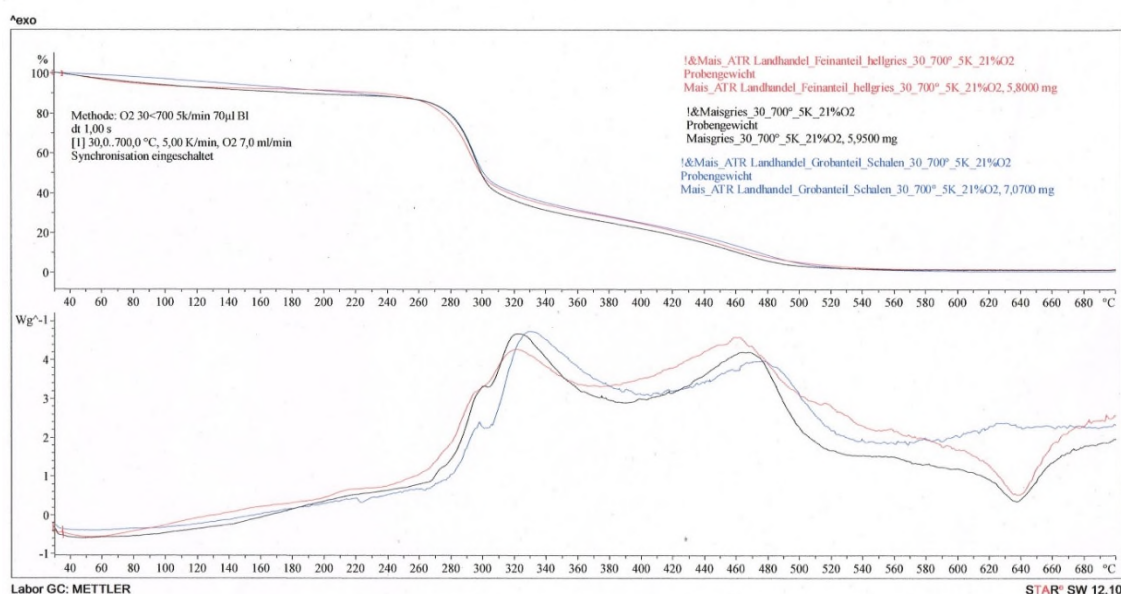


Bild D.45: Messschrieb Vorversuche fraktionierte Maisbestandteile [TGA,2017]

Im Hauptversuch wurde der Messprobenumfang erweitert und die Ergebnisse (mit eingeschalteter Synchronisation) visualisiert.

Messmethode:

Temperaturbereich 30 – 700 °C, bei Temperaturanstieg von 5 k/min, bei 7,0 ml O₂/min

Probenauswahl:

Es wurden Futtermittelmalsproben (Rückstellmuster aus der Futtermittelproduktion) aus unterschiedlichsten Anbauregionen Deutschlands, aus Osteuropa und als Referenzprobe Maismehl aus dem Einzelhandel ausgewählt.

Um Werte möglichst „nah“ an realistischen Bedingungen zu erhalten, wurden die Proben, die als Rückstellmuster erhalten wurden, ohne weitere Selektion (inkl. Spelzen, Anhaftungen, usw.) beprobt.

Ergebnisse [TGA,2017]:

Tabelle D.6: Maisgries [TGA,2017]

Kurvenname: !&Maisgries_30_700°_5K_21%O2				
Probengewicht:		5,9500 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-59,02 %	-3,51 mg	29,55 %	1,76 mg
	Stufe		Rückstand	
	-28,42 %	-1,69 mg	1,19 %	0.07079 mg

Tabelle D.7: Maisgries Referenz [TGA,2017]

Kurvenname: !&Maisgries_1_30_700°_5K_21%O2				
Probengewicht:		5,7500 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-60,50 %	-3,48 mg	30,31 %	1,74 mg
	Stufe		Rückstand	
	-30,15 %	-1,73 mg	0,16 %	0,00900 mg

Tabelle D.8: Mais ATR Landhandel Feinanteil hellgries [TGA,2017]

Kurvenname:				
!&Mais_ATR Landhandel_Feinanteil_hellgries_30_700°_5K_21%O2				
Probengewicht:		5,8000 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-58,04 %	-3,37 mg	32,32 %	1,87 mg
	Stufe		Rückstand	
	-30,78 %	-1,79 mg	1,54 %	0,08936 mg

Tabelle D.9: Mais ATR Landhandel Feinanteil hellgries Referenz [TGA,2017]

Kurvenname: !&Mais_ATRLandhandek_Feinanteil_hell_1_30_700°C				
Probengewicht:		5,8900 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-58,16 %	-3,43 mg	34,86 %	2,05 mg
	Stufe		Rückstand	
	-32,93 %	-1,94 mg	1,92 %	0,11000 mg

Tabelle D.10: Mais ATR Landhandel Grobanteil Schalen [TGA,2017]

Kurvenname:				
!&Mais_ATR Landhandel_Grobanteil_Schalen_30_700°_5K_21%O2				
Probengewicht:		7,0700 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-56,31 %	-3,98 mg	33,14 %	2,34 mg
	Stufe		Rückstand	
	-32,49 %	-2,30 mg	0,70 %	0,04980 mg

Tabelle D.11: Mais ATR Landhandel Grobanteil Schalen Referenz [TGA,2017]

Kurvenname:				
!&Mais_ATR Landhandek_Grobanteil_Schalen_1_30_700°C				
Probengewicht:		7,2800 mg		
Resultate:	Stufe		Rückstand	
	-57,55 %	-4,19 mg	33,94 %	2,47 mg
	Stufe		Rückstand	
	-32,65 %	-2,38 mg	1,24 %	0,00902 mg

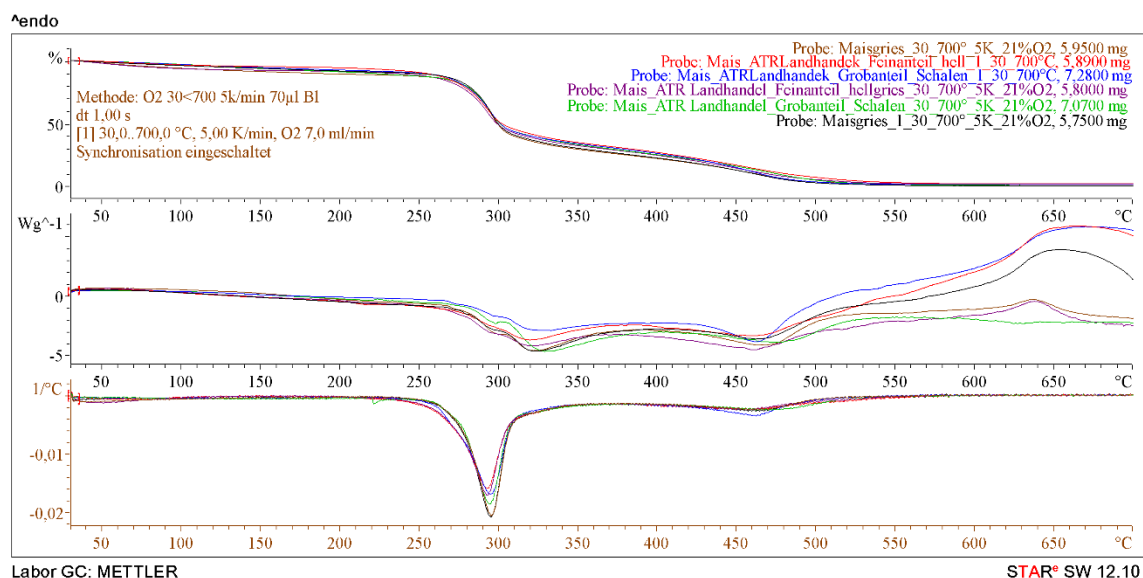


Bild D.46: synchronisierter Messschrieb Versuche Maisproben [TGA,2017]

Erkenntnisse der TGA Versuche:

1. Mais ist an sich relativ inhomogen, sodass Unterschiede zwischen einzelnen Sorten von den Unterschieden zwischen einzelnen Proben überlagert werden (z. B. Probenmasse, -dichte, Mahlgrad...). Die Unterschiede zwischen Maissorten dürften damit nicht bedeutsam genug sein, um eine vollständige Veränderung der Brandgase hervorzurufen, zumal im Realbrandfall neben mehreren Gramm Mais ebenfalls Spelzen o.ä. brennen werden, somit ohnehin ein „statistischer“ Brandrauch zustande kommen dürfte.
2. Mais verbrennt in 2 differenzierbaren Stufen, wobei in der ersten Stufe der hauptsächliche Gewichtsverlust stattfindet. Die Energieausbeuten (mittlere Kurve) sind eher gering, sind jedoch bei beiden Verbrennungsstufen etwa gleich ausgeprägt. Der Kurvenverlauf ab 500 °C geht auf vernachlässigbare Messfehler zurück, da gleichzeitig keine Gewichtsveränderung mehr auftritt. Genaue Energiewerte sind ohnehin mit dieser Methodik nicht zu bestimmen, da aufgrund der notwendigen Ausheiztemperaturen temperaturresistente Aluminiumoxidtiegel genutzt wurden, die nur schlecht Wärme leiten und somit das Ergebnis verfälschen. Die unterste Kurve dient der Veranschaulichung der genauen Bereiche der Massenveränderung, es handelt sich um die 1. Ableitung der TG-Messkurve (Bild D.46).

Fazit:

Entsprechend der Auswertung der durchgeführten Laborversuche unterschiedlicher Maisbestandteile, kann davon ausgegangen werden, dass die zu erwartende Bandbreite der Pyrolysegasemissionsraten in einem sehr geringen Bereich liegen.

Betrachtet man die tatsächliche Zusammensetzung (Mais / Besatz / Störstoffe) des im Brandfall betroffenen Trocknungsgutes und des stetig fortschreitenden Brandverlaufes, (wie in den zuvor analysierten Schadenfällen aufgezeigt) ist der Einfluss der jeweiligen unterschiedlichen Trocknungsgüter einer Sorte bei der Alarmgrenzwertfestlegung nicht zu berücksichtigen.

Anhang E – Dimensionierung Löscheinrichtung Trocknungsanlage

Kommt es zu einem Brand innerhalb einer Trocknungsanlage, so sind neben geeigneten Branderkennungseinrichtungen wirksame Möglichkeiten der Brandbekämpfung vorzusehen.

Eine manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr scheidet auf Grund der geschlossenen Bauweise aus, da bei einem Außenangriff kein Löschwasser zum eigentlichen Brandherd im Inneren gelangen kann. Die Entscheidung zur Durchführung eines Innenangriffes obliegt dem Einsatzleiter und wird (so belegen es die aufgeführten Schadenfälle aus *Anhang A*) auf Grund der Enge innerhalb der Trocknungsanlage und der Eigengefährdung der Einsatzkräfte zumeist nicht durchgeführt.

Um den zu Hilfe gerufenen Einsatzkräften eine effektive Brandbekämpfung bei möglichst geringer Eigengefährdung zu ermöglichen, sind an Trocknungsanlagen fest verbaute Lösch(hilfs-)einrichtungen erforderlich.

Bereits im Jahr 2004 wurde an einer Trocknungsanlage erprobt, ob eine Flutung der Trocknungssäule für Löschzwecke möglich ist und welche Durchfeuchtung zu erwarten ist (*Anhang E.1*).

Aus Sachwertschutzaspekten sind Lösch(hilfs-)einrichtungen so zu dimensionieren, dass nach einer Branderkennung die Brandausbreitung innerhalb der Trocknungsanlage verhindert sowie die Trocknerkonstruktion vor thermischer Schädigung geschützt wird, um Unterbrechungszeiten für erforderliche Reparaturen möglichst kurz zu halten.

Anhand der aufgeführten Schadenbeispiele aus *Anhang A* und der Erkenntnisse zum Entzündungs- und Abbrandverhalten aus *Anhang B* werden folgende Parameter beim Brand einer Trocknungsanlage zugrunde gelegt:

- Feuchtigkeitsgehalt des Trocknungsgutes: Brände entstehen zumeist im Übergangsbereich zwischen Trocknungs- und Kühlzone. In diesem Bereich der Trocknungsanlage weist das Trocknungsgut bereits eine Feuchtigkeit um 15% auf.
- Brandausbreitung: Ein Brand in der Trocknungssäule breitet sich in Richtung der Luftströmung radial und somit trichterförmig aus.
- Luftführung: Solange die Anlage nicht thermisch zerstört ist, erfolgt eine an jeder Stelle der Trocknungssäule gleichmäßige Durchströmung des Trocknungsgutes.

Anhand dieser Parameter wird folgend die theoretisch erforderliche Wasserbeaufschlagung abgeschätzt und in Abhängigkeit der Trocknergeometrie ausgelegt. Auf dieser Grundlage wird validiert, inwiefern der ermittelte Löschwasserbedarf nach den regional technischen Möglichkeiten des abwehrenden Brandschutzes erbracht werden kann.

E.1: Flutungsversuch einer Trocknungssäule

Im März 2004 führte die R+V Allgemeine Versicherung AG einen Löschversuch eines Getreidetrockners unter realitätsnahen Bedingungen durch [WEINS,2004]:

Versuchsdaten zum Trockner:

Bei dem Trockner handelt es sich um einen indirekt beheizten Happle Trockner mit einer Füllkapazität von ca. 4 Tonnen. Der Trockner steht im Gebäude ohne bauliche Abtrennung und erstreckt sich vom Erdgeschoß über zwei Etagen.



Bild E.1: Blick auf Kaskaden [WEINS,2004] Bild E.2: Befüllrohranschluss [WEINS,2004]

Versuchsaufbau:

Der Trockner wurde mit 4 Tonnen Weizen befüllt.

Nach Demontage des Befüllrohres wurde die Öffnung dazu benutzt, über einen C-Schlauch direkt Löschwasser einzubringen. Da sich der Befüllrohranschluss im Trocknerkopf symmetrisch zu beiden Seiten teilt, konnte auf ein perforiertes Rohrteil zur gleichmäßigen Wasserverteilung im Trockner verzichtet werden.



Bild E.3: Löschwassereintrag [WEINS,2004]

Die Wassereinspeisung erfolgte von einem Tanklöschfahrzeug der Freiwilligen Feuerwehr über die Trockensteigleitung im Treppenhaus.

Für das Austragen des durchfeuchteten Weizens wurde ein Förderband unter das Ausfallrohr des Trockners gestellt. Das Getreide wurde vom Förderband in einen bereitgestellten Container, der an der Rampe des Gebäudes aufgestellt war, entsorgt.



*Bild E.4: Trocknungsgut- und
Löschwasseraustrag [WEINS,2004]*



*Bild E.5: Trocknungsgutabfuhr in Mulde
[WEINS,2004]*

Versuchsablauf

Nach dem Befüllen des Trockners mit Weizen wurde unter Beachtung der Zeit und der Wasserrate bis zum Durchlauf des Löschwassers am Fuß des Trockners der Versuch gestartet.

Dabei wurden folgende Daten festgehalten:

- Durchlaufzeit des Löschwassers zur 1. Kaskade: 2 Minuten
- Gesamtdurchlaufzeit bis Wasseraustritt zum Auslass am Trocknerfuß: 4 Minuten
- Verbrauchte Wassermenge mit kompletter Durchfeuchtung des Trockengutes:
1300 Liter bei 3 bar → 325 l/min bei 3bar

Ergebnisse

Der Löschversuch hat gezeigt, dass in kurzer Zeit eine Durchfeuchtung mit einer relativ geringen Wassermenge möglich ist.

Im Brandfall kann davon ausgegangen werden, dass je nach Trocknergröße und der entsprechenden Wasserrate die Ausbreitung des Brandes verhindert und die metallische

Konstruktion thermisch entlastet wird. Insbesondere bei dem am häufigsten vorkommenden Trockengut Mais wird der Wasserdurchlauf im Trockner noch beschleunigter vorstattengehen, da die Schüttguldichte geringer ist als bei der Getreidetrocknung.

Es hat sich auch gezeigt, dass unmittelbar nach Abschluss des Löschversuches der Austrag des Trockengutes über die Austragschurre keine Schwierigkeiten ergab.

Es ist aber erforderlich, dass spätestens unmittelbar nach Ende der Flutung dafür Sorge getragen werden muss, sofort mit dem Austragen des Trockengutes aus dem Trockner zu beginnen, da sonst die Gefahr eines Aufquellens besteht und das Austragen nicht mehr einwandfrei möglich ist.

Statische Belastung:

Durch die Wasserbeaufschlagung darf nicht die Standsicherheit des Trockners gefährdet werden. Zwar ist ein Getreidetrockner ein gewissermaßen „offenes System“, jedoch bedarf es einer gewissen Zeit, wie der Versuch belegt, bis das Löschwasser durch die Kaskaden und das Trocknungsgut bis zum Austrag geflossen ist. Wird parallel mit der Löschwassereinspeisung der Austrag begonnen, so kann die zusätzliche statische Belastung durch das Löschwasser begrenzt werden. Wird nun berücksichtigt, dass die Trocknungsanlage zu Beginn der Trocknung mit feuchtem (und somit „schwerem“) Material befüllt wird und zum Zeitpunkt des Brandausbruches bereits eine Gewichtsabnahme durch Feuchtigkeitsentzug des Trocknungsgut erfolgte, so ist die statische Belastung durch Löschwassereintrag als gering zu erachten.

Nicht zuletzt das Brandereignis des Trockners in O. (*Anhang A*) zeigte, dass eine Flutung der Trocknungssäule praktikabel ist. Dort war eine stationäre Löschleitung an das Hauswassernetz angeschlossen und konnte bei Branderkennung ohne Verzögerung in Betrieb gesetzt werden.

Nach dem ersten Brandschaden wurde seitens des Betreibers die Wasserbeaufschlagung noch weiter erhöht, um eine noch schnellere Flutung der Trocknungssäule zu erreichen.

E.2: Brandlastbestimmung und Wärmefreisetzungsrate

Für die Bemessung einer Lösch(hilfs-)einrichtung ist auf Grundlage der vorliegenden Brandlast die zu erwartende Wärmefreisetzungsrate (Heat Rate Release –HRR) zu ermitteln.

Dementsprechend gilt es einen Bemessungsbrand zu definieren, auf dessen Grundlage die Dimensionierung der Löschanlage abgestimmt wird.

Wie in *Anhang B* dargelegt, kann auf Grund der geschlossenen Bauweise der Trocknungsanlage und der maschinell erzwungenen Luftdurchströmung des Trocknungsgutes von einem ventilationsgesteuerten Brand ausgegangen werden. Eine natürliche Nachströmung von Umgebungsluft ist bei unbeschädigter Trocknungsanlage nicht gegeben. Ferner ist ein „freier Luftstrom“ innerhalb des Trocknungsgutes analog einer Siloschüttung gering.

Zwischen dem Heizwert organischer Brandlasten und dem stöchiometrischen Luftbedarf besteht ein mathematischer Zusammenhang. Dieser Zusammenhang gilt sowohl für die vollständige als auch für die unvollständige Verbrennung. Die Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate – HRR) ist dabei linear und beträgt [VFDB41,2020]:

$$\dot{Q}_{max,v} [MJ/s \text{ oder } MW] = \dot{m}_L * E_L * \chi_{O_2} \quad (E.2.1)$$

mit: \dot{m}_L = Zuluftmassenstrom [kg/s]
 E_L = Wärmefreisetzungsconstante Luft = 3,03 MJ/kg_L
 χ_{O_2} = Sauerstoffnutzungsgrad bei Vollbrandphase: max. 0,89

und: \dot{m}_L ist abhängig von der Zulufttemperatur

$$\dot{m}_L = \rho * \dot{V}, \quad (E.2.2)$$

mit ρ bei atmosph. Druck von 1013,25 hPa und 20°C = 1,20 kg/m³

wenn Zuluft 120°C:

$$\rho_{120^\circ C} = \frac{p}{R * T_{120^\circ C}} = \frac{101325 \text{ kg} * \text{kg} * \text{K} * \text{s}^2}{287,05 \text{ kg} * \text{m}^2 * 393,15 \text{ K} * \text{m} * \text{s}^2} = 0,90 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (E.2.3)$$

In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Branderkennung und dem Einleiten von Löschmaßnahmen wird sich der Brand innerhalb der Trocknungsanlage unterschiedlich weit entwickelt haben. Auf dieser Grundlage werden die in Brand geratenen Trocknungsgutvolu-

mina (V_{Brand}) beispielhaft definiert und entsprechende Anströmflächen in Form der radialen Brandausbreitung in Abluftrichtung (Kreiskegel) ermittelt. Da die Lösch(hilfs-)einrichtung oberhalb des Trocknungsgutes im Trocknerkopf angeordnet ist und das Wasser der Schwerkraft folgend das Trocknungsgut durchdringt, ist dem in Brand geratenen Volumina eine zugehörige Fläche (gleichschenkliges Dreieck) zuzuordnen.

Entsprechend dem *Anhang B* beträgt die Strömungsgeschwindigkeit der Luft innerhalb der Schüttung 0,3m/s. Damit die zugeführte und auch abgeführte Luft die gleiche Strömungsgeschwindigkeit aufweist, müssen die Zu- und Abluftflächen gleich groß sein. Dichteänderungen durch z. B. Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung bleiben an dieser Stelle für die überschlägige Abschätzung unberücksichtigt.

Damit gilt geometrisch bei einer trichterförmigen radialen Brandausbreitung näherungsweise:

$$A_{\text{Anströmfläche}} = A_{\text{Abströmfläche}}, \text{ wobei } A_{\text{Anströmfläche}} + A_{\text{Abströmfläche}} = \text{Oberfläche}_{\text{Kreiskegel}} \quad (\text{E.2.4})$$

$$O_{\text{Kreiskegel}}[\text{m}^2] = \pi * r * (r + s) \quad (\text{E.2.5})$$

$$\text{mit } s = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (\text{E.2.6})$$

$$\text{mit } h = 2 * r \quad (\text{E.2.7})$$

Daraus ergibt sich:

$$A_{\text{Anströmfläche}}[\text{m}^2] = \frac{1}{2} \pi * r * (r + \sqrt{5r^2}) = A_{\text{Abströmfläche}} \quad (\text{E.2.8})$$

Das (in Brand geratene) Volumen eines Kreiskegels beträgt:

$$V [\text{m}^3] = \pi * r^2 * h \quad (\text{E.2.9})$$

$$\text{mit } h = 2 * r \quad (\text{E.2.7})$$

Die (Wasserbeaufschlagungs-)Fläche des (in Brand geratenen) Volumens eines Kreiskegels beträgt:

$$A [\text{m}^2] = 2 * r^2 \quad (\text{E.2.10})$$

Anhand der beispielhaft gewählten in Brand geratenen Volumina (V_{Brand}) ergeben sich folgende maximale Wärmefreisetzungsraten (HRR_{max}) sowie flächenbezogene Wärmefreisetzungsraten (HRR_A):

Tabelle E.1: Übersicht der HRR_{max} (\dot{Q}_{max}) und HRR_A (\dot{Q}_A)

Branderkennung	V_{Brand}	r	Anströmfläche Luft	HRR_{max}	A_{Brand}	HRR_A
früh	0,1 m ³	0,25 m	0,32 m ²	0,24 MW	0,13 m ²	1,85 MW/m ²
mittel	1 m ³	0,54 m	1,49 m ²	1,09 MW	0,59 m ²	1,85 MW/m ²
spät	10 m ³	1,17 m	6,94 m ²	5,04 MW	2,73 m ²	1,85 MW/m ²

Da eine mathematische Abhängigkeit der Anströmfläche zur Berechnung der HRR_{max} und der flächenmäßigen Wasserbeaufschlagung zum Radius (r) gegeben ist, ist HRR_A konstant mit 1,85 MW/m² bzw. 1,85 MJ/m²s.

E.3: Wärmekapazität von Löschwasser

Zur Berechnung der erforderlichen Wasserbeaufschlagung ist die spezifische Wärmekapazität c des Wassers zu berücksichtigen.

$$c_{Wasser} = 4,18 \frac{kJ}{kg * K} \text{ (bei } 20^\circ C \text{)}$$

Hinzu kommt bei der Berechnung der möglichen Energiebindung durch Wasser bei der Brandbekämpfung die Verdampfungsenthalpie. Hierunter seien die Wärmemengen oder genauer Enthalpien ΔH verstanden, die bei den sogenannten Phasenübergängen auftreten, z. B. Verdampfen. Bei diesen Phasenumwandlungen findet der Wärmeaustausch ohne Temperaturänderung statt, bis die Umwandlung vollständig ist.

$$\Delta H_{Wasser} = 40,65 \frac{kJ}{mol} \text{ (bei } p_n = 101325 Pa \text{)}$$

Umrechnung in $\frac{kJ}{kg}$ mit $M_{Wasser} = 18,02 \frac{g}{mol} = 0,01802 \frac{kg}{mol}$

$$\Delta H_{Wasser} = \frac{40,65 \frac{kJ}{mol}}{0,01802 \frac{kg}{mol}} = 2.255,83 \frac{kJ}{kg} \quad (E.3.1)$$

Somit ergibt sich eine gemittelte Wärmekapazität Q_{Wasser} (mit folgenden Annahmen):

- Der entstandene Wasserdampf nimmt keine weitere Energie auf, da dieser durch die Luftführung sofort nach seiner Entstehung abgeführt wird.
- Im Jahresdurchschnitt wird eine gemittelte Wassertemperatur von 7 °C angenommen und die Wärmekapazität wird über das Temperaturspektrum bis zum Phasenwechsel als konstant angenommen.
- Dichte Wasser = $1 \frac{kg}{Liter}$

$$\begin{aligned} Q_{Wasser} &= (\Delta T * c_{Wasser}) + \Delta H_{Wasser} && \text{(E.3.2)} \\ &= \left(93 * K * 4,18 \frac{kJ}{kg * K} \right) + 2.255,83 \frac{kJ}{kg} \\ &= 2.644,57 \frac{kJ}{kg} = \mathbf{2,65 \frac{MJ}{kg}} \end{aligned}$$

E.4: Dimensionierung der Löschwasserbeaufschlagung

Ziel der Einbringung von Löschwasser in die Trocknungssäule ist die Verhinderung der Brandausbreitung sowie thermischen Schädigung der Trocknerkonstruktion.

Da ein Brand an jeder Stelle innerhalb der Trocknungssäule auftreten kann, ist eine gleichmäßige Löschwasserbeaufschlagung über die gesamte Fläche der Trocknungssäule erforderlich.

Anhand der Schadenfälle aus *Anhang A* ist ersichtlich, dass nie das gesamte Trocknungsgut gleichzeitig vom Brand betroffen ist. Demnach kann bei einem Brand die Löschwasserbeaufschlagung in folgende Bereiche unterteilt werden:

- Nicht-Brandbereich: Bereiche, die einen so großen räumlichen Abstand aufweisen, dass sie weder durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Konvektion vom Brandereignis betroffen sind
- Indirekter Brandbereich: Bereiche, die durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Konvektion eine thermische Aufbereitung erfahren, aber noch nicht entzündet sind und keine Wärme freisetzen
- Direkter Brandbereich: Im direkten Brandbereich beträgt die maximale Wärmefreisetzungsrate bezogen auf die Wasserbeaufschlagungsfläche einer Wasserlöschanlage 1,85 MJ/m²s

Um eine Brandausbreitung vom direkten Brandbereich auf indirekte bzw. (noch) nicht in das Brandgeschehen involvierte Bereiche zu verhindern, ist die Wasserbeaufschlagung mindestens auf die zuvor genannte flächenbezogene maximale Wärmefreisetzungsrate auszulegen. Dabei muss die Wasserbeaufschlagung [Liter/m² min] resultierend aus der Wärmekapazität des Wassers größer/gleich der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate sein.

$$Q_{Wasser} = 2,65 \frac{MJ}{l}; \dot{Q}_A = 1,85 \frac{MJ}{m^2s}$$

$$\text{Mindestwasserbeaufschlagung} = \frac{\dot{Q}_A}{Q_{Wasser}} \quad (\text{E.4.1})$$

$$= \frac{1,85 \frac{MJ}{m^2s}}{2,65 \frac{MJ}{l}} = 0,70 \frac{l}{m^2s} = \mathbf{42,00} \frac{l}{m^2min}$$

In Abhängigkeit der Geometrie, bzw. der daraus resultierenden Fläche der Trocknungssäule ist auf Grundlage der Mindestwasserbeaufschlagung der erforderliche Löschwasserbedarf zu ermitteln. Für folgende beispielhafte Geometrien ergibt sich:

Tabelle E.2: Beispiel Löschwasserbedarf in Bezug zur Trocknergeometrie

Geometrie	maximale Tiefe [m]	maximale Breite [m]	Fläche Trocknungssäule	Löschwasserbedarf
A	2,4	2,4	5,76 m ²	242 l/min
B	2,4	4,8	11,52 m ²	484 l/min
C	2,4	7,2	17,28 m ²	726 l/min
D	2,4	9,6	23,04 m ²	968 l/min

Wie der Versuch aus *Anhang E.1* zeigt, stellt sich auf Grund der Bauform eines Dächer-schachtrockners eine gleichmäßige Verteilung von Löschwasser auch bei punktueller Löschwasseraufgabe am Austrag ein. Um jedoch im Bereich des Eintrages schon eine gleichmäßige Löschwasserbeaufschlagung zu erreichen, sollte das Löschwasser nicht punktuell, sondern flächig verteilt eingebracht werden.

In Anlehnung an die VdS CEA 4001 [VDS4001,2021] kann eine gleichmäßige Wasser-beaufschlagung mittels Sprinklerköpfen realisiert werden. Diese sind jedoch ohne Auslö-seelement zu wählen.

Bei der Verwendung von Sprinklerköpfen sind jedoch einige Randparameter zu berück-sichtigen. Diese sind produktspezifisch und im Einzelfall abzugleichen.

Orientierend gilt [VDS4001,2021]:

Mindestdruck	1 – 3,50 bar
Maximaler Betriebsdruck	10 – 12 bar
Mindestabstand zw. Sprühteller und Lager-/Trockengut:	1 m
Mindestabstand zwischen Sprühteller und Wand:	1 m
Maximalabstand zwischen Sprühteller und Wand:	1,90 m

Maximal zulässige Schutzfläche A: 9 - 12 m²
 Maximaler Abstand zwischen den Sprinklern: 3,75 – 4,00 m

Der K-Faktor eines Sprinklers gibt die Wasserbeaufschlagung in der Schutzfläche A an. Diese errechnet sich aus:

$$Q = k * \sqrt{p} \tag{E.4.2}$$

mit Q = Ausflussrate in l/min,
 k = Konstante (K-Faktor) je Sprinkler,
 p = Druck in bar

Bei einer Schutzfläche von 9 m² und einem mittleren Druck von 6 bar ergibt sich eine Ausflussrate von 378 l/min. Als K-Faktor errechnet sich ein Wert von 155. Dementsprechend empfiehlt sich die Verwendung von K160 Sprinklern.

Tabelle E.3: Anzahl Sprinklerköpfe und Gesamtlöschwasserbedarf

Geometrie	Tiefe [m]	Breite [m]	Anz. Sprinkler	Gesamtlöschwasserbedarf (6 bar)
A	2,40	2,40	1	392 l/min
B	2,40	4,80	2	784 l/min
C	2,40	7,20	2	784 l/min
D	2,40	9,60	3	1176 l/min

E.5: Validierung der Dimensionierung der Lösch-(Hilfs)-Einrichtung auf Grundlage der örtlichen Brandbekämpfungsmöglichkeiten

Eine (allerorts gültige) Dimensionierung einer Lösch-(hilfs)anlage für Getreidetrocknungsanlagen setzt auch eine entsprechende örtliche Löschwasserversorgung voraus. In den Landesgesetzen zum Feuerschutz (z. B. im BHKG NRW §3 Abs. 2 [BHKG,2015]) heißt es: „Die Gemeinden treffen Maßnahmen zur Verhütung von Bränden. Sie stellen eine den örtlichen Verhältnissen angemessene Löschwasserversorgung sicher.“

Diese Löschwasserversorgung orientiert sich an der im DVGW-Arbeitsblatt W 405 [DVGW,2008] für den Grundschutz genannten Werte:

Tabelle E.4: Löschwasserversorgung nach DVGW Arbeitsrichtlinie W 405 [DVGW,2008]

Gefahr der Brandausbreitung	Wohngebiete / Dorfgebiete [m ³ /h]	Kerngebiete / Gewerbe [m ³ /h]	Industriegebiet [m ³ /h]
klein	48	96	96
mittel	96	96	192
groß	96	192	192

Auf Grund der teilweise sehr ländlichen Lage von Agrarbetrieben, in denen Trocknungseinrichtungen betrieben werden, ist somit nur mit einer Löschwasserversorgung derer in kleinen Dorfgebieten von 48 m³/h (entspricht 800 l/min) zu rechnen.

Diese kann über die öffentliche Trinkwasserversorgung oder über andere für die Löschwasserbevorratung/-entnahme geeignete Einrichtungen (z. B. Löschteich, Löschwasserbrunnen, Löschwasserzisterne) vorgehalten werden.

Ferner muss sich die Auslegung einer halbstationären Lösch(hilfs-)einrichtung an der Ausrüstung der Feuerwehr orientieren.

Als historisch „kleinste“ genormte Einheit im Bereich des abwehrenden Brandschutzes ist der sogenannte „TSA – Tragkraftspritzenanhänger“ noch mancherorts vertreten. Sicherlich zählt dieser heutzutage schon eher zu einer Rarität, jedoch kann das Vorhandensein einer „TS 8/8 – Tragkraftspritze mit 800 l Förderstrom pro min bei 8 bar Förderdruck“ allorts innerhalb einer gewissen Hilfsfrist angenommen werden. Heutige in Feuerwehrfahrzeuge eingebaute Feuerlöschkreiselpumpen übertreffen diese Werte.

Ein B-Druckschlauch hat einen Durchmesser von 75 mm und eine Durchflussmenge von max. 1000 l/min.

Da eine Wasserlieferung von 800 l/min Grundlage dieser Auslegung ist, muss die Löscheinrichtung einen B-Anschluss mit entsprechendem Durchmesser besitzen.

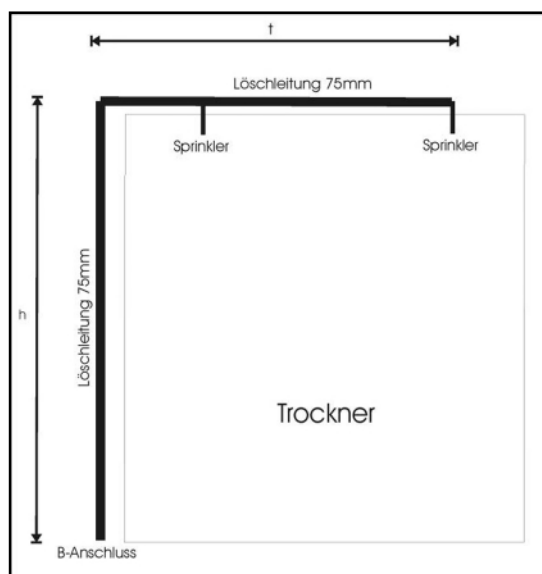


Bild E.6: Schematische Anordnung der Sprinklerköpfe in der Trocknersäule

h vertikaler Abstand B-Anschluss und Sprinklerkopf [m]

t horizontaler Abstand zwischen Steigleitung und letztem Sprinkler [m]

E.6: Fazit

Die Berechnungen der zu erwartenden Wärmefreisetzungsrates und der daraus abgeleiteten erforderlichen Wasserbeaufschlagung zeigen, dass bei Trocknungsanlagen mittels Lösch-(hilfs-)anlagen mit Sprinklerköpfen eine gleichmäßige Verteilung von Löschwasser zur Verhinderung der Brandausbreitung im Trocknerkopf erfolgen kann. In Abhängigkeit der Fläche der Trocknungssäule ist die Anzahl der Sprinklerköpfe bemessen.

Bei einem Druck von 6 bar und bei einer örtlichen Löschwasserversorgung von 800 l/min kann mit Hilfe der Feuerlöschkreiselpumpe der Feuerwehr die erforderliche Löschwasserbeaufschlagung für Trocknungsanlagen bis zu einer gewissen Größe sichergestellt werden.

Bei Trocknungsanlagen, deren Fläche der Trocknungssäule 18 m² überschreiten, muss entweder in Abstimmung mit der örtlichen Feuerwehr geprüft werden, ob auch eine erhöhte Löschwasseraufgabe im Einklang mit der örtlichen Löschwasserversorgung gewährleistet werden kann oder ob in Kauf genommen werden muss, dass eine reduzierte Löschwasserbeaufschlagung ggf. zu einer zeitlichen Verzögerung mit negativem Einfluss auf den Schutz der Trocknungsanlage hat.

Ohne eine Lösch-(hilfs-)einrichtung ist eine wirksame Brandbekämpfung durch die Feuerwehr nicht möglich.

Anhang F – Duktus Brandgefährdungsklassen und Schutzstufen

In diesem Anhang wird der Duktus der Zuordnung der Brandgefährdungsklassen zu den Schutzstufen sowie der zugehörigen Maßnahmen aus Kapitel 8 ergänzend als Handblatt aufgeführt.

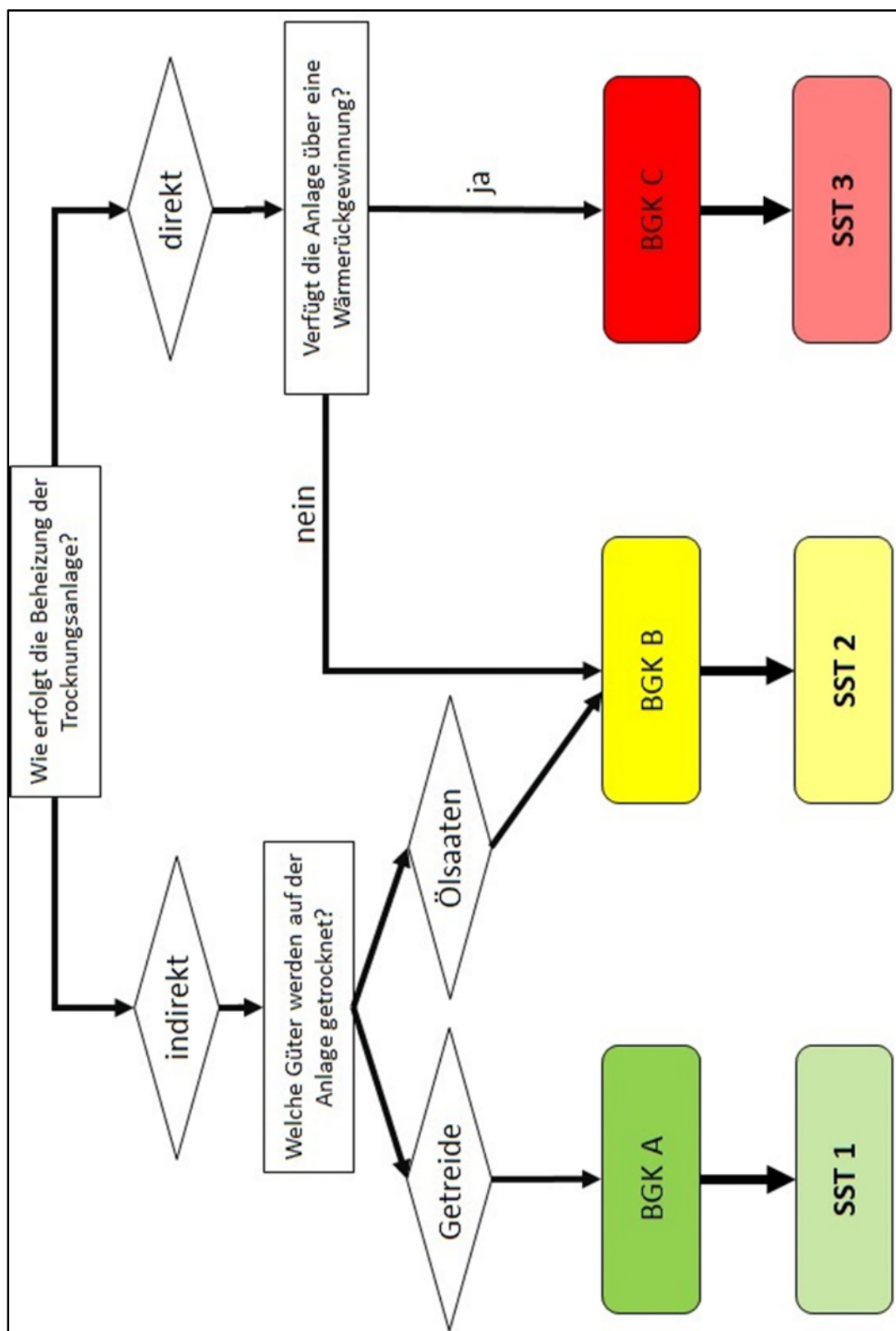


Bild F.1: Handblatt Entscheidungssystematik Brandgefährdungsklasse mit Zuordnung zu Schutzstufe

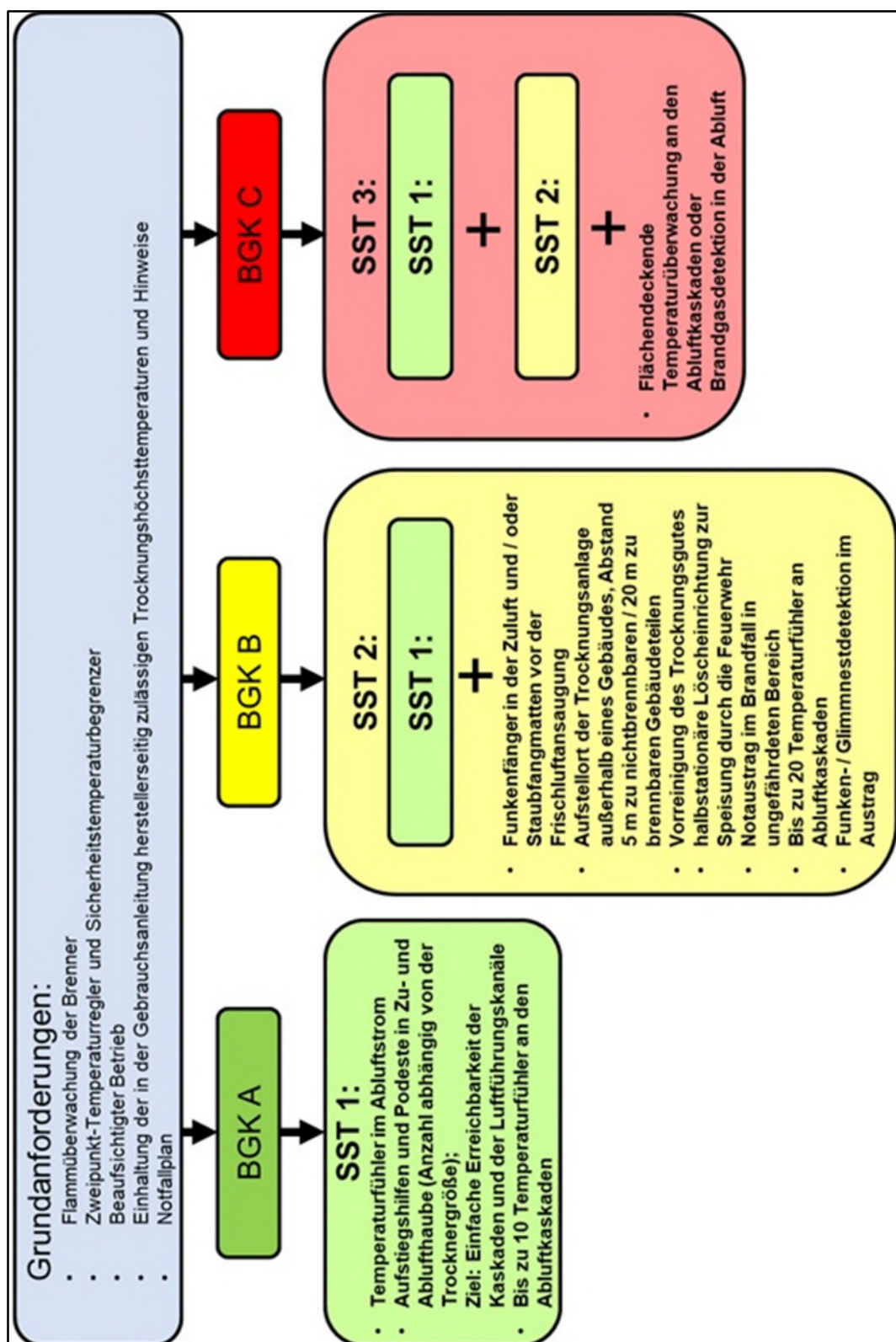


Bild F.2: Handblatt Visualisierung Maßnahmen additiv zu Schutzstufenerhöhung

Lebenslauf

Aus Gründen des Datenschutzes wurde der Lebenslauf der elektronischen Fassung entnommen.