



Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Masterarbeit



Brandschutz von Förderanlagen in der
Abfallwirtschaft

Daniel Erich Frühwirth, BSc

November 2020

Masterarbeit

Brandschutz von Förderanlagen in der Abfallwirtschaft

Datum(29/09/2020)

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Department Mineral Resources Engineering
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18
Tel.Nr.: +43 3842-402-2001
Fax: +43 3842-402-2002
bergbau@unileoben.ac.at

Daniel Frühwirth, BSc

Datum(29/09/2020)



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Department Mineral Resources Engineering
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18
Tel.Nr.: +43 3842-402-2001
Fax: +43 3842-402-2002
bergbau@unileoben.ac.at

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Vorwort, Widmung, Danksagung

Ohne eine große Anzahl an Verwandten, Bekannten und Freunden wäre der Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund möchte ich die Möglichkeit nutzen, und mich hier bei einigen bedanken.

An vorderster Stelle kommt natürlich meine Familie, die mir das lange Studium ermöglicht und mich stets unterstützt hat. Die wichtigste Stütze in meinem Leben stellt natürlich meine Freundin Eva dar, der ich für alles dankbar bin und die bei jeder Entscheidung stets hinter mir steht.

Was wäre aber ein Studium ohne Freunde. Es gibt so viele von ihnen, die mir auf die Schnelle einfallen. Alle aufzuzählen, würde aber zu lange brauchen. Einen möchte ich aber besonders hervorheben. Dr. Hannes Kern war nicht nur mein Chef, sondern hat stets meine Interessen im Bereich des Brandschutzes gefördert.

Dank gilt auch den Verantwortlichen der Norske Skog Bruck, im Besonderen meinem Betreuer Martin Simmler, sowie Prof. Dr. Nikolaus Sifferlinger und Dr. Michael Prenner vom Lehrstuhl für Bergbaukunde, die diese Masterarbeit ermöglicht haben.

Zusammenfassung

In den letzten Jahren kommt es zu einem signifikanten Anstieg von Brandereignissen in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft. Dies hat, abgesehen von finanziellen oder gar Personenschäden, einen hohen Imageschaden und gesteigerte Versicherungssummen zur Folge. Forschungen von Universitäten, Brandschutzexperten und der Industrie beziehen sich auf die Ursachen und Abwehrmöglichkeiten. Die Ursachen für die häufigen Brände sind vielfältig, unterscheiden sich von anderen Industriebranchen und so kann z.B. bei über einem Viertel der Ereignisse auf Selbstentzündung geschlossen werden. Bei über 40% der Brände ist die Ursache jedoch unklar, da sie sich im Nachhinein nicht mehr feststellen lassen. Gründe dafür liegen oft in Störstoffen im Abfall, die den Brand überall in den Aufbereitungsanlagen, Lagern oder auf Förderanlagen ausbrechen lassen. Durch die steigende Anzahl an Störstoffen, wie falsch entsorgte Lithiumionen-Batterien, häufen sich die Brandereignisse auch zukünftig. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 89-93)

Förderanlagen, vor allem Bandförderer, verbinden alle Anlagenteile und können als eine Art Zündschnur angesehen werden. Aus diesem Grund ist eine rasche Branderkennung und -löschung essentiell. Der Brandschutz wird aber als Gewerk verstanden, das der fertigen Anlage hinzugefügt wird, und nicht als Maßnahme, die schon in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden muss. Aufbereitungs- und Sortieranlagen werden auf engem Raum aufgebaut und mittels kurzen Förderwegen soll ein möglichst hoher Durchsatz ermöglicht werden.

Versuche zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Konstruktion zeigen, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit ab einer Neigung von 20° stark erhöht. Zudem wirkt sich physikalische Effekte, wie der Graben- und Kamineffekt, negativ aus und die Geschwindigkeit der Ausbreitung steigt auf ein Vielfaches. Auch die Brandintensität verstärkt sich, was eine effiziente Löschanlage in Verbindung mit einer schnellen Branddetektion nötig macht.

Zusammen mit den Ergebnissen aus den Versuchen, Forschungsergebnissen und Vorgaben der Fachverbände lässt sich ein Maßnahmenkatalog erstellen, der bei der Neuplanung einer Anlage helfen soll, den Brandschutz bestmöglich zu gewährleisten.

Abstract

In recent years there has been a significant increase in fire incidents in the waste, disposal and recycling industries. Apart from financial or even personal injuries, this results in high damage to image and increased insurance sums. Research by universities, fire protection experts and industry relates to the causes and possible defenses. The causes for the frequent fires are diverse, differ from other industrial sectors and so e.g. in more than a quarter of the events, spontaneous ignition can be concluded. In over 40% of the fires, however, the cause is unclear, as it can no longer be determined afterwards. The reasons for this are often found in contaminants in the waste, which cause the fire to break out everywhere in the processing plants, warehouses or on conveyor systems. Due to the increasing number of contaminants, such as incorrectly disposed of lithium ion batteries, fire incidents will continue to increase in the future. (See Nigl & Pomberger 2018, pp. 89-93)

Conveyor systems, especially belt conveyors, connect all parts of the system and can be viewed as a kind of fuse. For this reason, rapid fire detection and extinguishing is essential. However, fire protection is understood as a trade that is added to the finished system and not as a measure that must be taken into account in the design phase. Processing and sorting systems are set up in a confined space and the highest possible throughput should be made possible by means of short conveying paths.

Tests on the speed of fire spread depending on the construction show that the speed of spread increases sharply from an incline of 20°. In addition, due to physical effects such as the trench and chimney effect, it has a negative effect and the speed of propagation increases many times over. The fire intensity also increases, which makes an efficient extinguishing system in connection with rapid fire detection necessary.

Together with the results from the tests, research results and specifications from the professional associations, a catalog of measures can be created that is intended to help ensure the best possible fire protection when planning a new system.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	II
Vorwort, Widmung, Danksagung	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1 Problematik in abfallwirtschaftlichen Anlagen und Auswirkungen	4
2. Fördergut Abfall und Ersatzbrennstoff	6
2.1 Zusammensetzung von Abfällen	7
2.2 Brandgefahr des Fördergutes	8
2.2.1 Brandentstehung und Löschwirkung	8
2.2.2 Brandausbreitung	10
2.2.3 Brandgefahr von Abfällen	11
2.2.4 Brandursachen	12
3. Förder- und Lagertechnik	19
3.1 Struktur der Fördertechnik	19
3.2 Stetige Fördermittel	22
3.2.1 Gurtförderanlagen	23
3.2.2 Weitere Formen von Gurtförderanlagen	24
3.2.3 Geschlossene Gurtförderanlagen	24
3.3 Alternative fördertechnische Anlagen	27
3.3.1 Kettenförderer	27
3.3.2 Schwingförderer	29
3.3.3 Schneckenförderer	29
3.4 Brandgefahr von Förderanlagen	30
3.5 Lagertechnik	33
4. Brandschutz in der Abfallwirtschaft	36
4.1 Brandschutz	36
4.2 Brandschutz in der Abfallwirtschaft	37
4.2.1 Maßnahmenmatrix	38

4.3	Brandschutztechnik	39
4.3.1	Brandmeldung	40
4.3.2	Löschsysteme	43
4.4	Brandschutznormen für Förderbänder	45
4.5	Feuerschutzabschlüsse	46
4.6	Lösungen für die Abfallwirtschaft	48
4.7	Lösungen in anderen Industriezweigen	56
4.8	Löschmittel für Abfall	58
4.8.1	Löschen	58
4.8.2	Löschmittel	58
4.8.3	Vergleich Löschmittel	62
4.8.4	Löschmittel für Lithium-Ionen-Akkus	68
4.9	Versuche	69
4.9.1	Versuchsaufbau	70
4.9.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Neigung	75
4.9.3	Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Einhausung	87
4.9.4	Löschanlage	92
4.10	Diskussion der Versuchsergebnisse	96
5.	Maßnahmenkatalog AbER-Brandschutz	98
5.1	Maßnahmen Import	99
5.2	Maßnahmen Aufbereitung	100
5.3	Maßnahmen Lager	101
6.	Aufbereitung Norske Skog Bruck GmbH	103
6.1	Projektbeschreibung	103
6.1.1	Firmenprofil Norske Skog	103
6.1.2	Prozessbeschreibung Aufbereitung	103
6.2	Bewertung nach Maßnahmenmatrix des VOEB	107
6.2.1	Risikoeinstufung von Abfällen	107
6.2.2	Maßnahmenmatrix	109
6.3	Konzept Norske Skog GmbH	110
6.3.1	Anlieferung	111
6.3.2	Aufbereitung	112
6.3.3	Lager	112
6.4	Zusammenfassung	114
7.	Schlussfolgerung	115

Literaturverzeichnis	119
8. Abbildungsverzeichnis	121
9. Tabellenverzeichnis	125
10. Abkürzungsverzeichnis	126
Anhang Inhaltsverzeichnis.....	I
Anhang.....	II

1. Einleitung

In der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (AbER) kommt es in den letzten Jahren zu einem signifikanten Anstieg von Brandereignissen (siehe Abbildung 1). Durch die hohen Brandlasten in dieser Branche haben schon kleine Ursachen große Folgen und führen nicht nur zu hohen Schäden und starken Umweltbelastungen, sondern erhöhen auch die Versicherungssummen für weitere, neu zu errichtende, Anlagen. Im Gegensatz zu anderen Industriezweigen sind die Brandursachen mannigfaltig, was die Erforschung und Erprobung sowie den Einsatz neuer Brandschutzsysteme nötig macht.

Schon längst hat sich die Branche gemeinsam mit den Versicherern dieser Problematik angenommen, um die abfallwirtschaftlichen Anlagen auf ein besseres brandschutztechnisches Niveau heben zu können. Gemeinsam mit Brandschutz-Spezialisten und Universitäten wird an den Ursachen von Bränden und deren Möglichkeiten zur Vermeidung geforscht. Durch diese intensiven Bemühungen ist es möglich, die Brandursachen zu identifizieren und so technische, adäquate Maßnahmen zur Vermeidung oder Bekämpfung zu setzen.



Abbildung 1 Brand einer Abfall-Förderanlage Quelle: FF Laxenburg

Jedoch ist erkennbar, dass es vielen Betreibern an Verständnis für den Zusammenhang von Verdichtung der Anlage und dem Brandschutz fehlt. Immer noch werden abfallwirtschaftliche Anlagen so geplant und gebaut, dass sie einen möglichst großen Durchsatz bei möglichst geringen Kosten erreichen. Die Lager, Förderanlagen, Sortier- und Shreddermaschinen werden auf kleinem Raum installiert, um Förderwege kurz zu halten. Steile Förderbänder sollen es möglich machen, die Höhenunterschiede zwischen den Maschinen der Anlage auf kurzen Wegstrecken zu überwinden. Die Bildung von Brandabschnitten wird oft auf das geforderte Minimum reduziert, und es wird versucht, die Brandgefahr mit angepassten technischen Brandschutzeinrichtungen zu minimieren. Um jedoch einen adäquaten Schutz garantieren zu können, müsste dem Brandschutz bei der Neuplanung einer abfallwirtschaftlichen Anlage ein höherer Stellenwert beigemessen werden, und konstruktive Maßnahmen sind schon in das Erstkonzept einfließen zu lassen. Im Sinne des maschinenintegrierten Brandschutzes ist der Brandschutz nicht als Gewerk zu sehen, das in späteren Schritten hinzugefügt wird, sondern die Abwehrmaßnahmen sind in die Maschinen oder Anlagen zu integrieren.

Die Forschungen zu dem Thema Brandschutz in der Abfallwirtschaft beschäftigen sich mit den Ursachen und der Grundproblematik sowie deren Bekämpfung, weniger aber mit der Prävention, die schon lange vor der aktiven Abwehr ansetzt. Der Handel hat darauf bereits reagiert und bietet Lösungen für diverse Fälle an. Auf die Fördertechnik und Lagergestaltung wurde jedoch wenig Augenmerk gelegt. Bandförderanlagen stellen nämlich nicht nur selbst eine mögliche Quelle für einen Brand dar, sondern besitzen, aufgrund ihrer eigentlichen Bestimmungen, den negativen Effekt, dass sie eine mögliche Brandlast in der gesamten Anlage auf unterschiedlichen Wegen verteilen. Durch die vorhandenen hohen Brandlasten kommt es somit zu einer raschen Brandausbreitung in der gesamten Anlage, weshalb die Förderanlage als eine Art Zündschnur angesehen werden kann.



Abbildung 2 Brand einer Förderbrücke Quelle: BG RCI

Gängige Brandschutzsysteme grenzen die Brandausbreitung ein und sind in der Lage, die restliche Anlage zu schützen. Die Entfernung des Brandgutes vom Förderer und die vollständige Ablöschung müssen jedoch durch Mitarbeiter oder die alarmierte Feuerwehr erfolgen. Ein unzugängliches beziehungsweise verwinkeltes Anlagendesign, wie in Abbildung 2 und 3, erschwert dies, was eine längere Betriebsunterbrechung oder einen höheren Schaden bedingt. Deshalb ist es nötig, auf solche Details in Bezug auf den Brandschutz schon während der Planungsphase zu achten und die Problemspots zu lokalisieren.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die Brandschutzproblematik in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft aus der Sicht der Fördertechnik zu betrachten. Es sollen Lösungsvorschläge gefunden werden, welche die Neuplanung einer abfallwirtschaftlichen Anlage unterstützen. Um diese Ansätze genauer beurteilen zu können, müssen zuerst die Mechanismen von Brennen und Löschen verstanden werden. Zudem beschäftigt sich die Arbeit mit dem Abfall als Fördergut, den verwendeten Fördermitteln und Lagermethoden. Aktuelle Forschungen zu Bränden in abfallwirtschaftlichen Anlagen werden ebenso behandelt wie die Vorgaben des Branchenverbandes und der Versicherer. Gängige Methoden zum Brandschutz von abfallwirtschaftlichen Systemen werden untersucht und mit Lösungen aus verwandten Industriezweigen verglichen. Versuche sollen den Einfluss der Konstruktion von Förderanlagen auf die Brandausbreitung zeigen. Geforderte Löschmaßnahmen von Förderanlagen werden auf ihre Wirksamkeit hin getestet und alle Erkenntnisse zusammen ausgewertet.



Abbildung 3 Brandbekämpfung Förderanlage Quelle: FF Laxenburg

Die ausgearbeiteten Lösungsvorschläge sollen in weiterer Folge an einem praktischen Beispiel angewendet werden. Dazu dient die geplante Abfallaufbereitungsanlage der Firma Norske Skog GmbH am Standort Bruck an der Mur. Die Aufbereitungsanlage samt Bunkerlager dient zur Beschickung eines Heizkessels mit Ersatzbrennstoffen. Das hohe Sicherheitsniveau des Betriebes soll sich auch in der neuen Anlage widerspiegeln, und alle Facetten des modernen Brandschutzes sollen ausgenutzt werden, um die Gefahr eines Brandes sowie der Brandausbreitung möglichst klein zu halten.

1.1 Problematik in abfallwirtschaftlichen Anlagen und Auswirkungen

Die Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft hatte schon immer mit Stoffen mit einer hohen Brandlast umzugehen. In den letzten Jahren mehren sich aber die Brandereignisse und erreichen einen neuen Höhepunkt, was nicht nur eine enorme Umweltbelastung und eine Gefahr für Mitarbeiter beziehungsweise für Einsatzkräfte zu Folge hat, sondern auch zu hohen Sachschäden an den Anlagen führt. Daraus folgt ein zunehmender Versicherungsverlust für die Betreiber von abfallwirtschaftlichen Anlagen (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S.85). Die inhomogenen Stoffströme in den Anlagen stellen nicht nur eine große Herausforderung für die Konstrukteure von solchen Anlagen, auch in Bezug auf die benötigten Förderanlagen und -Einrichtungen, dar, sondern enthalten auch gefährliche Störstoffe, die als Zündquellen dienen können. Auf das

brandschutztechnische Problem des Fördergutes wird später noch genauer eingegangen.

Die Brandereignisse der letzten Jahre waren aufgrund ihrer Anzahl und der hohen Schadenssumme einiger Brände durchaus folgenreich. Versicherungsunternehmen ziehen sich zunehmend aus der Branche zurück. Diese Brandereignisse stehen im Gegensatz zu den Zielen der Abfallwirtschaft, wie der Vermeidung schädlicher Einwirkung auf Menschen, Tiere und Umwelt, der Geringhaltung der Emissionen und der Schonung von Ressourcen. So sind Brandereignisse eine problematische Mehrbelastung für die Umwelt, da ein großer Brandfall mehr Schadstoffe in die Umwelt freisetzt als zum Beispiel die jährliche Emission von allen Müllverbrennungsanlagen in Schweden zusammen betragen (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S.86). Die resultierenden Umwelt- und Imageschäden führen zu erheblichen Mehrkosten. Brandereignisse können zu Unterbrechungen und Ausfällen der Industrieanlage des Betriebs führen, aber auch die Betriebseinstellung zur Folge haben. Solche Ereignisse haben oft auch gerichtliche Konsequenzen, vor allem wenn sie zu Personenschäden führen.

Aus brandschutztechnischer Sicht sind nicht nur die Gefährlichkeit des Fördergutes, also des Abfalls, interessant, sondern auch der Aufbau und die Konstruktion der Anlage samt ihren Fördereinrichtungen. Auch eine Betrachtung der Systemumgebung, wie unter anderem die Beschaffenheit der Lager, der Zufahrten, oder der Abstände zu anderen Anlagen, ist für den Brandschutz maßgebend. So führt Brandrauch zu einem hohen Schaden an Anlagenteilen und Maschinen und muss über Brandschutzeinrichtungen, wie Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) abgeführt werden. Eine frühzeitige Branderkennung, sowie eine schnelle Löschung sind für eine Verringerung des Schadens wichtig. So zählen selbstständige Löschanlagen und eine umsichtige Anlagenkonstruktion zu den maßgeblichen Punkten für eine schnelle und erfolgreiche Brandbekämpfung.

2. Fördergut Abfall und Ersatzbrennstoff

In der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft wird Abfall behandelt oder aufbereitet. Je nach Art des abfallwirtschaftlichen Unternehmens kann sich der Abfall aus verschiedenen Bestandteilen zusammensetzen. Aus Sicht der Brandschutzproblematik spielt kunststoffhaltiger Müll eine besondere Rolle, da dieser leichter entzündlich ist und eine hohe Brandlast darstellt. Diese Kunststoffe finden sich im Leichtverpackungsabfall (LVP), Hausmüll, Gewerbeabfall sowie bei Sperrmüll. Bei Abfall handelt es sich aufgrund seiner Beschaffenheit um ein sehr heterogenes Fördergut, das die Konstruktion von Förderanlagen erschwert und die Auswahl der Fördertechnik einschränkt. Auch eine Schüttgutsimulation mit Hilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist auf Grund dieser Heterogenität sehr schwierig.



Abbildung 4 Ersatzbrennstoff-Ballen

Des Weiteren werden in dieser Arbeit Ersatzbrennstoffe (EBS) berücksichtigt, die durch die Aufbereitung und Verarbeitung von Abfällen gewonnen werden (siehe Abbildung 4). Eingesetzt werden diese Brennstoffe in Müllverbrennungsanlagen, aber auch in der Monoverbrennung bei EBS-Kraftwerken. Bei Ersatzbrennstoffen unterscheidet man zwischen der heizwertreichen Fraktion und den Sekundärbrennstoffen (SBS). Die heizwertreiche Fraktion hat einen höheren Heizwert als der ursprüngliche Abfall, ist aber nicht so weit aufbereitet wie die Sekundärbrennstoffe. Diese werden aus der weiteren Aufbereitung der heizwertreichen Fraktion hergestellt. Auch müssen sie vorgeschriebene Qualitätsstufen einhalten und werden auch in Kraftwerken mitverbrannt, beziehungsweise ersetzen sie fossile Energieträger (Vgl. LANUV 2016, S. 12). Aus Sicht der Fördertechnik sind Ersatzbrennstoffe leichter zu fördern und zu bearbeiten, da sie bereits aufbereitet, von Störstoffen frei und von vergleichbarer Größe sind. Dies macht das gesamte Fördergut homogener und es ist leichter zu berechnen, abzuschätzen oder zu simulieren.

2.1 Zusammensetzung von Abfällen

Die Material- und Stoffströme in der Abfallwirtschaft unterscheiden sich von den Förderströmen in anderen Industriezweigen maßgeblich. Im Gegensatz zu den anderen Branchen sind die chemisch-physikalischen Ströme hier weniger genau definiert und unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und Menge. So ist das Fördergut in der Abfallwirtschaft sehr heterogen und hat hohe Schwankungen in der Zusammensetzung zur Folge. Vor allem gemischte Siedlungsabfälle sind saisonalen und regionalen Änderungen unterworfen, was auf das unterschiedliche Konsumverhalten und die unterschiedlichen Siedlungsstrukturen sowie die regionalen Abfallsammelsysteme zurückzuführen ist. Vor allem Siedlungsabfälle sind auch stark mit Anhaftungen und Verschmutzungen versehen, die sich sicherheitstechnisch problematisch auswirken können. Ein weiteres großes Problem stellen Fehlwürfe dar, die in der Abfallwirtschaft mehr die Regel als die Ausnahme sind. Dies bedeutet nicht nur ein Problem für die Prozessführung und die Produktqualität, sondern auch eine der größten sicherheitstechnischen Gefahren. Der größer werdende Unterschied eingesetzter Materialien und der Anstieg von Verbundwerk-, sowie Kunststoffen bewirkt eine Steigerung der

spezifischen Oberfläche der Abfälle. Im Zuge der Abfallbehandlung wird diese je nach Aufbereitung weiter erhöht.

Ein weiterer Grund für die heterogene Zusammensetzung des Fördergutes ist die überaus komplexe Marktsituation in der Abfallwirtschaft. Atypische und veränderliche Transaktionsbeziehungen zwischen Kunden, Lieferanten, Mitbewerbern und Abnehmern ändern die Zusammensetzung des Abfalls. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S.88)

2.2 Brandgefahr des Fördergutes

2.2.1 Brandentstehung und Löschwirkung

Damit die Brandgefahr genauer erläutert werden kann, muss zuerst der Brand, beziehungsweise der Verbrennungsvorgang, untersucht werden. In der Fachliteratur existiert keine einheitliche Definition, die den Unterschied zwischen Brand und Feuer beschreibt. Umgangssprachlich werden die beiden Begriffe oft gleichgesetzt. In *Löschmittel in der Brandbekämpfung* werden die Begriffe, die den Verbrennungsvorgang beschreiben, wie folgt definiert:

- Feuer ist die Bezeichnung für die sichtbare äußere Begleiterscheinung einer Verbrennung (Flammen, Glut, . . .)
- Als Brand hingegen wird Schadfeuer (im Gegensatz zu Nutzfeuer – eine gewollte, kontrollierte Verbrennung an einem vorbestimmten Ort), also nichtbestimmungsgemäßes Brennen bezeichnet
- Brennen oder Verbrennen bzw. die Verbrennung ist per Definition einfach die Bezeichnung für eine exotherme Oxidation mit Feuererscheinung, d. h. die chemische Reaktion brennbarer Stoffe mit einem Oxidationsmittel (meist Sauerstoff) zu neuen chemischen Stoffen (Oxiden) (Pfeiffer 2016, S. 3f.)

Um die Entstehung eines Brandes zu verstehen, muss zuerst auf die Grundlagen der Verbrennung eingegangen werden. Die Grundbedingungen, die für einen Brandvorgang nötig sind, lassen sich im so genannten Verbrennungsdreieck (siehe Abbildung 5) veranschaulichen. Wichtig ist die zeitliche und räumliche Koinzidenz der drei Bestandteile des Dreieckes. Die drei Bedingungen für das

Zustandekommen eines Brandes sind ein brennbarer Stoff, ein Oxidationsmittel, das in den meisten Fällen Sauerstoff ist, und eine Zündenergie. Bei der benötigten Energie kann es sich um Wärme, Elektrizität oder zum Beispiel auch Funken aus mechanischen Vorgängen handeln. Eine weitere Grundbeziehung für die Entstehung eines Brandes ist das richtige Mischungsverhältnis der drei Bedingungen.

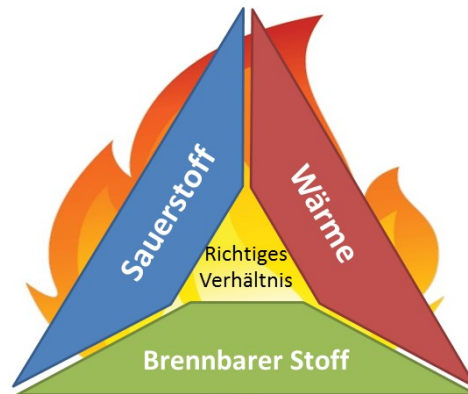


Abbildung 5 Verbrennungsdreieck

Für sich betrachtet ergeben die drei einzelnen Bedingungen keinen Brand. Wie schon oben erwähnt, müssen sie im richtigen Mischungsverhältnis vorliegen und räumlich sowie zeitlich zusammentreffen, so dass eine stabile, sich selbst erhaltende, chemische Kettenreaktion entstehen kann. Neuere, aus dem Englischen kommende, Literatur hat diesen wichtigen Faktor erkannt und mit der Kettenreaktion das Verbrennungsdreieck in ein dreidimensionales Tetraeder (siehe Abbildung 6) umgewandelt. So ist diese wichtige Bedingung besser ersichtlich.

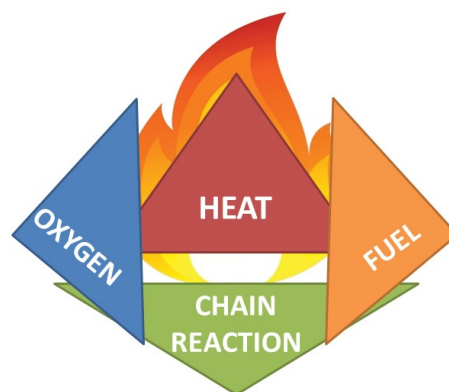


Abbildung 6 Brandtetraeder

Mit Hilfe des Verbrennungsdreiecks, beziehungsweise -tetraeders, kann der Vorgang des Löschens erklärt werden. Löschen ist das Entfernen einer oder mehrerer der vorhin erwähnten Bedingungen. Dies wird mit Hilfe von taktischen oder technischen Maßnahmen im Rahmen des abwehrenden Brandschutzes erreicht. Der vorbeugende Brandschutz zielt darauf ab, eine oder mehrere Bedingungen von Anfang an zu vermeiden. Verschiedene Löschmittel wirken sich unterschiedlich auf den Löscheffekt aus und haben Einfluss auf eine oder mehrere Bedingungen des Verbrennungsdreiecks. Als quantitativen Löscheffekt bezeichnet man die Störung des Mischungsverhältnisses zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel, meist Sauerstoff. Dies kann durch Verdünnen oder Trennen beim Brennstoff, oder Ersticken und Trennen beim Sauerstoff erfolgen. Beim thermischen Effekt wird das Brandgut soweit gekühlt, bis die Mindestverbrennungstemperatur unterschritten ist. Als antikatalytischen Löscheffekt bezeichnet man die Störung der Kettenreaktion, die für die Verbrennung notwendig ist und im Brandtetraeder veranschaulicht wird (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 23ff.)

2.2.2 Brandausbreitung

Im vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz, vor allem in Industrie- und Förderanlagen, verdient die Brandausbreitung hohes Augenmerk. Als Brandausbreitung versteht man allgemein eine Ausweitung des Brandereignisses über die Ausbruchsstelle hinaus (Abbildung 7). Dies hängt von der Zusammensetzung und Menge des Brandgutes, den Möglichkeiten zur Wärmeübertragung an die Umgebung, den bautechnischen Begebenheiten der Gebäude und Anlagen, aber auch zum Beispiel den meteorologischen Begebenheiten und vielem mehr ab. Brände in der Abfallwirtschaft, vor allem bei gemischten oder kunststoffhaltigen Abfällen, weisen im Allgemeinen eine sehr schnelle Brandausbreitung auf (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S.87). Förderanlagen können den Effekt der Brandausbreitung unterstützen, wenn der Förderer nicht abgestellt wird, oder sie konstruktiv eine Ausbreitung begünstigen. Brennendes Fördergut wird sonst mit relativ hoher Geschwindigkeit in nicht betroffene Anlagenteile weitergefördert. Zudem stellen Förderanlagen Öffnungen in

Brandabschnitten dar, durch die sich der Brand in benachbarte Brandschutzabschnitte ausbreiten kann.



Abbildung 7 Brandausbreitung bei Recyclinganlage Quelle: Bayern1

2.2.3 Brandgefahr von Abfällen

Als Brennbarkeit eines Stoffes bezeichnet man allgemein die Eigenschaft nach der Entflammung weiter zu brennen, auch wenn die Zündquelle entfernt worden ist. In der Literatur ist nicht definiert, wann und ob ein Abfall brennbar ist. Bei der Einteilung nach thermodynamischen Eigenschaften, wie sicherheitstechnischen Kenngrößen, wird auf den Heizwert zurückgegriffen. Auf die grundlegende Eigenschaft der Brennbarkeit wird jedoch nicht eingegangen. (Nigl & Pomberger 2018, S.89)

Störstoffe in der Abfallwirtschaft sind jene Stoffe, die sich problematisch auf den Aufbereitungsprozess oder die Produktqualität auswirken. Eine brandschutztechnische Betrachtung der Störstoffe erhielt erst in den letzten Jahren größere Bedeutung. So kann man einige Stoffe als Zündquellen in einer brandschutztechnischen Störfallbetrachtung definieren. Dazu gehören:

- Batterien (und Akkumulatoren),
- Ungelöschter Brandkalk (Calciumoxid),

- Druckgaspackungen,
- Verunreinigungen und Anhaftungen von Lösungsmitteln oder anderen leicht entzündlichen Substanzen (z.B. in Werkstättenabfällen) und
- phosphinbildende Mittel zur Schädlingsbekämpfung (Calciumphosphid) (Nigl & Pomberger, 2018, S.89).

In der letzten Zeit hat sich die Relevanz der einzelnen Zündquellen jedoch verändert. So spielt dabei die technische Entwicklung, die den Einsatz neuer Materialien ermöglicht, von denen eine Brandgefahr am Ende des Lebenszyklus ausgeht, eine wichtige Rolle. Aber auch das Unwissen der Bevölkerung über die Gefahren der Materialien und Produkte und die vermehrte Häufigkeit des Auftretens solcher im Abfall, haben Einfluss auf diese Entwicklung (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S.89).

2.2.4 Brandursachen

Die Brandursachen in abfallwirtschaftlichen Anlagen, seien es Lager (siehe Abbildung 8), Aufbereitungs- oder Förderanlagen, haben ein sehr breites und vielfältiges Spektrum. So sind sie zum Teil von branchenspezifischer, aber auch nicht branchenspezifischer Natur und reichen von Selbstentzündung, über biologische und chemische Reaktionen, bis hin zu heiß laufenden Maschinenteilen, elektrischen Einwirkungen, Umwelteinflüssen oder Brandstiftung. Oft jedoch bleibt die exakte Ursache des Brandereignisses unbestimmt. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 91f)



Abbildung 8 Brand Abfalllager Quelle: FF Zisterdorf

In der Literatur zur Abfallwirtschaft gehen die Angaben über die Brandursachen in der Literatur nicht über qualitative Auflistungen hinaus. In einem Versuch, eine quantitative Auflistung zu erstellen, unterscheiden die Autoren zwischen gesicherten und ungesicherten Brandursachen, wobei bei lediglich einem Viertel der Fälle eine genaue Ursache festgestellt werden konnte. Die Brandursachen sind zudem nicht in gleichem Maße ermittelbar. Technische Ursachen, Defekte sowie Brandstiftung und Blitzschlag sind leicht festzustellen, wohingegen abfallwirtschaftlich spezifische Ursachen weniger exakt ermittelbar sind. NIGL & POMBERGER (2018) zeigen auf, dass die Brandursachen in abfallwirtschaftlichen Betrieben signifikant von denen in Industrie und Gewerbe abweichen und ein direkter Vergleich nicht gezogen werden kann. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 92)

Region Zeitraum Branche Quelle, adaptiert nach Anzahl Brandereignisse	Österreich	Sachsen		NRW	Gesamt	Oberösterreich	
	2003-07 AbER Holzer 2007 n=58	2003-07 AbER SMUL 2007 & 2015 n=57	2014-15 AbER n=33	2011-14 AbER LANUV 2016 n=94	2003-15 AbER (s.links) n=242	2012-16 Industrie Gewerbe BVS OÖ 2018 n=163 n=1018	
1. Blitzschlag						7%	19%
2. Selbstentzündung	17%	23%	36%	33%	27%	7%	4%
3. Wärmeenergie & -geräte		2%				6%	17%
4. Mechanische Energie		2%	6%		1%	22%	12%
5. Elektrische Energie		2%	3%		1%	25%	17%
6. Offenes Licht & Feuer	2%	5%		4%	3%	9%	15%
7. Behälter-Explosion						1%	
8. Brandstiftung		33%	6%	9%	12%	3%	10%
9. Sonstige	3%	7%	3%	29%	14%	2%	1%
10. Unklar, unbekannt	78%	26%	45%	26%	41%	18%	6%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Abbildung 9 Gegenüberstellung Brandursachen Quelle: Nigl & Pomberger

Bei der Tabelle, die die Gegenüberstellung der Brandursachen in der Abfallwirtschaft und in Industrie und Gewerbe zeigt, sind zwei Aspekte zu beachten. Erstens wurde nicht zwischen gesicherten und vermuteten Brandursachen unterschieden, da, wie oben erwähnt, lediglich eine Quelle die gesicherten Brandursachen aufschlüsselt. Zweitens wurden die Ursachen den in Österreich üblichem Brandursachenschlüssel zugeordnet. Terminologisch sind die einzelnen Ursachen in den Quellen nicht immer eindeutig zugeordnet oder sie wurden in unklar/ unbekannt eingeordnet, wenn die Ursache nur eingegrenzt werden konnte. Ersichtlich ist, dass die Brandursache Blitzschlag in der Abfall-,

Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft nur eine kleine Rolle spielt, wohingegen Selbstentzündung im Vergleich zu den Branchen Industrie und Gewerbe relativ oft vorkommt. Brandstiftung kommt in den Branchen gleich oft vor, der Ausreißer von 33% in Sachsen ist auf einen Serienbrandstifter zurückzuführen. Der hohe Wert der sonstigen Brandursachen ergibt sich dadurch, dass die Ursache mangels Informationen nicht den anderen Kategorien (3.-5.) zugeordnet werden konnte. Deutlich ist aber, dass der Prozentsatz an unbekanntem Brandursachen viel größer ist als in der Industrie oder im Gewerbe. Dadurch besteht jedoch auch die Gefahr, dass falsche Schlüsse gezogen werden. Wichtig dabei wäre eine intensivere Brandursachenforschung, da auch das Spektrum an möglichen Gefahren wächst. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 92f)

2.2.4.1 Ursache Selbsterwärmung und Selbstentzündung

Exotherme Prozesse, die grundlegend bei jeder beliebigen Temperatur ablaufen können, sind im Allgemeinen der Grund für die Selbstentzündung oder -erwärmung von Schüttgütern. Die Geschwindigkeit der Reaktion nimmt jedoch mit steigender Temperatur zu. Feststoffschüttungen haben einen hohen Isolationsfaktor, wodurch die Wärmeabgabe begrenzt wird. Wenn die durch die Reaktion produzierte Wärme höher ist als die abgeführte Wärme, kommt es zum Wärmestau. Dies wird durch die Umgebungstemperatur, Geometrie der Schüttung und Stoffeigenschaften beeinflusst. So wird die Selbstentzündungstemperatur der Abfallstoffe überschritten. Der Anteil von verfügbarem Sauerstoff bestimmt den weiteren Brandverlauf. Diese chemischen Reaktionen werden teilweise von physikalischen und mikrobiologischen Vorgängen überlagert. Diese nehmen Einfluss auf die Temperaturentwicklung. So führt beispielsweise die Adsorption von Wasser zu einer Temperaturerhöhung, da Adsorptionswärme freigesetzt wird. Mikrobiologische Prozesse, wie Gärung, Faulen und Kompostierung erhöhen zusätzlich die Wärmefreisetzung und können zur Selbstentzündung führen. (Vgl. Berger et al. 2010, S. 7)

Das Auftreten der Selbstentzündung wird von folgenden Faktoren maßgeblich beeinflusst:

- physikalische und chemische Eigenschaften des Materials:

- Porosität, Korngröße und Schüttdichte: Diese drei Parameter sind stark miteinander verbunden und beeinflussen den Transport von Sauerstoff bzw. Brandgasen innerhalb des Haldenkörpers,
- Feuchtegehalt der Halde,
- Kinetik der chemischen Reaktionen,
- Massenanteil der brennbaren Komponenten,
- Brennwert der brennbaren Komponenten,
- Umgebungsfaktoren:
 - Umgebungstemperatur,
 - Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen,
 - Wind (Begünstigung der Sauerstoffzufuhr),
- Lagerungsgeometrie:
 - Größe und Form des Haufwerks (Berger et al. 2010, S. 8).

Maßgeblich für die Selbstentzündung ist die Zusammensetzung des Abfalls selbst. In der Regel haben Kunststoffe eine Zündtemperatur von 350 bis 560°C, jedoch zellulosebasierte Stoffe, wie Holz, Papier oder Baumwolle eine niedrigere. Diese kann durch Verschmutzungen oder Anhaftung weiter reduziert werden. Laborversuche haben gezeigt, dass unter Versuchsbedingungen eine Erwärmung auf 144°C ausreichen kann, damit Kunststoffrecyclingmaterial die Selbstentzündungstemperatur erreicht. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 94)

2.2.4.2 Ursache Batterien und Akkumulatoren

Batterien und Akkumulatoren (im weiteren Verlauf wird allgemein von Batterien gesprochen) können als Zündquelle in einem abfallwirtschaftlichen System vorkommen. Allen voran stellen Batterien auf Lithium-Basis einen sicherheitsrelevanten Störstoff dar. Seit Mitte der 2000er Jahre ist eine Zunahme an Lithium-Ionen-Batterien auf dem Markt erkennbar. E-Mobilitätsgeräte, wie E-Bikes, tragen zu dieser Zunahme bei, jedoch ist erkennbar, dass die Sammelmengen der Lithium-Batterien der In-Verkehr-Setzung stark hinterher hinken. Ein Problem sind die unzureichenden Möglichkeiten, die Batterien aus den Geräten oder Produkten zu entnehmen. So gehen Batterien auf Lithium-Basis

möglicherweise einen anderen Entsorgungsweg als herkömmliche. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 94)

Spezifische Gefahrenpotentiale von Lithium-Ionen-Batterien ergeben sich aus der Verwendung chemischer Verbindungen zusammen mit der hohen Energiedichte. Ein Merkmal der Batterie ist, dass sie die chemisch gespeicherte Energie in Form von elektrischer beim Entladen wieder abgibt. Im Versagensfall, zum Beispiel einem thermischen Durchgehen, dem so genannten „Thermal Runaway“, einem externen oder inneren Kurzschluss durch mechanische Beschädigung, wird die gesamte Energie unkontrolliert als Wärme abgegeben. Im Falle einer Lithium-Ionen-Batterie kann dies aufgrund innerer Reaktionen das ungefähr sieben- bis elffache der gespeicherten elektrischen Energie betragen. Durch diesen exothermen Prozess verstärkt sich die Reaktion selbst, wobei es zu einer kritischen Überhitzung der Batterie und schließlich zum Zellbrand kommt. Zudem besteht bei einigen Kathodenmaterialien die Gefahr eines Zerfalls. Dies führt wiederum zu einer exothermen Reaktion und setzt gebundenen Sauerstoff frei. Das erschwert im Falle einer Brandentwicklung die Brandbekämpfung, da der Brand mit konventionellen Löschtechniken nicht bekämpft werden kann. (Vgl. Buser & Mähliß 2016, S. 11)

In nachfolgender Abbildung sind die Auslöser, Abläufe und Auswirkungen der thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen-Batterie ersichtlich:

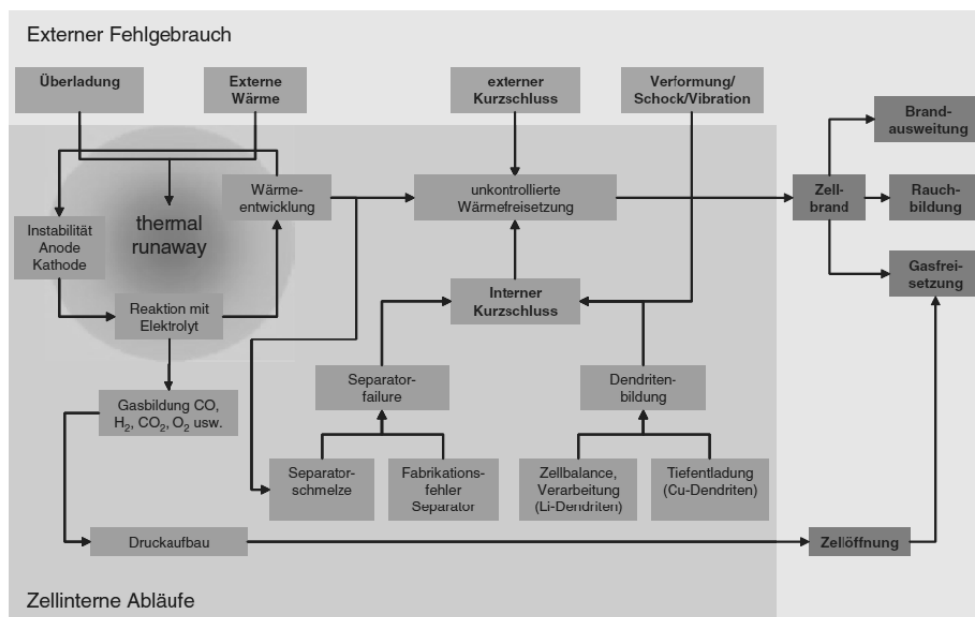


Abbildung 10 Zersetzung Lithium-Ionen-Batterie Quelle: Buser & Mähliß

In abfallwirtschaftlichen Anlagen kann einerseits die in der Batterie gespeicherte Energie, andererseits die bei einem inneren Kurzschluss frei werdende Energie andere Abfälle entzünden. Aufgrund der brennbaren Materialien, aus denen die Batterien aufgebaut sind, und der großen Energiemengen, die gespeichert sind, stellen sie selbst eine hohe Brandlast im Abfall dar. Aus abfallwirtschaftlicher Sicht besteht das Problem, dass einerseits die Verteilung potenziell gefährlicher Batterien nicht bekannt ist und andererseits die Vorgeschichte in der Nutzungsphase beziehungsweise das daraus resultierende Gefährdungspotenzial unbekannt ist (vgl. Nigl & Pomberger, 2018, S. 94f).

Aus der Sicht der Fördertechnik stellt der interne Kurzschluss durch mechanische Energieeinwirkung die größte Gefahr dar (Abbildung 11). Aufgrund der Manipulation durch Kräne mit Greifern kann es zu Beschädigungen kommen, die eine unkontrollierte Wärmefreisetzung bewirken können. Auch die Energieeinwirkung an Übergabestellen von Förderern kann dies bewirken. Ein großes Gefahrenpotenzial liegt auch darin, dass die Wärmefreisetzung nicht konstant abläuft und zeitlich verzögert auftritt, so dass sich die Batterien in der gesamten Anlage befinden können. Geschieht der Zellbrand auf einem Förderer, kann es so zu einer großen Brandausbreitung in der gesamten Anlage kommen. Abfallwirtschaftliche Aufbereitungsanlagen, wie Shredder und Zerkleinerer, bringen eine große mechanische Energie ein, weshalb auf diese Bereiche besonders geachtet werden muss.



Abbildung 11 Brand Akku nach mechanischer Beschädigung Quelle: BR

Ebenso können Batterien durch ihre Bauform einen Störstoff in der abfallwirtschaftlichen Wertschöpfungskette darstellen, wenn sie sich zum Beispiel als Knopfzellen am Ende von Steigbändern sammeln. Je nach der technischen und baulichen Konstruktion von Förderbändern können sich Batterien unter Förderern oder in dafür vorgesehenen Kästen sammeln. Eine beschädigte Batterie kann dort eine hohe Brandgefahr darstellen, da sich dort auch andere feine Abfälle sammeln. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 95)

NIGL und POMBERGER (2018) gehen in der Risikoabschätzung davon aus, dass, bei 20 Stück Gerätebatterien und 0,5 Stück Lithiumbatterien pro Tonne Restmüll, sich bis zu 700.000 Lithiumbatterien pro Jahr im Restmüll in Österreich befinden. Mit einer Wahrscheinlichkeit, in Abhängigkeit der durchschnittlichen Restladung, dem durchschnittlichen Zustand, sowie der Wahrscheinlichkeit für eine Beschädigung, von $p = 0,0001$ für eine kritische mechanische Beschädigung ergibt dies etwa 70 Zündquellen in Österreich pro Jahr allein durch Lithium-Ionen-Batterien. (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 96)

3. Förder- und Lagertechnik

Die Themenbereiche der Transport-, Umschlag- und Lagertechnik werden unter dem Begriff Materialflusstechnik zusammengefasst. Der innerbetriebliche Transport und Umschlag von Schütt- und Stückgütern, also die Bewegung dieser über relative kurze Wegstrecken, bedient sich den Mitteln der Materialflusstechnik. Neben der technischen und ökologischen Gestaltung der Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse gehört dazu auch die Konstruktion beziehungsweise Realisierung der notwendigen Maschinen und Ausrüstung. Im Gegensatz dazu steht der externe Güterfluss, der die Beförderung der Schütt- und Stückgüter über lange Wegstrecken beschreibt. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 1)

Im Folgenden sollen die eingesetzten Förder- und Lagerprozesse in einem abfall- und recyclingtechnischen Prozess erläutert werden.

3.1 Struktur der Fördertechnik

Ein materialflusstechnisches Problem wird durch die unabhängig existierenden Strukturträger Förderaufgabe, Fördergut und Fördermaschine beschrieben. Im weiteren Verlauf wirken die unabhängigen Strukturträger zur Problemlösung aufeinander ein. Die folgenden Abbildungen zeigen die Gliederung der Transporttechnik, die Abhängigkeiten der Strukturträger sowie Gegenstand und Inhalt der Materialflusstechnik (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 1f):

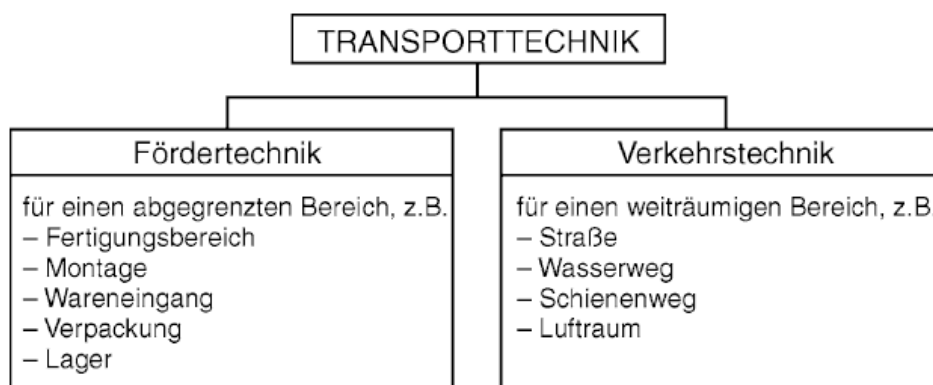


Abbildung 12 Gliederung Transporttechnik Quelle: Griemert & Römisch

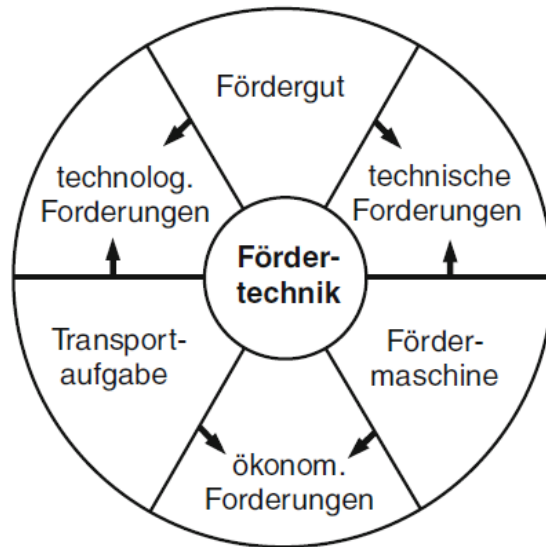


Abbildung 13 Abhängigkeit der Strukturträger Quelle: Griemert & Römisch

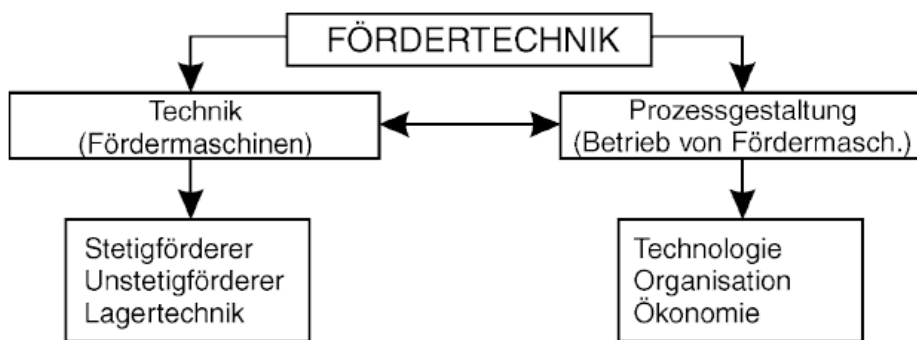


Abbildung 14 Inhalt Materialflusstechnik Quelle: Griemert & Römisch

Die zwei Gruppen, in die Fördermittel eingeteilt werden, sind Stetigförderer und Unstetigförderer. Stetigförderer arbeiten kontinuierlich und über einen langen Zeitraum. Unstetigförderer sind diskontinuierlich arbeitende Fördergeräte, bei denen in der Regel auf ein Lastspiel ein Leerspiel folgt. Der Vorteil der Stetigförderer liegt darin, dass sie im Allgemeinen wirtschaftlicher arbeiten und bei gleichem Eigengewicht größere Fördermengen bewegen. Dabei benötigen sie zudem weniger Energie als Unstetigförderer. Diese werden im Gegensatz dazu für wenige Güter pro Zeiteinheit und auch für schwere Einzellasten eingesetzt. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 5)

Unstetige Förderer kommen in abfallwirtschaftlichen Anlagen und Prozessen hauptsächlich als Greiferkrane (Abbildung 15 und 16) für Schüttgüter oder als

Flurförderzeuge (siehe Abbildung 17) für Stückgüter in Form von gepressten Ballen vor. Für Schüttgüter können auch Fahrzeuge, wie Lader, zum Einsatz kommen. Die unstetigen Förderer dienen zum Umschlag von der Lagerung zu den weiteren Verarbeitungsprozessen. In den Verarbeitungs- oder Aufbereitungsanlagen der abfallwirtschaftlichen Systeme kommen üblicherweise Stetigförderer zum Einsatz. Im Weiteren wird auf die stetigen Fördermittel eingegangen, weil diese für die brandschutztechnische Betrachtung eine größere Rolle spielen.



Abbildung 15 Greiferkran Quelle: Voith



Abbildung 16 Bagger mit Greifer Quelle: JCB



Abbildung 17 Stapler mit Ballenzange Quelle: Kaup GmbH

3.2 Stetige Fördermittel

Während eines längeren Arbeitszeitraumes arbeiten die stetigen Förderer kontinuierlich und transportieren Schütt- aber auch Stückgut. In der betrachteten Abfallwirtschaft dienen sie jedoch vorrangig zum Transport von Schüttgütern in Form von Abfall oder Ersatzbrennstoffen. Eine Förderung über waagrechte, geneigte oder senkrechte beziehungsweise gerade oder gekrümmte Strecken ist mit diesen Fördermitteln möglich. Die Definition und Einteilung der Stetigförderer wird in der DIN 15201 geregelt und erfolgt nach dem Funktionsprinzip und der Art der Kraftübertragung. Dies sind mechanische Stetigförderer mit Zugmittel, mechanische Stetigförderer ohne Zugmittel, Schwerkraftförderer und Strömungsförderer (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 213). Für den Transport in Aufbereitungs- und Verarbeitungsanlagen in der Abfallwirtschaft kommen hauptsächlich Stetigförderer mit Zugmittel (Abbildung 18), wie Bandförderer, zum Einsatz, auf die näher eingegangen wird.

3.2.1 Gurtförderanlagen



Abbildung 18 Abfallwirtschaftliche Förderanlagen Quelle: M-U-T

Ein endloses, umlaufendes Band, das auf Tragrollen, Gleitbahnen oder einem Luftfilm abgestützt ist, bildet den Hauptbestandteil einer Bandförderanlage. Der am öftesten eingesetzte Förderer, auch in der Abfallwirtschaft, ist der Gurtbandförderer, bei dem das Gurtband über Reibschluss von mindestens einer Antriebsstrommel angetrieben wird. Für spezielle Einsatzgebiete kommen andere Bandförderer, wie Stahlbänder oder Drahtbänder, zum Einsatz. Für die Aufgabe von Schüttgut werden Aufgabevorrichtungen, zum Beispiel Schurren, benötigt. Die Vorteile von Bandförderern sind die hohe Fördergeschwindigkeit und Fördermenge, die universelle Einsetzbarkeit und der gutschonende Transport. Zudem bedingt der geringe Verschleiß niedrige Wartungskosten. Dagegen ist eine ansteigende Förderung beschränkt und bestimmte Bänder sind gegenüber heißem und stark schleißendem Fördergut empfindlich. Nach DIN 15220 bis 15224 oder ÖNORM EN 620 sind zum Schutz des Förderers und zum Arbeitsschutz die Auflaufstellen des Zugorgans (Antriebs- und Spanntrommel) gegen Eindringen von Fremdkörpern oder manuellen Eingriff zu schützen. Dies

geschieht zum Beispiel durch Verkleidungen oder Abdeckungen. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 217)

Folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Gurtförderanlage. Hinzukommen können zum Beispiel noch Trommelreinigungseinrichtungen, wie Abstreicher oder rotierende Bürsten. Gurtförderer haben als Richtwert eine Fördermenge von 20.000 t/h bei einer Förderlänge von mehreren Kilometern. Die Bandgeschwindigkeit beträgt dabei 6 m/s (vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 217). Möglich sind Mengen von 40.000 t/h bei Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s.

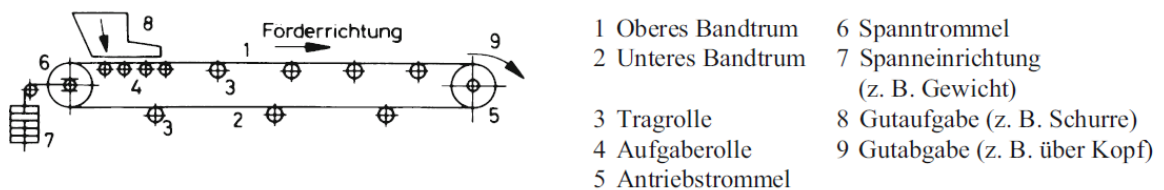


Abbildung 19 Bezeichnungen Gurtförderer Quelle: Griemert & Römisch

3.2.2 Weitere Formen von Gurtförderanlagen

Gurtförderanlagen können abhängig vom zu transportierenden Schüttgut nur bestimmte Steigungen bewältigen. Um noch steiler fördern zu können, wird das Förderband mit Lamellen versehen. Diese verhindern ein Abrutschen des Schüttgutes und machen größere Förderwinkel möglich. So werden zum Beispiel geringere Abstände zwischen Maschinen einer Abfallaufbereitungsanlage und eine kompaktere Planung der gesamten Anlage ermöglicht.

Eine weitere Form der Gurtförderanlagen ist der so genannte Muldengurtförderer. Durch aus der Horizontalen geneigten Tragerollen wird das Förderband U-förmig gekrümmt. In der daraus entstehenden Mulde kann das Schüttgut transportiert werden. Die Gefahren des Verlustes von Fördergut und des Anlagerns von Schüttgutresten an den Rändern sinken somit.

3.2.3 Geschlossene Gurtförderanlagen

Wird der Fördergurt noch stärker gekrümmt, bildet sich ein Schlauch aus, in dem das Schüttgut geschützt vor Umwelteinflüssen transportiert werden kann (Abbildung 20). Diese Rohrförderanlagen dienen aber auch dazu, die Umweltbelastung durch das Fördergut zu minimieren. So können auch Abfälle

über längere Strecken im Freien transportiert werden, ohne eine Geruchs- oder Staubbelastung darzustellen. Im Bereich der Materialaufgabe verläuft der Fördergurt offen, damit das Schüttgut, ähnlich wie bei konventionellen Bandförderanlagen, aufgegeben werden kann. Mehrere geneigte Tragrollen formen in weiterer Folge den Fördergurt zu einem Schlauch, der das Fördergut nun geschützt über lange Strecken transportieren kann. An der Abgabestelle wird der rohrförmige Fördergurt wieder geöffnet und das Schüttgut abgegeben. Das untere Bandtrum wird ebenfalls wieder zu einem Rohr geschlossen und zurückgeführt.

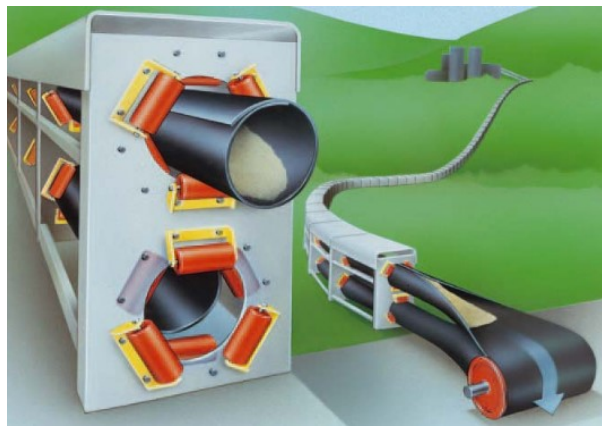


Abbildung 20 Geschlossener Gurtförderer Quelle: Beumer Group

Der Gurtförderer kann nicht nur rohrförmig geschlossen werden, sondern auch in Form eines Tropfens. Dabei werden die seitlichen Ränder, nach der Aufgabe des Fördergutes, ebenfalls nach oben gedrückt und anschließend zusammengepresst. Das Schüttgut wird in dem entstehenden Schlauch eingeschlossen und ist so wieder vor Umwelteinflüssen geschützt. Auch bei dieser Förderanlage entstehen keine Emissionen für die Umgebung. Ein weiterer Vorteil dieser Tropfenform ist die hohe Flexibilität und Kurvengängigkeit des Gurtes (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21 Geschlossener Gurtförderer (Tropfenform) Quelle: Schulte Strathaus

Konventionelle Einhausungen sind Metallkonstruktionen, die das Förderband auf mehreren Seiten abdecken, wie in Abbildung 22. Um eine geruchs- und staubneutrale Förderung über eine freie Wegstrecke verwirklichen zu können, müssen alle Seiten geschlossen werden. Auch sind bei solchen Konstruktionen nur gerade Strecken möglich. Im Gegensatz zu Rohrgurtförderern ist es bei dieser Bauweise möglich, brandschutztechnische Maßnahmen oder andere Überwachungstechniken zu installieren.

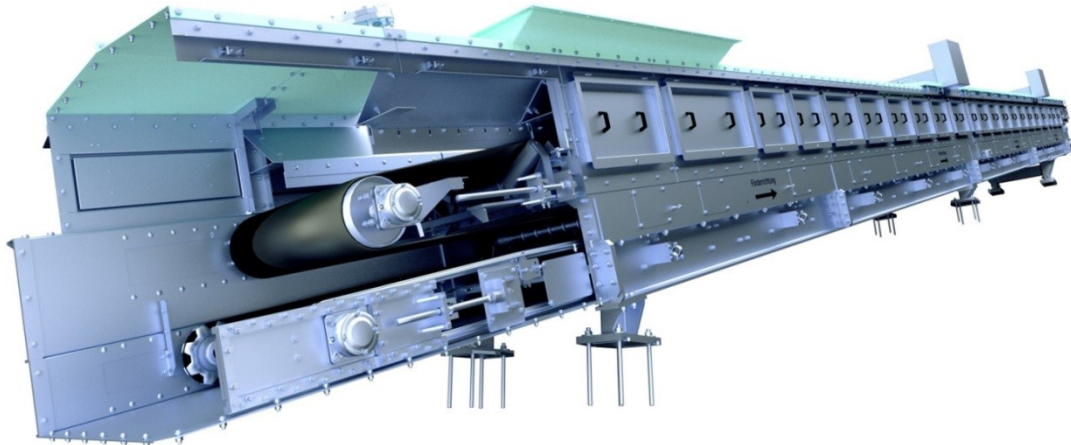


Abbildung 22 Einhausung Gurtförderer Quelle: Stag AG

Soll nur das Fördergurt selbst vor Umwelteinflüssen geschützt werden, wie zum Beispiel vor Regen, reicht es, lediglich das Obertrum durch eine Dachkonstruktion oder einen Halbtunnel abzudecken. Emissionen des Abfalls, wie Staub oder Geruch, können dadurch jedoch nicht verhindert werden. Die Zugänglichkeit zum Band, beziehungsweise zum Fördergut, ist leichter, und es sind keine aufwendigen Konstruktionen notwendig.

Eine weitere Sonderform der abgeschlossenen Gurtförderanlagen stellen Fördergurte dar, die in einem abgeschlossenen Metallrohr geführt werden (Siehe Abbildung 23). Das Förderband im Obertrum wird, ähnlich wie beim Rohrgurtförderer, gekrümmt, um danach in ein Metallrohr geführt zu werden. In diesem Rohr wird der Gurtförderer pneumatisch abgehoben, was den Verschleiß minimieren soll. Vor der Abgabestelle verlässt der Förderer das Rohr und öffnet sich wieder, um das Fördergut abzuwerfen. Der Gurt des Untertrums wird unter dem Rohr zurückgeführt. Diese Bauweise ermöglicht eine einfache Einhausung des Förderers und bietet die Möglichkeit, brandschutztechnische Einbauten, sowie andere Überwachungssensoren, zu installieren. Die Zugänglichkeit zum Fördergut

ist jedoch nicht in der gleichen Weise gegeben, wie bei einer konventionellen Einhausung. Bei brennendem Fördergut gelangt durch das Einblasen von Luft zusätzlich Sauerstoff zum Brand, was diesen weiter verstärkt.

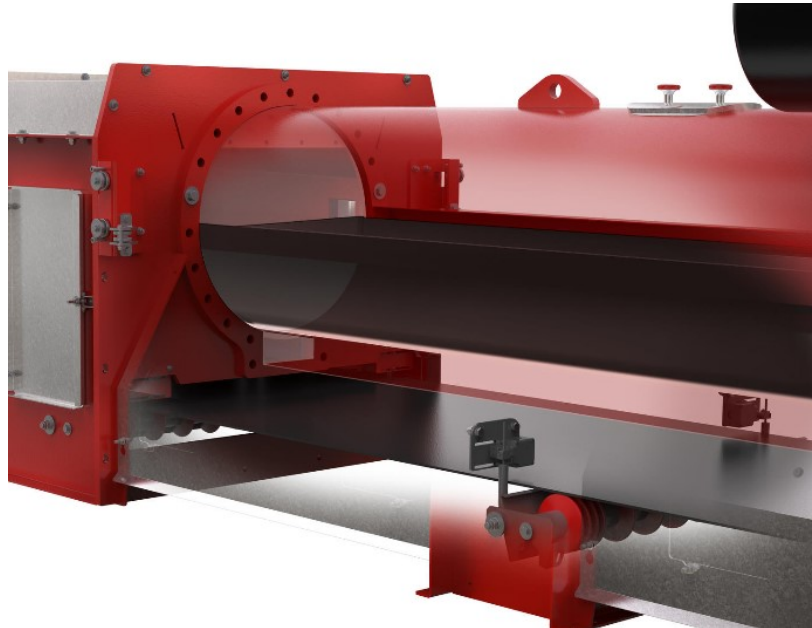


Abbildung 23 Gurtförderer in Rohr Quelle: Westeria GmbH

3.3 Alternative fördertechnische Anlagen

In abfallwirtschaftlichen Anlagen werden nicht nur Bandförderer eingesetzt. Auch andere Formen von Förderanlagen werden verwendet. Jede Fördereinrichtung hat seine Vor- und Nachteile, die im Folgenden kurz aufgelistet werden.

3.3.1 Kettenförderer

Kettenförderer sind eine Unterkategorie der Gliederförderer, die wie die Bandförderanlagen zu den mechanischen Stetigförderern mit Zugmittel gehören. Sie besitzen gleichartige Tragelemente, die an einem endlosen Zugmittel, meist einer Kette (Abbildung 25), befestigt sind. Als Tragelemente können allgemein Platten, wie in Abbildung 24, Tröge, Kästen, Gehänge oder Kratzer verwendet werden. Mit Kettenförderern kann eine Fördermenge von bis zu 1000 t/h bei einer Förderlänge von 400 m realisiert werden. Die Breite der Förderer liegt zwischen 0,4 und 2,0 m. Wegen des Verschleiß und Einsatzes von Ketten als Zugmittel werden Kettenförderanlagen für relativ niedrige Geschwindigkeiten, zwischen 0,1 und 1,0 m/s, angewendet. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 240f)



Abbildung 24 Kettenförderanlagen Quelle: Coparm

In der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft werden Gliederförderer hauptsächlich für schwerere Lasten verwendet. Das betrifft vor allem die Recyclingindustrie und die Sperrmüllaufbereitung. Nachteilig ist jedoch, dass sie nicht die gleichen Förderlängen und –geschwindigkeiten, wie Bandförderanlagen aufweisen und der Leistungsbedarf aufgrund der höheren Reibung viel größer ist.



Abbildung 25 Detail Kettenförderer Quelle: GEPE-Technik

Aus brandschutztechnischer Sicht ist festzuhalten, dass durch die Wahl geeigneter Tragelemente eine höhere Brandbeständigkeit im Gegensatz zu den Bandförderanlagen gegeben ist. Es werden jedoch die gleichen

Brandschutzvorkehrungen zur Detektion und Löschung wie bei den Gurtförderern benötigt.

3.3.2 Schwingförderer

Schwingförderer gehören zu den stetigen Fördermitteln ohne Zugmittel. Dabei wird eine steife Förderrinne durch ein Antriebssystem in stationäre Schwingungen versetzt, die beim Rinnenhingang Massenkräfte auf das Fördergut übertragen und dieses während des Rinnenrückgangs vorwärts bewegen. Ein Vorteil dabei ist, dass man die Siebwirkung zur Ausführung von Sortieraufgaben während des Fördervorgangs ausnutzen kann. Schwingförderer werden nach dem Arbeitsverfahren in Schüttelrutschen und Schwingrinnen eingeteilt. Schüttelrutschen arbeiten nach dem Gleitverfahren und weisen eine Fördermenge von bis zu 200 t/h auf. Die Rinnenlänge kann 200 m betragen, wobei die Rutsche aus einzelnen Schüssen zusammengesetzt ist. Die Rinnenbreite kann bis 1,6 m betragen und die Fördergeschwindigkeit reicht von 0,1 bis 0,5 m/s. Der maximale Neigungs- bzw. Steigungswinkel liegt bei -15° bis 15° . Schwingrinnen, die nach dem Wurfverfahren arbeiten, erreichen eine Fördermenge bis zu 3000 t/h. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 278ff)

In der Abfallwirtschaft werden Schwingförderer hauptsächlich zur Sortierung und Siebung eingesetzt. Auch bei scharfkantigen, schleißenden oder heißen Abfallprodukten kommen sie zum Einsatz, da der Verschleiß am Fördermittel verringert werden kann.

Brandschutztechnisch sind die gleichen Vorkehrungen wie bei Gurtförderern notwendig, um einen Brand zu erkennen und zu bekämpfen.

3.3.3 Schneckenförderer

Auch der Schneckenförderer gehört zu den Stetigförderern ohne Zugmittel (siehe Abbildung 26). Nach DIN 15201 sind sie als Förderer definiert, bei denen ein rotierender, schraubenförmiger, durchgehender oder unterbrochener Körper (Schnecke) das Fördergut waagrecht, geneigt oder senkrecht fördert. Mittels der Schnecke wird das Fördergut durch ein Rohr weitergeschoben, wobei die Gutaufgabe bzw. -abgabe an jeder beliebigen Stelle der Förderstrecken erfolgt. Meist werden pulverförmige oder kleinstückige Fördergüter über kurze Strecken

transportiert. Dabei werden Fördermengen von bis zu 1000 t/h bei einer Förderlänge von 50 – 60 m erreicht. Die Schneckenaußendurchmesser betragen zwischen 100 und 1250 mm. Die Vorteile der Schneckenförderer sind die Möglichkeit der staubdichten Förderung, die geringe Störanfälligkeit und die Eignung für heiße Fördergüter. Nachteilig sind die hohe Antriebsleistung, bedingt durch die ständige Reibung, der Verschleiß der Schnecke und die kleinen Fördermengen bzw. Förderhöhen. (Vgl. Griemert & Römisch 2018, S. 273ff)

In der Abfallwirtschaft kommt die Schnecke bei der Förderung über kurze Wegstrecken bei unterschiedlicher Körnung und Konsistenz des Abfalls zum Einsatz. Auch feuchte und nasse Materialien können gefördert werden.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass eine Branddetektion in der Schnecke kaum möglich und eine automatische Löschung erschwert ist. Bei einem hohen Anteil an Störstoffen ist die Förderschnecke nur bedingt geeignet, da hohe mechanische Kräfte auf das Fördergut wirken können und es so zu einem Brand kommen kann.

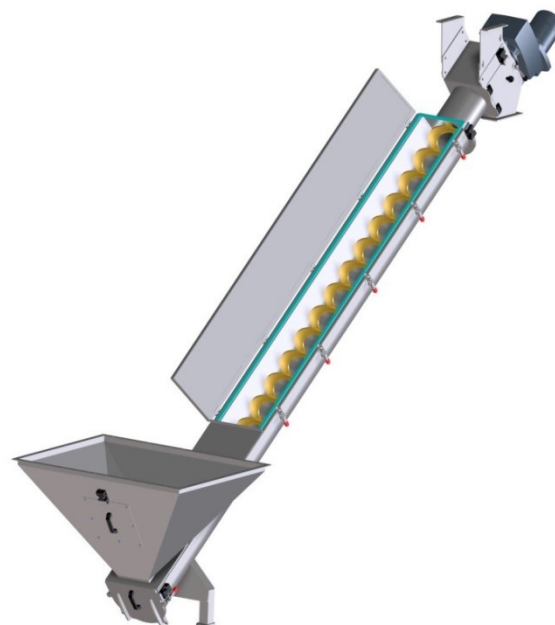


Abbildung 26 Schneckenförderer Quelle: Steiner

3.4 Brandgefahr von Förderanlagen

Aus Sicht des Brandschutzes besteht die Gefahr bei Förderanlagen darin, dass das brennende Fördergut innerhalb der Anlage verschleppt wird und es somit zu

einer schnellen Brandausbreitung kommt. Zudem durchdringen die Förderanlagen betriebsbedingt die Brandabschnitte und führen somit zu einer weiteren Ausbreitung über die Anlage hinaus (Vgl. VOEB 2019, S. 6). Die Bildung von Brandabschnitten ist eine der Hauptaufgaben im baulichen Brandschutz, um so die Ausbreitung von Feuer und Brandrauch zu begrenzen. Wie später erwähnt, müssen daher die Öffnungen der Förderanlagen durch geeignete Einrichtungen verschlossen werden.

Eine Studie des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) behandelte Brandereignisse in Abfallbehandlungsanlagen (siehe Abbildung 27). Darin wurden 94 Brandereignisse aus den Jahren von 2011 bis 2014 untersucht. Bei 22 Bränden wurde ein technischer Defekt als Ursache festgestellt oder angenommen. Zehn Vorfälle, also fast die Hälfte, gingen auf technische Defekte an Förderanlagen zurück. Die Brände gingen dabei hauptsächlich von heiß gelaufenen Lagern oder defekten Antriebsmotoren aus, die den leicht entflammaren Abfall entzündeten (Vgl. LANUV 2016, S. 22). Das ergibt rund 23% der Brände in abfallwirtschaftlichen Anlagen, die von Förderanlagen ausgingen. Nachfolgende Abbildung zeigt die ausgewerteten Ursachen für Brände durch technische Defekte, schließt jedoch keine Vorfälle mit ein, bei denen Aufbereitungs- und Förderanlagen im näheren Zusammenhang mit dem Brandausbruch oder der Ausbreitung stehen, so wie zum Beispiel wenn ein Störstoff durch die mechanische Energie durch einen Shredder zu brennen beginnt.

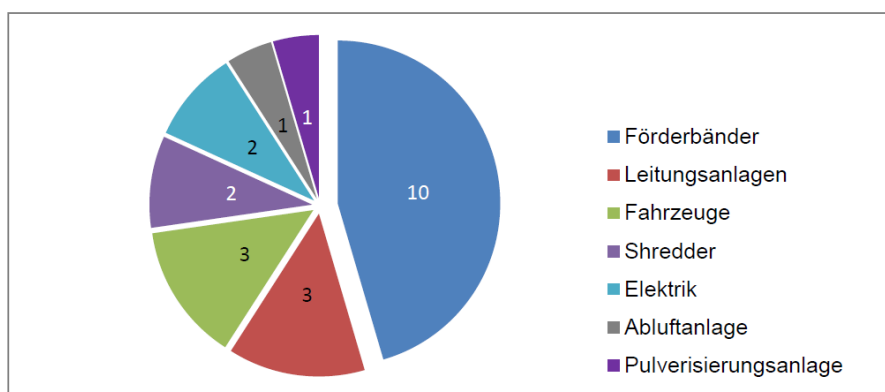


Abbildung 27 Brandursachen Abfallbehandler Quelle: LANUV

Bei der Betrachtung der Gefahr durch Lithium-Ionen Batterien im abfallwirtschaftlichen System kann den Förderanlagen ein hoher Stellenwert

angerechnet werden. Einerseits können sich kleine Störstoffe in unzugänglichen Bereichen der Förderanlage sammeln und somit eine Brandquelle darstellen, die nur erschwert bekämpft werden kann. So können Lithium-Knopfzellen sich am unteren Ende eines Steigförderers sammeln und dort eine Zündquelle darstellen (Vgl. Nigl & Pomberger 2018, S. 95). Andererseits besteht nach Prozessen, bei denen mechanische Energie eingebracht wird, wie etwa Shreddern oder Pressen, die Gefahr, dass Störstoffe durch die Förderanlagen innerhalb der Anlage weitertransportiert werden. Durch die Reaktion innerhalb der Batterie kann ein Brand dann erst zeitverzögert auftreten. Durch die Weiterförderung der Förderanlagen besteht die Gefahr der Brandausbreitung, was eine brandschutztechnische Betrachtung von Förderanlagen nötig macht.

In Bezug auf abgeschlossene und gekapselte Förderanlagen ist darauf zu achten, dass eine Branddetektion erschwert wird, bzw. kaum möglich ist. Erkenntnisse aus der langjährigen Arbeit als Feuerwehrmann zeigen, dass im Falle eines Brandes die Zugänglichkeit für Löschkräfte erschwert oder nicht möglich ist. Bei Schlauchförderern muss das gesamte Fördergut ausgetragen werden, um es anschließend ablöschen zu können (siehe Abbildungen 28 und 29).



Abbildung 28 Erschwerte Brandbekämpfung Quelle: Christian Elsner



Abbildung 29 Brandbekämpfung eingehauster Förderer Quelle: FF Golling

3.5 Lagertechnik

In der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft werden die Abfälle und Ersatzbrennstoffe zwischengelagert, bevor sie in der Anlage weiterverarbeitet werden. Die Zwischenlager dienen unterschiedlichen Zwecken und werden danach eingeteilt. Die Lagerdauer und die technische Ausstattung hängen von diesem Zweck ab. Heizwerte Abfälle und Ersatzbrennstoffe können zum Beispiel als Halden im Freien gelagert werden, bei dem das Lagergut unverdichtet oder im kompakten Zustand vorliegt. Die Halde kann abgedeckt oder auch begrenzt sein. Schüttungen von Lagergut (loses Haufwerk) kann witterungsgeschützt durch ein Flugdach geschützt oder in Gebäuden (Abbildung 30), meist in Lagerboxen, gelagert werden. Bunker (Abbildung 31) oder Silos sind Lager, die durch massive Wände begrenzt werden. Sie dienen meist zur kurzfristigen Lagerung vor der Weiterverarbeitung oder Behandlung. In Ballenlagern unterscheidet man zwischen Pressenballen ohne oder mit Umhüllung mit einer Folie (Abbildung 32). Dies erleichtert die Manipulation und wird zur platzsparenden Lagerung eingesetzt. (Vgl. Holzer 2007, S.25f)



Abbildung 30 Abfall-Lagerhalle Quelle: BEE

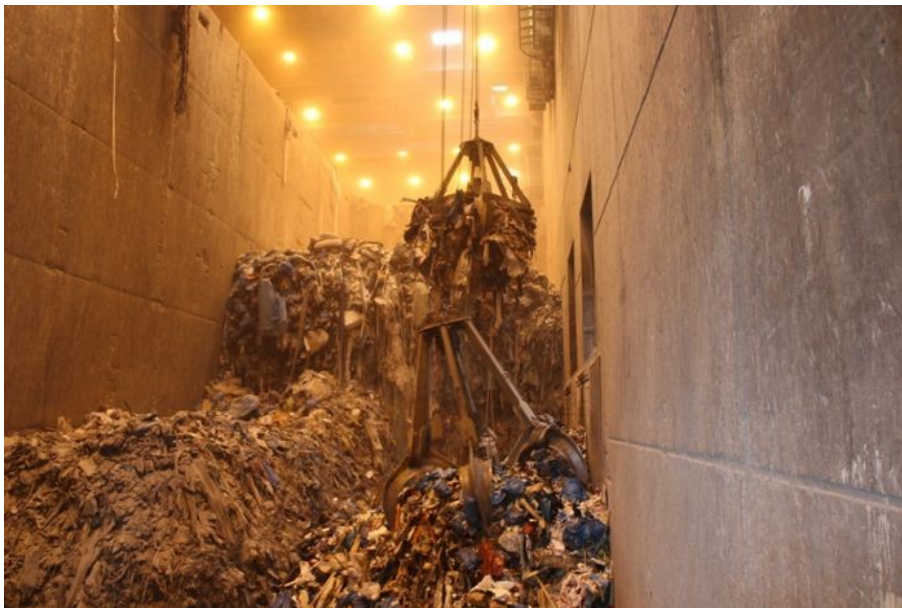


Abbildung 31 Müllbunker Quelle: Graf



Abbildung 32 Ballenlager Quelle: Kretschmer

Langzeitzwischenlager werden als Schüttungen und Halden im Freien betrieben, was den Nachteil hat, dass die Abfälle durch den Einfluss von Umweltbedingungen - z.B. Feuchtigkeit und erhöhter Temperatur - zur Selbsterwärmung und Selbstentzündung neigen. Geringer ist das Risiko einer Selbstentzündung in Lagern, in denen die Abfälle für relativ kurze Zeit gelagert werden. (Vgl. Holzer 2007, S.26)

4. Brandschutz in der Abfallwirtschaft

4.1 Brandschutz

Brandgefahren, sei es im alltäglichen Leben oder in der Industrie, sind allgegenwärtig und bedrohen neben Leib und Leben auch Sachwerte. Als Brandschutz ist jede Maßnahme definiert, die einerseits die Brandentstehung und -ausbreitung verhindern soll und andererseits das Retten von Menschen- und Tierleben sowie wirksame Löscharbeiten bei einem Schadensfeuer ermöglicht. In baulichen Anlagen verfolgt der Brandschutz spezielle Schutzziele, die sich nach dem Baurecht und verschiedenen Normen und Gesetzen richten, und durch brandschutztechnische Maßnahmen sicherzustellen sind. Ein Gebäude oder eine Anlage muss so geplant, ausgeführt und betrieben werden, dass die Standfestigkeit des tragenden Systems bei einem Brand über eine definierte Zeit erhalten bleibt. Zudem soll die Entstehung und Ausbreitung des Brandes innerhalb des Gebäudes begrenzt werden und keine Ausbreitung von Feuer und Rauch auf benachbarte Gebäude oder Anlagen möglich sein. Mitarbeiter im betroffenen Gebäude oder der baulichen Anlage müssen diese unverletzt verlassen oder durch andere Maßnahmen gerettet werden können. Außerdem müssen wirksame Löschmaßnahmen möglich sein, ohne die eingesetzten Einsatzkräfte wesentlich zu gefährden. (Vgl. Gressmann 2019, S. 15f)

Der Brandschutz wird heutzutage als ganzheitliches System gesehen und besteht aus dem vorbeugenden und dem organisatorischen Brandschutz. Der vorbeugende Brandschutz setzt sich aus dem baulichen und dem anlagentechnischen zusammen, während der organisatorische den betrieblichen und den abwehrenden Brandschutz beinhaltet. Als baulichen Brandschutz versteht man alle baulichen Maßnahmen zur Verhinderung eines Brandausbruches oder einer –ausbreitung sowie zur Sicherung der Rettungswege. Der anlagentechnische Brandschutz ist jede technische Maßnahme, die zu einer Entdeckung eines Brandausbruches beiträgt, eine Ausbreitung verhindert und Rettungs- sowie Angriffswege sichert. Der betriebliche Brandschutz, auch organisatorische Brandschutz genannt, beinhaltet jede betriebliche Handlung zur Vermeidung der Brandentstehung, zur Bekämpfung von Entstehungsbränden und

zur Rettung von Personen. Unter abwehrenden Brandschutz versteht man Mittel der Feuerwehr zur Bekämpfung von Gefahren. Die vier Komponenten lassen sich im modernen ingenieurstechnischen Brandschutz nicht mehr isoliert betrachten, sondern müssen ganzheitlich gesehen werden. (Vgl. Gressmann 2019, S. 16ff)

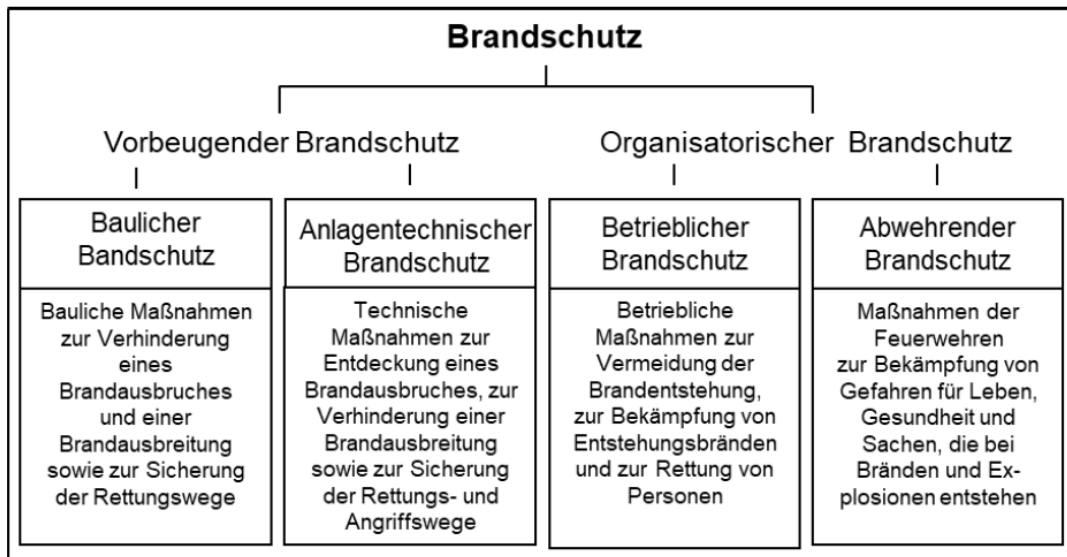


Abbildung 33 Einteilung Brandschutz Quelle: Gressmann

Für die Planung und Konstruktion einer technischen Industrieanlage ist jedoch der vorbeugende Brandschutz von größerer Bedeutung. So beschäftigt sich der bauliche Brandschutz mit der Zugänglichkeit zur Anlage und der Anzahl, Länge und Ausbildung von Rettungswegen. Aber auch die Bildung von Brandabschnitten und die Maßnahmen zur Schließung von Öffnungen, von zum Beispiel Förderanlagen werden darin beschrieben. Auch wird geregelt, welche Baustoffe und Materialien zum Einsatz kommen und ob sie hinsichtlich des Feuerwiderstandes ausreichend dimensioniert sind. Der anlagentechnische Brandschutz regelt beispielsweise die Notwendigkeit von Brandmeldeanlagen und welche Bereiche der Anlage überwacht werden sollen. Auch Löschanlagen und andere brandschutztechnische Einrichtungen in der Anlage zählen dazu sowie der Funktionserhalt der sicherheitsrelevanten Anlagenteile über eine erforderliche Zeitspanne. (Vgl. Gressmann 2019, S. 17f)

4.2 Brandschutz in der Abfallwirtschaft

In der Abfallwirtschaft ist die Brandlast aufgrund der brennbaren Abfälle sehr hoch, was nicht nur die Brandausbreitung begünstigt, sondern auch zu einer

erschweren Brandbekämpfung führt. Die hohe Schadenseintrittswahrscheinlichkeit macht einen umfangreichen, anlagentechnischen Brandschutz notwendig. Die Schutzziele in der Abfallwirtschaft sind wie in anderen Industriebetrieben die Verringerung der Schadenseintrittswahrscheinlichkeit und Minimierung der Aktivierungsgefahr, das schnellstmögliche Erkennen im Schadensfall, die schnellstmögliche Brandbekämpfung und Begrenzung des Sach- und Unterbrechungsschadens. Maßnahmen in Hinsicht auf die Lager- und Fördertechnik sind zum Beispiel die Eingangskontrolle des angelieferten Abfalls sowie die Überwachung der Lagerbereiche und Fördereinrichtungen. Auch tragen automatische Löschanlagen zur Verringerung der Brandausbreitung bei. (Vgl. VOEB, 2019, S.10f)

4.2.1 Maßnahmenmatrix

Der Arbeitskreis Brandschutz des Verbandes Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB) erarbeitete brandschutztechnische Maßnahmen für Betriebe aus den Branchen Abfallwirtschaft, Entsorgung und Recycling in Form einer Maßnahmenmatrix. Dazu wurde eine Beurteilung für die Brandrisikoklassen der Abfälle und Abfallarten entworfen. Mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes werden dabei die Abfälle den unterschiedlichen Risikoklassen zugeteilt. Im Weiteren wird auf die Vorgehensweise des Leitfadens eingegangen und die Maßnahmenmatrix in Bezug auf die Lager- und Fördertechnik in der Abfallwirtschaft angewendet:

Die drei Bewertungskriterien Brennbarkeit, Anteil an sicherheitstechnisch relevanten Stoffen und erhöhtes Selbstentzündungspotential tragen speziellen Rahmenbedingungen der Abfallwirtschaft Rechnung, sind aber auch einfach anzuwenden. Der erarbeitete Entscheidungsbaum, für den eine Brandrisikoklasse abgeleitet wird, ist in der folgenden Abbildung ersichtlich. Zuerst wird die Brennbarkeit überprüft, dann der Anteil der Störstoffe und danach das Selbstentzündungspotential des Abfalls. Die Brandrisikostufe entspricht der Anzahl an Bewertungskriterien, die mit „Ja“ beantwortet wurden. (Vgl. Nigl & Pomberger 2019, S. 2)

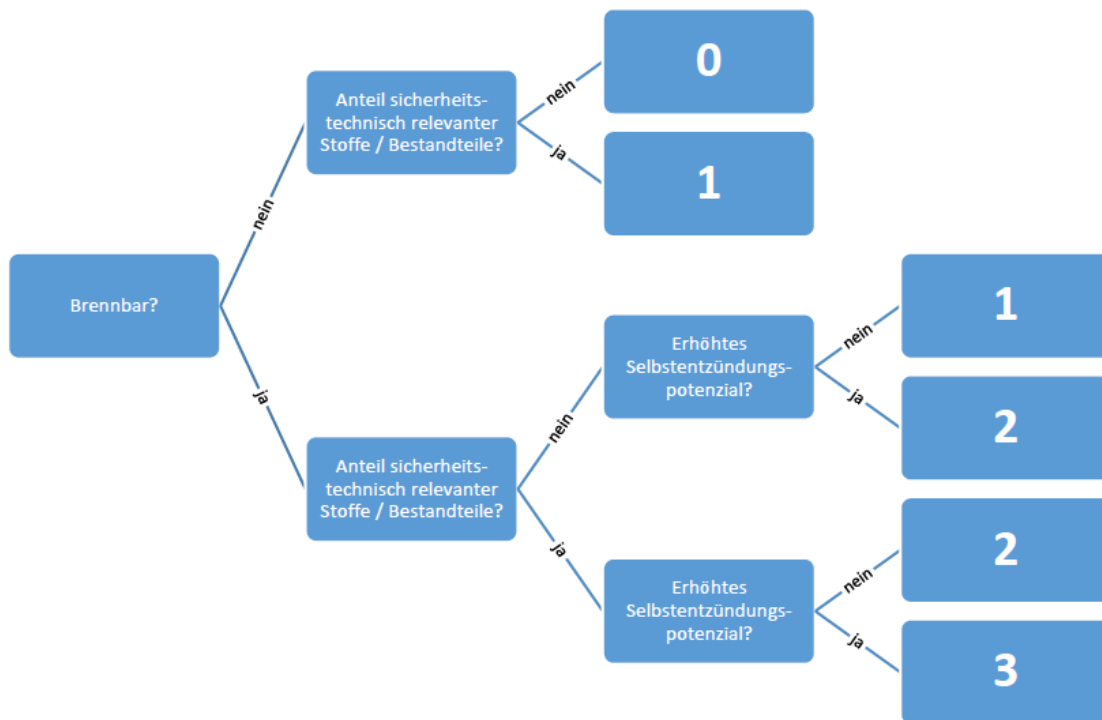


Abbildung 34 Entscheidungsbaum Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger

Die ermittelte Risikoklasse wird dann in der Maßnahmenmatrix angewandt. Die Matrix beinhaltet die Risikobereiche, die in der Abfallwirtschaft vorkommen sowie die zu treffenden Maßnahmen. Die Maßnahmenmatrix berücksichtigt die Fördereinrichtungen nicht als eigenständige Anlage, jedoch sind sie bei den Zerkleinerungsanlagen und Shreddern zu finden. In diesem Fall sieht die Maßnahmenmatrix für die Risikoklassen 1 - 3 einen Maschinen- und Anlagenschutz in Form einer Löschung und eine Maschinen- und Anlagenüberwachung, also eine Detektionsanlage, vor. In Bezug auf die Aufbereitungsanlagen ist für die Risikoklassen 1 - 3 nur eine Detektion vorgesehen.

Lager unterteilen sich in Innenlager kleiner 1.200 m² und größer gleich 1.200 m², in Lager unter Flugdach und Freilager. Die Maßnahmen reichen von Bildung von Brandabschnitten und einer Brandmeldeanlage bis zu einer automatischen Löschanlage sowie einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA).

4.3 Brandschutztechnik

Die Brandschutztechnik behandelt den anlagentechnischen Brandschutz, also alle technischen und konstruktiven Maßnahmen zur Detektion eines Brandausbruches,

sowie die Verhinderung einer Brandausbreitung und im besten Fall die Löschung. Zu der Brandschutztechnik zählen alle Anlagen und Einrichtungen, die automatisch den Schaden im Brandfall an Mitarbeitern und Sachwerten minimieren (Vgl. SIEMENS 2016, S. 27). Der technische beziehungsweise anlagentechnische Brandschutz richtet sich nach der Bauordnung, den Brandschutzbestimmungen oder Vorgaben von Versicherern. Je nach Schutzziel, Schutzbereich und Schutzfunktion werden unterschiedliche technische Brandschutzeinrichtungen angewendet. Im Bereich der Förder- und Anlagentechnik bilden, wie auch in der Maßnahmenmatrix des VOEB vorgesehen, Brandmelde- und automatische Löschsyste me den Hauptbestandteil des anlagentechnischen Brandschutzes, auf welche im Folgenden genauer eingegangen wird.

4.3.1 Brandmeldung

4.3.1.1 Nutzen und Aufgabe von Brandmeldeanlagen

Die Entwicklung eines Brandes verläuft in einer Exponentialkurve, wie in Abbildung 35 dargestellt: Nach einer relativ langsamen Oxidation, Erwärmung und allmählichem Erreichen der Zündtemperatur folgt eine Kettenreaktion, die die Brandausbreitung beschleunigt. Analog zur Ausbreitung des Brandes steigt auch die Schadenshöhe, wie folgende Abbildung zeigt (Vgl. Gressmann 2018, S. 91).

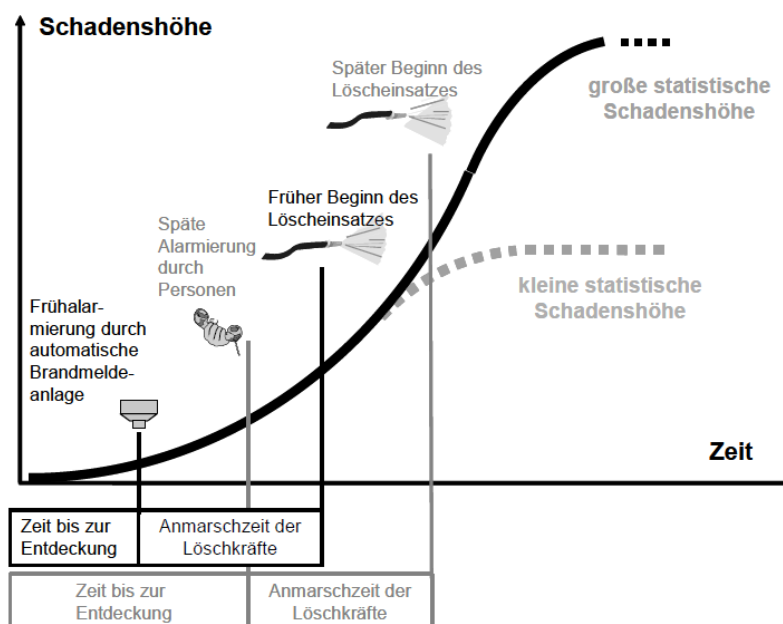


Abbildung 35 Schadensentwicklung Brand Quelle: Gressmann

Da die Anmarschzeit der Löschkräfte, beziehungsweise der Beginn der Brandbekämpfung durch automatische Löschanlagen, sich nicht stark ändert, liegt es an einer möglichst frühen Branderkennung, die Schadenssumme niedrig zu halten. Deshalb ist eine Brandmeldeanlage (BMA) ein wesentlicher Bestandteil des anlagentechnischen Brandschutzes. Die Anlagen müssen im Gesamtzusammenhang des integralen Brandschutzes geplant und gebaut werden, um die gesetzten Schutzziele, wie die Entdeckung von Bränden in der Entstehungsphase, eine eindeutige Lokalisierung des Gefahrenbereiches, eine schnelle Alarmierung, die Ansteuerung von anderen Brandschutzeinrichtungen und die Alarmierung und Information der Feuerwehr zu erreichen. (Vgl. Gressmann 2018, S. 92)

4.3.1.2 Grundlagen der Branderkennung

Geeignete technische Geräte können so genannte Brandkenngößen detektieren und auswerten und somit zur Brandmeldung herangezogen werden. Durch stoffliche und energetische Reaktionen werden bei jedem Brand Produkte freigesetzt, die als unverbranntes Material zurückbleiben oder flüchtig sind. Zu diesen flüchtigen Produkten zählen Gase und Dämpfe, welche toxisch oder korrosiv sein können. Aufgrund verschiedener chemischer und physikalischer Vorgänge können sich auch Rauch- bzw. Rußpartikel formen. Zudem wird durch exotherme chemische Reaktionen bei einer Verbrennung Wärmeenergie freigesetzt, die sich als Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung ausbreitet. Das Strahlungsspektrum reicht von Infrarot bis Ultraviolett. Für die Brandmeldetechnik ist die Wärmeleitung jedoch nachrangig. Diese Vorgänge führen zu Folgeerscheinungen, die als Brandkenngößen bezeichnet werden, welche unter anderem sichtbarer und unsichtbarer Rauch, Gase, feste und flüssige Stoffe, infrarote, sichtbare und ultraviolette Strahlung und molekulare Bewegungen sind. Um diese Brandkenngößen für die Brandmeldung nutzen zu können, müssen sie zuverlässig messbar sein. Folgende Abbildung zeigt die Brandfolgeerscheinungen und dazu geeigneten Meldertypen (Vgl. Gressmann 2018, S. 89f).

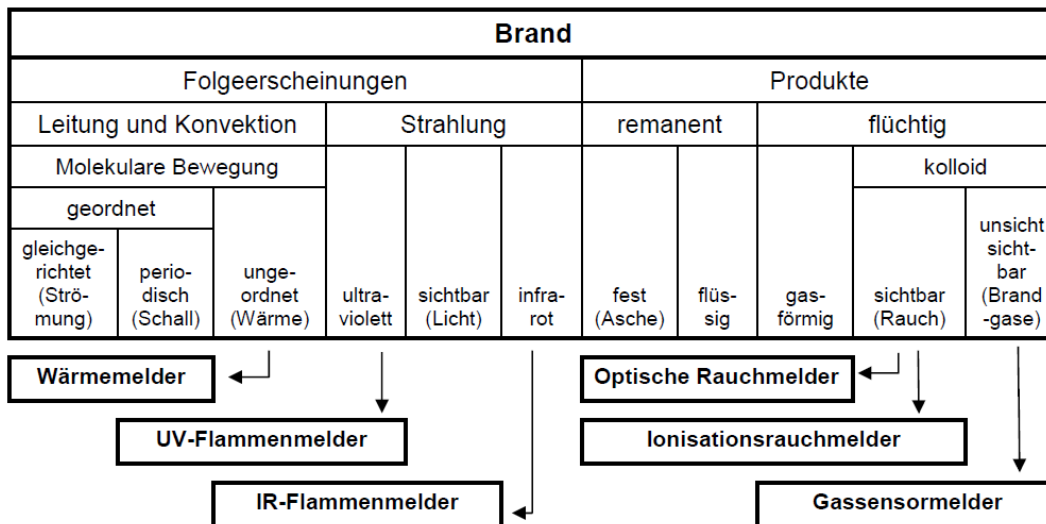


Abbildung 36 Einteilung Meldertypen Quelle: Gressmann

4.3.1.3 Brandmelder

Das Herzstück der Brandmeldeanlage bildet die Brandmeldezentrale (BMZ), die alle Funktionen der Anlage vernetzt und weitere Schritte wie die Ansteuerung von Brandschutzeinrichtungen oder die Alarmierung und Warnung einleitet. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist der Brandmelder selbst, der nach den oben erwähnten Prinzipien arbeitet. Die gewählte Melderart sowie die Anzahl und Anordnung der Melder hängt wesentlich von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Diese sind zum Beispiel die Materialien im Überwachungsbereich und deren Entzündbarkeit, Brennbarkeit und Menge, die zu erwartende Ausbreitungsgeschwindigkeit, Rauch- und Flammenentwicklung, die räumlichen Abmessungen des Überwachungsbereiches sowie die Einbauten darin, die die Rauch- und Strahlungsausbreitung beeinflussen und die allgemeinen Umgebungsbedingungen in den überwachten Räumen. Die Auswahl der Melder hängt stark von diesen Bedingungen ab und soll die schnellstmögliche zuverlässige Alarmierung ermöglichen. Oft kann dies aus einer Kombination verschiedener Melder erreicht werden. (Vgl. Gressmann 2018, S. 110)

Grundsätzlich muss man zwischen den großen Gruppen Rauch-, Wärme-, Flammen- und Gasmelder unterscheiden, die nach verschiedenen Prinzipien funktionieren und wirken. Dem je nach zu erwartender Brandentwicklung, vorhandenen Stoffen sind die verschiedenen Melder anzupassen, beziehungsweise zu kombinieren, um einen umfassenden Schutz zu gewährleisten. Rauchmelder haben einen sehr breiten Ansprechbereich für einen

allgemeinen Einsatz, haben aber den auch den Nachteil, dass sie sehr anfällig für Fehlalarme sind. Die Reaktionszeit ist zwar sehr schnell, jedoch können sie keine Verbrennungsprodukte von rauchlos brennenden Substanzen detektieren und reagieren auch auf Staub und Verschmutzung. Weniger empfindlich hingegen sind Wärmemelder, jedoch erhöht sich auch die Reaktionszeit dieses Typs. Wärmemelder sprechen auf eine Temperaturerhöhung an und werden dort eingesetzt, wo im Brandfall mit einem schnellen und starken Anstieg der Temperatur zu rechnen ist. Erreicht die Temperatur in der detektierten Umgebung betriebsbedingt höhere Werte, kann die Funktion des Melders beeinträchtigt werden. Gasmelder sind Sensoren, die auf die Konzentration eines bestimmten Gases reagieren. Diese Methode eignet sich gut zur Detektion von Schwelbränden und misst die Werte von beispielsweise Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H₂), Kohlenwasserstoffen oder Stickoxyden. Der Einsatz mehrerer verschiedener Sensoren macht die Melder unempfindlich gegen Luftfeuchtigkeit, Staubanfall und Luftströmung. Dies führt zu einer hohen Nachweisempfindlichkeit bei niedriger Täuschungsrate, weshalb diese Melder gerne in Industrieanlagen eingesetzt werden. Flammenmelder detektieren die ausgehende Strahlung von Bränden und können ultraviolette (UV) oder infrarote (IR) Strahlung beziehungsweise eine Mischung beider erkennen. Flammenmelder haben eine schnelle Reaktionszeit bei Flammenbränden, können aber keine Schwelbrände erkennen. Bei Flammenbränden von kohlenstoffhaltigen Materialien werden IR-Melder verwendet. (Vgl. Gressmann 2018, S. 116ff)

4.3.2 Löschsyste

Löschsyste

Löschanlagen. In dieser Gruppe unterscheidet man wiederum zwischen Raumschutzanlagen und Objektschutzanlagen. (Vgl. Gressmann 2018, S. 174f)

Unter Löschhilfanlagen oder Löschanlagen versteht man im Allgemeinen eine ortsfeste, vorinstallierte Brandbekämpfungseinrichtungen, die, ausgelöst durch vordefinierte Brandkenngrößen, automatisch mit der Brandbekämpfung beginnt. Es muss jedoch festgehalten werden, dass in der Regel eine vollständige Löschung des Brandes nicht möglich ist, weshalb eine Alarmierung der Feuerwehr oder geschulter Mitarbeiter zusätzlich durchgeführt werden muss.

Zu den Löschanlagen gehören Sprinkleranlagen, die die größte Gruppe darstellen, Sprühwasser- und Wassernebelanlagen sowie unter anderem Schaum-, Pulver- und Gaslöschanlagen.

4.3.2.1 Wasser-Löschanlagen

Die Wasser-Löschanlagen beinhalten die Sprinkler-, Sprühwasser- und Wassernebel-Löschanlagen und bilden den größten und wohl bekanntesten Teil der automatischen Löscheinrichtungen. Die Löschwirkung wird durch Wasser erzielt, dem günstigstem Löschmittel. Auf die unterschiedlichen Löschmittel wird später noch genau eingegangen. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass Wasser in der Regel in sehr großen Mengen und über eine lange Dauer zur Verfügung steht. Die Wasserlöschanlagen können entweder selbstständig auslösen, wenn die Temperatur steigt, oder über eine Brandmeldeanlage angesteuert werden. Sprinkleranlagen verteilen bei der Öffnung des Sprinklerkopfes das Wasser über einen Teller über eine größere Fläche. Dabei wird zwischen verschiedenen Bauformen unterschieden, wie in untenstehender Abbildung ersichtlich. Anzahl und Verteilung der Sprinklerköpfe richtet sich nach Größe des zu schützenden Bauwerks und dessen Inhalt. Sprühwasseranlagen sind Sprinkleranlagen sehr ähnlich, besitzen jedoch nur eine Öffnung, durch die das Wasser abgegeben wird. Sie werden eingesetzt, wenn eine schnelle Brandausbreitung zu befürchten ist. Wassernebellöschanlagen zerstäuben das austretende Wasser in sehr kleine Tröpfchen, was eine bessere Kühlwirkung bewirkt.

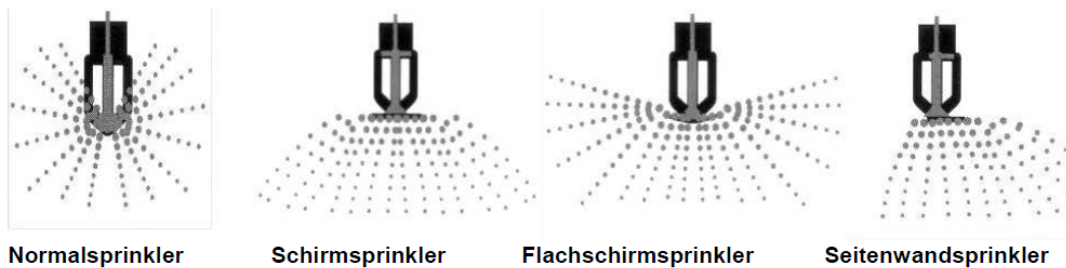


Abbildung 37 Sprinklertypen Quelle: Gressmann

4.3.2.2 Andere Löschanlagen

Pulver-, Gas- und Schaumlöschanlagen werden für Spezialanwendungen eingesetzt und größtenteils über Brandmeldeanlagen angesteuert. Pulverlöschanlagen werden vorwiegend bei Flammbränden eingesetzt und wirken antikatalytisch. In Industrieanlagen kommen Pulverlöschanlagen kaum zum Einsatz, da das Löschpulver die Anlagen verschmutzt und weiteren Schaden verursacht. Gaslöschanlagen wirken erstickend und verdrängen den Sauerstoff. Am öftesten wird dabei Kohlendioxid (CO₂) eingesetzt. Löschgase hinterlassen keine Rückstände. Dafür müssen aber die gesamten Schutzbereiche – die dicht ausgeführt sein müssen - geflutet werden. Schaumlöschanlagen werden hauptsächlich in Bereichen eingesetzt, in denen große Mengen an brennbaren Flüssigkeiten vorkommen. Eine Ausnahme bilden Löschanlagen mit Druckluftschaum, auch CAFS genannt, die häufig in Recyclinganlagen eingesetzt werden. Vorteil dieses Schaums ist die Eindringtiefe ins Brandgut und die Haftbarkeit. Der Druckluftschaum wird ebenfalls über Sprühköpfe aufgetragen. In Sonderlösungen können die Löschmittel wie Wasser oder Schaumgemisch auch über Werfer, so genannte Monitore, abgegeben werden.

4.4 Brandschutznormen für Förderbänder

Die Brandbeständigkeit von Gurtförderern wird in der Norm DIN EN 12882 „Fördergurte für allgemeine Anwendung - Elektrische und brandtechnische Sicherheitsanforderungen“ geregelt. Darin ist nicht nur die elektrische Leitfähigkeit, sondern auch der Widerstand gegen Entzündung und die Brandweiterleitung festgeschrieben. Die Gurte werden hierzu in zehn Kategorien eingeteilt (1 bis 5C). Die Kategorien 2A und 2B kommen zum Einsatz, wenn die Gefahr einer kleinen Flamme bestehen kann. Die Kategorien 3A und 3B schließen neben der kleinen Flamme auch die Gefahr der Erhitzung durch Reibungswärme mit ein. Bei einer

Gefahr der Brandausbreitung verursacht durch weitere Brandquellen, sind die Kategorien 4A und 4B zu wählen. Die letzten Stufen 5A, 5B und 5C beinhalten die beschriebenen Gefahren der Vorstufen und schließen die höhere Gefahr der höheren Erhitzung durch Reibung, die Gefahr des Glühens oder den Betrieb in potentiell entflammbaren Atmosphären mit ein. Die Flammenwidrigkeit erhöht sich mit den Kategorien. Die Verfahren zur Bestimmung sind ebenfalls in der Norm geregelt und erst ab Stufe 4A erforderlich. Dabei werden Probestücke je nach Verfahren mit verschiedenen Brennern beflammt. Das Brandverhalten von Fördergurten unter Laborbedingungen ist in der Norm DIN EN ISO 340 geregelt, wobei auch die Nachbrennzeit und die Nachglimmzeit bestimmt werden. Diese Tests werden mit und ohne Deckplatten des Fördergurtes durchgeführt. Eine weitere Prüfnorm, die DIN EN 1554, beschreibt den so genannten Reibtrommeltest. Dabei wird ein festsitzender Fördergurt bei einer sich drehenden Antriebstrommel simuliert, wobei es zu keiner Flammenbildung (3A, 3B und ab 4B), beziehungsweise zu keinem Glühen (5A und 5B), kommen darf. Bei der Installation solcher Fördergurte ist auch unbedingt darauf zu achten, dass entsprechende, also nicht brennbare, Verbindungsmittel eingesetzt werden.

Bei der Förderung von leicht brennbarem Abfall ist darauf zu achten, dass die entsprechenden Normen eingehalten werden, damit der Förderer selbst nicht zur Brandquelle wird. Um dies zu gewährleisten, sollten bestenfalls Fördergurte der Kategorien 5A oder 5B eingesetzt werden und weitere Wärmequellen wie Antriebe oder Motoren bestmöglich abgekapselt werden. Da es bei einem Brand von Lithiumionenbatterien zu Temperaturen von rund 800°C kommen kann, ist ein hoher Brandwiderstand des Gurtförderers ebenfalls sehr wichtig, um nicht eine weitere Brandquelle zu schaffen.

4.5 Feuerschutzabschlüsse

Um eine Ausbreitung von Feuer und Rauch zu verhindern, werden Brandabschnitte gebildet, um auch so die Brandlast zu minimieren. Da aber Förderanlagen die Brandabschnitte miteinander verbinden, müssen diese Öffnungen dementsprechend abgesichert sein. Wenn die Fördereinrichtungen durch Wände oder Decken geführt werden, die aufgrund der Brandabschnittbildung feuerbeständig ausgeführt sind, sind für die entstehenden

Öffnungen spezielle Feuerschutzabschlüsse (Abbildung 38 und 39) vorzusehen, die die gleiche Feuerwiderstandsklasse wie die Wände oder Decken aufweisen. Die Feuerschutzabschlüsse werden als Förderanlagenabschlüsse (FAA) bezeichnet und bestehen aus einem Absperrerelement, einem Rahmen, einer Schließvorrichtung und gegebenenfalls einem Antrieb. Funktionieren kann ein solcher Abschluss nur im Zusammenspiel mit einer Feststellanlage, einer Steuerung und der Förderanlage selbst. Die Förderanlagenabschlüsse werden auch zusammen mit den genannten Parametern beurteilt. Die Abschlüsse unterscheiden sich bezüglich ihrer Grundstellung und nach dem Öffnungsabschluss. Offene Abschlüsse schließen nur im Brandfall und sind im Betrieb geöffnet, wohingegen geschlossene Abschlüsse nur beim Durchgang des Fördergutes öffnen. Bei dem Öffnungsabschluss wird zwischen verschiedenen Mechanismen unterschieden. Zum einen gibt es Förderanlagenteile, die von vorne herein im Schließbereich getrennt sind, zum anderen werden andere vor beziehungsweise während des Schließens getrennt. Als dritte Möglichkeit gibt es Anlagenteile, die in der geschlossenen Position durch die Öffnung hindurchgehen und die Restöffnung durch temperaturabhängig aufschäumende Baustoffe verschlossen wird. Bei Förderanlagenabschlüssen ist darauf zu achten, dass der Abschluss nicht durch Fördergut behindert oder beschädigt wird. Um dies auch zu gewährleisten, wenn es durch den Brandfall zu einem Stromausfall kommt, ist eine spezielle Steuerung notwendig. Diese ist unter Umständen auch mit Notstrom zu versorgen. (Vgl. Merschbacher 2018, S. 68f)



Abbildung 38 Feuerschutzabschluss Quelle: Merschbacher

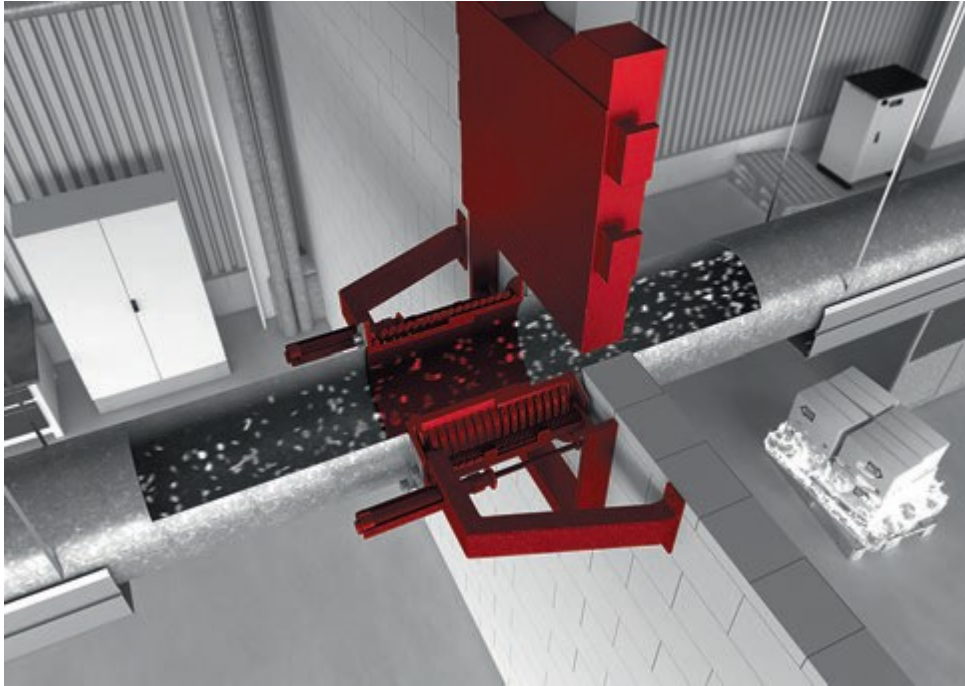


Abbildung 39 Feuerschutzabschluss Quelle: Merschbacher

Nach der Richtlinie des österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes ÖBFV RL 05 bietet eine Wasserbeaufschlagung einen brandschutztechnischen Abschluss. Diese Beaufschlagung hat mit 20 l/min.m^2 auf eine Dauer von 90 Minuten zu erfolgen.

4.6 Lösungen für die Abfallwirtschaft

Das Problem der neuen Brandschutzproblematiken, wie den Lithiumionen-Akkus, und die steigende Zahl der Brandfälle wurden von der Abfallwirtschaft bereits erkannt und Aufbereitungsanlagen wurden brandschutztechnisch angepasst. Die im Folgenden vorgestellten und beschriebenen Konzepte wurden nicht nur auf bestehende, sondern auch neue Anlagen angewandt, jedoch wurde nie die Förderanlage selbst aus der Sicht des Brandschutzes betrachtet. Förderanlagen werden stets auf hohen Durchsatz und kurze Förderwege ausgelegt und die Brandschutzsysteme erst im nächsten Schritt hinzugefügt.

Nicht nur die Abfallwirtschaft hat reagiert, sondern auch Brandschutzausstatter haben den Markt erkannt und bieten Komplettlösungen für diesen Bereich an. Innovative Firmen entwickeln Detektions- und Löschsysteme für Müllaufbereitungs- und Verarbeitungsanlagen.

Die Industrie hat die Problemfelder identifiziert, die im Allgemeinen der Importbereich, der Aufbereitungsprozess selbst und der Übergang ins Lager sind. Im ersten Fall werden Glutnester bereits bei der Anlieferung des Mülls oder des Ersatzbrennstoffes mittels LKW oder Bahn eingeschleust und in das Lager gefördert. Im Prozess kommt es auf Grund der oben ausführlich beschriebenen Prozesse zu Bränden. Der Übergang in das Lager bietet die letzte Möglichkeit, den Brand direkt zu bekämpfen. Wird das Glutnest in das Haufwerk getragen, kann es danach zu einer schnellen und intensiven Brandausbreitung kommen. Dagegen ist die Brandgefahr im Lager mit dem fertig aufbereiteten Brennstoff gering, da Problemstoffe weitestgehend entfernt wurden und Phänomene wie die Selbstentzündung ebenfalls kaum vorkommen.

Im Bereich der Anlieferung des zu behandelnden Abfalls besteht das Hauptproblem darin, dass sich bereits Glutnester in den Transportmitteln wie LKW oder Bahnwaggon befinden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich leicht entzündliche Abfälle an heißen Fahrzeugteilen entzünden. Eine Verschleppung in das Lager oder die Bunker muss unbedingt verhindert werden. Bei dem Abladen des Abfalls kann es auch durch Sauerstoffzufuhr zu einer offenen Flamme beziehungsweise Brandausbreitung kommen. In bestehenden Konzepten werden dazu in den Anlieferungsbereichen Infrarotkameras (Abbildung 40 und 42) eingesetzt, die ständig den ganzen Bereich abscannen. Spezielle Programme werten die Bilder aus und lösen ab einer bestimmten Temperaturgrenze die Löschanlage aus. Das System ist in der Lage, einen Brand von anderen heißen Oberflächen wie Anlagenteilen oder Fahrzeugauspuff zu unterscheiden. Die Koordinaten der Brandstelle werden weitergegeben und ein Wasserwerfer (Abbildung 41, 42 und 43) angesteuert. Dieser bringt das Löschmittel punktgenau mit bis zu 1500 l/min und 60 m Reichweite auf (Vgl. Eichinger 2012, S. 1f). Eine andere Möglichkeit ist die Ansteuerung einer Sprühflutanlage, die den gesamten Lagerbereich abdeckt. Der Vorteil der direkten Brandbekämpfung mit Werfer besteht darin, dass das restliche Haufwerk nicht mit Löschmittel kontaminiert wird und weiter verarbeitet werden kann beziehungsweise es bei Ersatzbrennstoffen zu keiner Minderung des Brennwertes dadurch kommt. Liegt jedoch das Glutnest sehr tief und wird es durch isolierende Stoffe wie Kunststoffe abgeschirmt, können Wärmebildkameras die Schwelbrände nicht erkennen. Auch besteht das Problem,

dass aus einem Wärmehotspot an der Oberfläche nicht auf den tatsächlichen Brandherd im Inneren geschlossen werden kann, wenn die heißen Brandgase einen anderen Weg durch das Haufwerk nehmen. Als Löschmittel kommen Wasser oder Schaum zum Einsatz. Löschschaum hat den Vorteil, dass er besser in das Haufwerk eindringen kann.



Abbildung 40 IR-Überwachung Quelle: Rosenbauer



Abbildung 41 Automatische Löschanlage Quelle: Rosenbauer



Abbildung 42 Überwachung Entladevorgang Quelle: Rosenbauer



Abbildung 43 Zusammenspiel IR-Kamera und Löschmonitor Quelle: Rosenbauer

In geschlossenen Lagerbereichen oder Bunkern, sei es bei der Anlieferung oder der Lagerung der separierten oder aufbereiteten Abfälle bzw. Brennstoffe, kommen bei modernen Brandschutzlösungen ebenfalls IR-Kameras in Verbindung mit Werfern oder Sprühflutanlagen zum Einsatz (Abbildung 44). Auch hier setzt man auf Wasser oder Schaum als Löschmittel. In abgeschlossenen Lagern ist eine Detektion der Brandgase möglich, die meist in den Filteranlagen geschieht. Sprinkler, die mittels Glasampulle auslösen, kommen in Bunkeranlagen nicht vor, da diese erst bei einer großen Erwärmung auslösen. In großen Bunkeranlagen, die mit vollautomatischen Kränen von oben beschickt werden, werden Werfer an

den Wänden eingesetzt, da sie sonst durch die Kranbahnen behindert werden, wie in Abbildung 45 ersichtlich. Diese Werfer können in die Wand versenkt werden und sind durch eine Schutzklappe vor Beschädigung durch Fördergut von oben geschützt (Abbildung 46). (Vgl. Rosenbauer 2014, S. 1f)



Abbildung 44 Zielgenaues Löschen Quelle: Rosenbauer



Abbildung 45 Überwachung Müllbunker Quelle: Rosenbauer



Abbildung 46 Geschützter Löschmoditor in Bunker Quelle: Rosenbauer

Im Prozessbereich selbst ist jede Anlage selbst gesichert und überwacht. Förderanlagen werden, speziell nach Anlagen wie Shreddern, mittels IR-Systemen überwacht (Abbildung 47), die bei erhöhten Temperaturen den Förderer stoppen und das Löschesystem ansteuern. Auch bei der Auslösung einer Brandschutzeinrichtung der Aufbereitungsanlagen selbst werden die Förderanlagen angesteuert und gestoppt, um eine Ausbreitung zu verhindern. Über dem Förderband sind Sprinklerdüsen (Abbildung 48 und 49) platziert, die das Brandgut ablöschen. Hauptaufgabe ist es, das umliegende Fördergut zu kühlen, damit sich der Brand nicht ausbreitet. Das Brandnest selbst ist durch Mitarbeiter oder die Feuerwehr zu entfernen und weiter abzulöschen. Als Löschmittel wird Wasser oder Schaum, im Besonderen Druckluftschaum, eingesetzt. Diese CAFS-Anlagen können nachträglich ohne viel Aufwand installiert werden und arbeiten autark, da keine Wasserleitung benötigt wird (Abbildung 50 und 51). Druckluftschaum ist im Gegensatz zu Wasser jedoch nur bis zu einem bestimmten Maß verfügbar, bietet aber andere Vorteile, die im Kapitel 4.8.2 weiter behandelt werden. Aktuelle Brandschutzkonzepte reichen von einer Überwachung kritischer Stellen der Förderanlagen, wie nach dem Shredder, bis hin zur vollständigen Überwachung durch Wärmebildkameras. Durch eine Detektion an zwei Stellen eines Förderbandes ist es möglich, Fördergut, das zwischen zwei Temperaturgrenzen liegt, nur zu kühlen und danach weiter zu verarbeiten. Dies senkt die Zahl der Betriebsunterbrechungen, da nicht immer der Förderer angehalten werden muss, um das brennende Fördergut zu entfernen und weiter

abzulöschen. Ist die Temperatur an der zweiten Messstelle gesunken, wird es weiter verarbeitet. Ist die Temperatur an der ersten Messstelle schon über einem Grenzwert, wird die Förderanlage gleich gestoppt und die Löschanlage aktiviert. (Vgl. Rosenbauer 2018, S. 1f)



Abbildung 47 IR-Überwachung an Förderband Quelle: Rosenbauer



Abbildung 48 CAFS-Sprinklerdüsen Quelle: Rosenbauer



Abbildung 49 Gurtförderer mit Löschanlage Quelle: Rosenbauer



Abbildung 50 CAFS-Sprinklerdüse Quelle: Rosenbauer



Abbildung 51 CAFS-Anlage Quelle: Rosenbauer

Ein weiterer Punkt in den Konzepten der Firmen ist der organisatorische Brandschutz. Dazu zählen alle betrieblichen Maßnahmen zur Vermeidung der Brandentstehung. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Säuberung der Förder- und Aufbereitungsanlagen in gewissen zeitlichen Abständen. Dies verhindert die Ansammlung von brennbaren Materialien an schwer erreichbaren Stellen oder an heißen Anlagenteilen wie Antriebseinheiten der Fördermaschinen. So ist das untere Bandtrum von Bandförderern mit Planen verschlossen, die eine Schmutzausbreitung verhindern und zum Reinigen leicht mittels Reißverschluss oder anderen Verschlusssystemen zu öffnen ist. Die Förderanlagen müssen aus diesem Grund mittels Stegen leicht zugänglich sein. Bei Reinigungsarbeiten sind sämtliche Anlagen abzuschalten und zu sichern, um eine Gefährdung für Mitarbeiter auszuschließen. Die Zugänglichkeit zu sämtlichen Anlagenteilen erleichtert zudem die direkte Brandbekämpfung und ermöglicht das Entfernen von Brandgut.

4.7 Lösungen in anderen Industriezweigen

Der Schutz von Förderanlagen ist nicht nur in der Abfallwirtschaft von Bedeutung. In Industrieanlagen, bei denen brandgefährliches Fördergut transportiert wird, sollte auf den Brandschutz großes Augenmerk gelegt werden. Die VdS Schadenverhütung GmbH, eine Tochter des Gesamtverbandes der Deutschen

Versicherungswirtschaft, gab eine Publikation zum Thema „Brandschutz in Kraftwerken“ heraus, die alle brandschutztechnischen Maßnahmen für die Errichtung, die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Revision enthält.

Brennstoffe für Kraftwerksanlagen sind leicht entzündlich und haben einen hohen Heizwert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die verwendete Kohle gelegt. Als Förderanlagen werden in Kraftwerken Bandanlagen, eingehauste Gurttaschen, Wellkantengurte und Trogkettenförderer, sowie Rohrgurtförderer eingesetzt. Aus brandschutztechnischer Sicht sind eingeschleppte Glutnester einer der Risikoschwerpunkte. Aber auch Funkenschlag oder Heißlauf der Trogketten zählen dazu, gleich wie Brände infolge von defekten mechanischen Bauteilen. Auch der Schiefelauf der Stetigförderer und heiße Antriebe sind mögliche Gefahrenquellen. Weitere Risiken entstehen durch den Brand von Gurtbändern, Kohleablagerungen auf Konstruktionsbauteilen und erhöhten Brandlasten in der Förderstrecke. Verfahrenstechnische Maßnahme zur Verhinderung der Brandentstehung oder –ausbreitung sind zum Beispiel die Installation der elektrischen Betriebsmittel in der Schutzart IP 5X, entsprechend der vorgesehenen Reinigungsart. Oberflächentemperaturen der elektrischen und mechanischen Betriebsmittel werden auf maximal zwei Drittel der Zündtemperatur des Kohlestaubes angepasst. Ebenso wichtig sind regelmäßige Zustandskontrollen der Anlage, wie die Detektion von Heißläufern mittels automatischer thermischer Überwachung ausgewählter Anlagenbereiche. Fördergurte sollen bei längeren Betriebsunterbrechungen leer gefahren oder andere geeignete Ersatzmaßnahmen, wie das Anfeuchten oder Brandwachen, ergriffen werden. Kohleablagerungen sollen, geregelt durch Betriebsanweisungen, regelmäßig beseitigt werden, insbesondere in Bereichen bewegter Förderanlagenteile. Um starke Staubablagerungen überhaupt zu vermeiden, sind Staubunterdrückungsanlagen zu installieren. Zum Einsatz kommen schwer entflammable Fördergurte gemäß der Kategorien 4 oder 5 nach DIN 12882 und eine Schiefelaufüberwachung der Gurte. Innerhalb von Brandbrücken dürfen keine Rohrleitungen aus Kunststoff sowie elektrische Leitungen verlegt werden. Ausnahmen bilden Beleuchtung und sicherheitstechnische Einrichtungen. Sicherheitstechnische Einrichtungen sind regelmäßig auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen. Bauteile mit Horizontalflächen größer 40 mm Breite, an denen sich

Kohlestaub ablagern kann, sind in einem Winkel von $>60^\circ$ zu montieren oder zu verkleiden. Zur Erleichterung von Prüfprozessen ist vorzugsweise auf eine Installation von außenliegenden Lagern an Trommeln oder Rollen der Förderanlage zu achten. Angriffswege der Feuerwehren in begehbaren Förderanlagen sind vorzusehen. Die Entscheidung, ob eine Förderanlage im Brandfall abgeschaltet werden soll, ist im Einzelfall zu treffen. (Vgl. GDV 2017, S. 54)

4.8 Löschmittel für Abfall

4.8.1 Löschen

Als Löschen wird, wie bereits erwähnt, die Unterbrechung der chemischen Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und dem Oxidationsmittel, die als Feuer in Erscheinung tritt, bezeichnet. Dies geschieht durch technische oder taktische Handlungen. Dabei werden eine oder mehrere Bedingungen für einen Brand entfernt. Analog zum bereits betrachteten Verbrennungsdreieck kann somit ein Löschdreieck betrachtet werden, mit dessen Hilfe die Löschwirkung beschrieben wird. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 23)



Abbildung 52 Prinzipien Löschen Quelle: Pfeiffer

4.8.2 Löschmittel

Im Folgenden soll auf die Unterscheide, Wirkweisen, Vor- und Nachteile verschiedener Löschmittel eingegangen werden. Auch die praktische Anwendung in abfallwirtschaftlichen Anlagen wird betrachtet. Die gängigsten Löschmittel sind Wasser für feste, Schaum für feste oder flüssige, Pulver für feste, flüssige und

gasförmige Brennstoffe. Die wichtigsten Vertreter der Löschgase werden für flüssige und gasförmige Brennstoffe eingesetzt. Zudem gibt es Sonderlöschmittel, die in speziellen Einsatzbereichen verwendet werden. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 28)

4.8.2.1 Wasser

Wasser ist nicht nur das älteste und bekannteste Löschmittel, sondern kann bei 90% aller Brände eingesetzt werden, da es sich hierbei um Feststoffbrände handelt. Wasser besitzt ein hohes Wärmebindungsvermögen, wodurch es stark abkühlend wirkt. Bei einer Erwärmung von einem Liter Wasser von 10°C auf 100°C werden 2615 kJ an Wärme gebunden. Das bewirkt eine Störung der thermischen Reaktion und unterbricht die thermische Aufbereitung brennbarer Stoffe. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 30)

Je feiner das Wasser zerstäubt wird, desto größer ist die spezifische Oberfläche, was wiederum die Gesamtkontaktfläche mit dem Brandgut vergrößert. So erhöht sich das praktische Wärmebindungsvermögen mit Hilfe von Sprüh- und Nebelstrahltröpfchen. Theoretisch weist der gebildete Wasserdampf auch einen erstickenden Effekt auf, da aus einem Liter Wasser rund 1700 l Wasserdampf bei 100°C entstehen. Dieser Effekt hätte in der Praxis aber nur bei reinen Flammbänden eine Bedeutung, jedoch ist die Berührungszeit auch hier zu kurz. Außerdem ist Wasserdampf leichter als Luft und steigt aus der Verbrennungszone auf. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 30)

Dem Löschmittel Wasser können löschwirksame Zusätze hinzugefügt werden. Einer davon ist das Netzmittel, bei dem die Oberflächenspannung verringert wird, wodurch das Brandgut besser benetzt wird und der Verbrauch sowie die Löszeit geringer sind. Theoretisch ist Netzmittel dem reinen Wasser als Löschmittel vorzuziehen, was am Preis von Netzmittel und den benötigten Zumischsystemen oft scheitert. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 29f.)

Zusammengefasst sind die Vorteile vom Löschmittel Wasser das größte Wärmebindungsvermögen aller und dass es einen breiten Einsatzbereich aufweist. Der Transport mittels Pumpen und Schläuchen ist über große Höhen und Entfernungen möglich. Es ist zudem sehr preiswert, da es keine besonderen Herstellungsverfahren benötigt. Außerdem ist Wasser ungiftig, ungefährlich und de-facto unerschöpflich. Nachteil hingegen ist der hohe Gefrierpunkt, was zu

zugefrorenen Löschwasserentnahmestellen, Glatteisbildung an der Einsatzstelle und zur Beschädigung von Rohren und Pumpen führen kann. Bei einer unsachgemäßen Anwendung kommt es zu erheblichem Wasserschaden und bei kontaminiertem und verschmutztem Löschwasser ist eine fachgerechte Entsorgung notwendig. Aus diesem Grund sind in Industrieanlagen Löschwasserrückhaltebecken vorzusehen. Bei einigen Bränden mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, aber auch chemischen Substanzen oder metallischen Brennstoffen, kann kein Wasser eingesetzt werden. Auch Brände von Lithium-Ionen-Akkus können nicht mit Wasser gelöscht werden, da es zu einer Reaktion mit dem Metall kommt. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 46f.)

4.8.2.2 Löschaum

Schaum wird für Brände von festen und flüssigen Brennstoffen eingesetzt, dabei ist der Löscheffekt aufgrund der umfassenden Löschwirkung ein besserer als mit reinem Wasser. Schaum kann entweder vorgemischt bereitgestellt oder durch einen Zumischer erzeugt werden. Bei der Zumischung entsteht die Verschäumung am Schaumrohr. Beim Druckluftschaum (CAFS) wird kompressorverdichtete Luft dem Schaumittelgemisch zugeführt. So kann einen nasser und trockenere Schaum erzeugt werden. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 34f.)

Die Löschwirkung beruht auf dem Prinzip des Erstickens. Durch die geschlossene Deckschicht kommt kein weiterer Sauerstoff zum Brand. Das austretende Wasser aus dem Schaum erzeugt zudem einen Kühleffekt. Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl an Schaummitteln entwickelt, und so gibt es unter anderem Proteinschaummittel, synthetische Schaummittel, die auch Mehrbereichsschaummittel (MBS) genannt werden, Fluor-Proteinschaummittel, alkoholbeständige synthetische Schaummittel, filmbildende Proteinschaummittel, filmbildende Fluor-Proteinschaummittel und Class-A-Foam (CAFMS). Bei kommunalen Feuerwehren kommen hauptsächlich MBS, mit dem Leicht-, Mittel- und Schwerschaum erzeugt werden kann, und der umweltverträgliche CAFSM vor, die restlichen Schaummittel sind für spezielle Industriezweige oder die Luftfahrt von Bedeutung. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 35f.)

Zusammengefasst sind die Vorteile von Löschaum die höhere Effizienz bei Fest- und Flüssigbränden und die höhere Löschwirkung. Mit Schaum ist das

Fluten, wie in Abbildung 53, von Anlagen und Räumen möglich, er ist danach leicht entfernbar und hat keinen Einfluss auf nicht betroffene Bereiche. Auch kommt es zu einer geringeren Brandgutausschwemmung. Hingegen ist der höhere Preis ein Nachteil, vor allem da er für umfangreiche Anwendungen in einer großen Menge vorrätig sein muss. Höhere Konzentrationen sind zudem aquatotoxisch, und es besteht bei einigen Schaummittelarten ein erhöhtes Umweltrisiko. Druckluftschaum hat zusätzlich die Vorteile, dass es zu einem geringeren Löschmittelverbrauch kommt, er einen geringeren Gegendruck in der Wassersäule hat, je nach Mischung an senkrechten Flächen haftet und eine hohe Wurfweite erreicht werden kann. Dagegen ist aber eine Förderung über lange Wegstrecken ineffizient und unwirtschaftlich, da kein erneutes Pumpen möglich ist. Zudem ist CAFS sehr teuer und hat eine geringe Kühlwirkung. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 49-51)



Abbildung 53 Löschen mit Schaum Quelle: padpa

4.8.2.3 Löschpulver und Löschgase

Pulver und Löschgase finden in abfallwirtschaftlichen Anlagen keine Anwendung, da sie, bis auf ABC-Pulver, vorzugsweise bei Flüssigkeits- und Gasbränden zur Anwendung kommen. Der Vollständigkeit halber sind die Vor- und Nachteile hier kurz erläutert.

Die Vorteile von Löschpulver sind sein breites Einsatzspektrum und die Eignung für Sofortmaßnahmen. Außerdem besteht keine Umweltgefahr und es kommt zu

einem schlagartigen Löscheffekt. Vor allem ABC-Pulver hat den Vorteil, dass es in der Praxis universell einsetzbar ist und somit in den meisten tragbaren Feuerlöschern vorkommt. Dagegen steht aber, dass Pulver nicht die Effizienz von anderen Löschmitteln in ihren typischen Anwendungsbereichen erreicht. Zudem kommt es zu einer großen Verschmutzung von Anlagen und einer Sichtbehinderung, die zur Panik führen kann. Das Einbringen des Pulvers in die Reaktionszone gestaltet sich sehr schwierig, es besitzt keine Kühlwirkung und ist teuer. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 52)

Löschgase sind universell einsetzbar und erfordern nur eine geringe Konzentration. Ein rückstandsfreies Löschen ist damit möglich. Nachteilig sind die schlechte Löschwirkung und die geringe Effizienz. Zudem sind sie nur in stationären Anlagen anwendbar. (Vgl. Pfeiffer 2016, S. 53f.)

4.8.3 Vergleich Löschmittel

Um die Wirkungsweise verschiedener Löschmittel genauer beschreiben zu können, wurden unterschiedliche Versuche zu diesem Thema durchgeführt. Im Folgenden sollen die durchgeführten Untersuchungen kurz beschrieben und zusammengefasst werden.

4.8.3.1 Untersuchung von Löschmittelzusätzen für Ersatzbrennstoffe

Aufgrund der Polarität hat Wasser als Löschmittel eine geringere Wirkung bei Kunststoffbränden als bei vergleichbaren Feststoffen, bedingt durch die chemischen Eigenschaften der Kunststoffe. Im Zuge einer orientierenden Untersuchung wurde die Effektivität von Löschmittelzusätzen im Vergleich zu Wasser ohne Zusätze an Bränden von Ersatzbrennstoffballen getestet. Für die Versuche wurden Wasser, herkömmliches Mehrbereichsschaummittel F15 und der Löschmittelzusatz „MPST2“ herangezogen und in insgesamt sechs Versuchen getestet.

Ballen aus Ersatzbrennstoff (Abbildung 54) mit den Abmessungen von rund 150 cm x 100 cm x 100 cm (Länge x Breite x Höhe) wurden mit mehreren Thermoelementen bestückt, um die Temperatur im Ballen ermitteln zu können. Nach dem Zünden der Ballen wurden die Daten der Thermoelemente erfasst und der Brand mit Kameras aufgezeichnet. Das mittels eines C-Hohlstrahlrohrs

abgegebene Löschmittel wurde mit einem Wasserdurchflussmessgerät gemessen, während der Löschmittelzusatz über ein Zumischsystem zugemischt wurde.



Abbildung 54 EBS-Ballen

Der Versuchsablauf wurde so durchgeführt, dass der EBS-Ballen nach einer definierten Vorbrennzeit komplett abgelöscht wurde (Abbildung 55 und 56). Danach wurde er nochmals entzündet, um die Zeit zu messen, bis er wiederum in Vollbrand steht. Daraufhin wurde der Ballen abermals abgelöscht. Die Zeiten und abgegebenen Löschmittelmengen wurden notiert. Für jeden Ballen wurde ein eigenes Löschmittel angewendet.



Abbildung 55 Brand EBS-Ballen



Abbildung 56 Löschen eines EBS-Ballens

Nach der Auswertung der Versuche konnte aufgrund von Umwelteinflüssen, wie Wind während der Versuche, und der Inhomogenität der EBS-Ballen, keine allgemein gültige Aussage über die Wirkung der Löschmittelzusätze getroffen werden. Bei der Bekämpfung des oberflächigen Brandes war unter den beschriebenen Versuchsbedingungen kein signifikanter Unterschied zwischen Wasser, Schaummittel F15 und MPST2 erkennbar. Alle Brände wurden mit etwa gleich viel Liter Wasser und Sprühstößen gelöscht. Zeitunterschiede beim Wiederentzünden des abgelöschten Ballen können vielfältige Gründe haben und nicht auf das Löschmittel zurückgeführt werden.

Die Versuche brachten jedoch die Erkenntnisse, dass reines Wasser als Löschmittel gar nicht, oder nur sehr langsam, durch den EBS-Ballen sickern konnte. Mit den Löschmittelzusätzen wurde die Oberflächenspannung des Wassers anscheinend so weit herabgesetzt, dass das Löschmittel durch den Kunststoffballen sickert und einen Einfluss auf die Temperaturen im Inneren an den Thermoelementen hatte. Jedoch hat das auch mit der Polarität des Wassers zu tun, das den apolaren Kunststoff schlechter benetzt und somit leichter durch den Ballen sickert.

4.8.3.2 Untersuchung der Kühlwirkung unterschiedlicher Löschmittel

Ziel der Versuche war es, zu untersuchen, welche Löschmittel die beste Kühlwirkung in einer Schüttung von Akku-Zellen entwickeln. In einer Schüttung kann die betroffene Zelle nicht mit Sicherheit erreicht werden, Ziel ist es somit, die benachbarten Zellen so weit zu kühlen, dass sie nicht reagieren. Eine mögliche Kettenreaktion soll dadurch gestoppt werden. Zudem wurden Löschmittel untersucht, die einer kommunalen Feuerwehr in ausreichender Menge zur Verfügung stehen könnten.

Da es aus sicherheitstechnisch Gründen nicht möglich war, im Labor reale Zellen zur Reaktion zu bringen, wurden geometrisch vergleichbare Stahlbolzen als Versuchsmaterial gewählt und eine mögliche Reaktion von Löschmittel mit den zerstörten, beziehungsweise brennenden, Lithium-Ionen-Akkus außer Acht gelassen.

Der Versuchsaufbau, wie in Abbildung 57 und 58 erichtlich, gestaltete sich so, dass ein Metallrohr (150 mm Durchmesser) mit 275 Zylinderstiften gefüllt wurde, die eine ähnliche Größe, wie AA Lithium-Ionen-Zellen, aufweisen. In der zufälligen Schüttung, die zwischen den Versuchen nicht geändert wurde, befanden sich Bolzen, in die Thermoelemente eingegossen wurden. Das Rohr wurde mit den Bolzen gemeinsam in einem Ofen auf rund 140°C aufgeheizt. Anschließend wurde das Löschmittel über eine kleine Membranpumpe angesaugt und mit rund 300 ml/min über dem Rohr abgegeben. Der Kühleffekt wurde mittels der Thermoelemente gemessen und aufgezeichnet.



Abbildung 57 Versuchsaufbau



Abbildung 58 Versuchsaufbau in Ofen

Untersucht wurden das Löschmittel Wasser rein und mit den Zusätzen Class A, F500 und Bioversal. Class A wurde mit 0,3%, wie es für Netzmittel üblich ist, zugemischt. Nach den Einsatzhinweisen für Elektrofahrzeuge, herausgegeben von der Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg 2011, bei dem gute Ergebnisse mit F500 erzielt wurden, wurde eine Zumischung von 3% für diesen Löschmittelzusatz gewählt. Aufgrund vorheriger Erkenntnisse mit Bioversal wurde eine Zumischung von 1% für dieses Löschmittel gewählt.

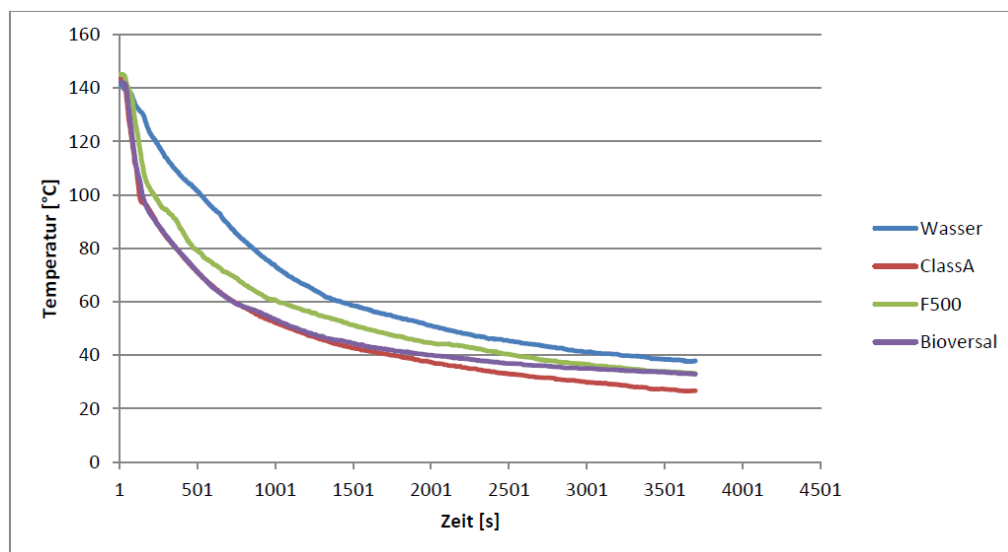


Abbildung 59 Kühlwirkung verschiedener Löschmittel

Im Temperatur-Zeit-Diagramm sieht man den starken Temperaturabfall bei den Löschmittelzusätzen im Gegensatz zu Wasser. Bioversal und Class A fallen gleich stark ab, die Kurve ändert sich erst bei 60°C. Jedoch ist die Steigung der Bioversal-Kurve am Ende nicht so groß, wie bei Wasser, dessen Steigung im Bereich unter 50°C mit F500 und Class A parallel läuft. Die Steigung von F500 ähnelt am Anfang der Steigung von Class A, hat aber einen Knick bei rund 100°C, danach ist die Steigung kleiner, bis sie im Endbereich wieder parallel verläuft. Visuell war gegenüber reinem Wasser eine stärkere Dampfbildung bei Versuchen mit den Löschmittelzusätzen erkennbar. Diese Beobachtung deckt sich mit den Messergebnissen.

Ebenfalls wurden weitere Versuche durchgeführt, um mehr über das Verhalten der Löschmittel in der Schüttung herauszufinden. So wurden die gleichen Bolzen in ein durchsichtiges Rohr (Abbildung 60) gefüllt und über das gleiche Pumpensystem wurden Wasser und Wasser-Class A-Gemisch als Löschmittel aufgebracht.

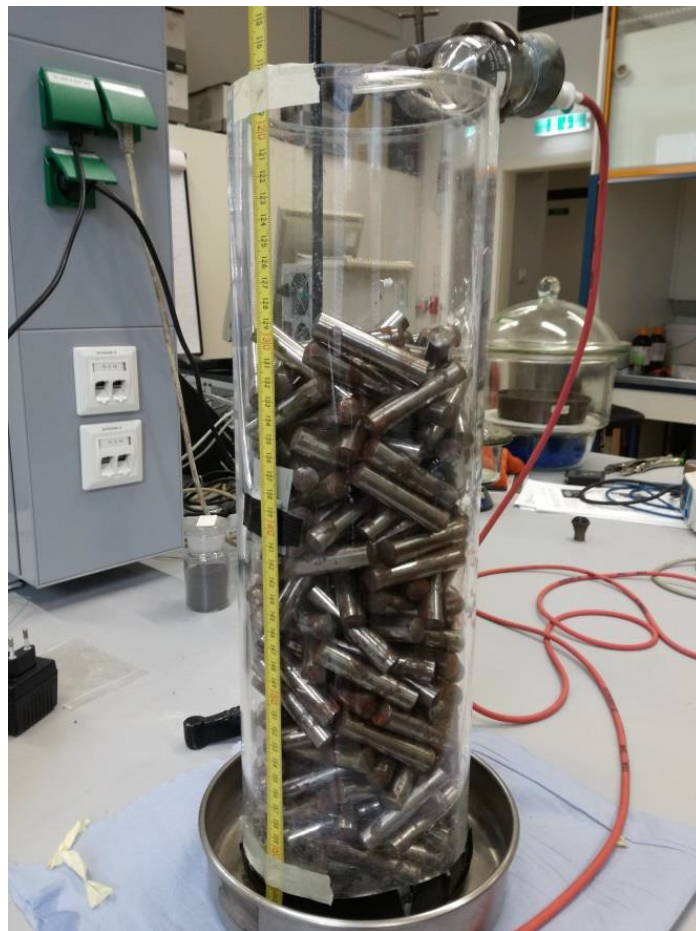


Abbildung 60 Versuchsaufbau

Dabei zeigte sich, dass das Wasser nur in wenigen Fällen an die Mantelfläche trat und mehr im Kern der Schüttung verlief. Dagegen zeigte das Gemisch aus 0,3% Class A und Wasser eine starke Randgängigkeit und es war auch schon im oberen Bereich der Schüttung an der Wandung sichtbar. Ebenfalls war erkennbar, dass der gesamte Querschnitt der Schüttung viel stärker mit dem Löschmittel benetzt war und das Löschmittel stark an der glatten Oberfläche der Zylinderstifte haftete.

Die Versuche lieferten einen größeren Unterschied als erwartet. Besonders der Löschmittelzusatz Class-A konnte in Bezug auf die Kühlleistung sehr überzeugen. Die Oberflächenspannung wird bei 0,3% schon so stark herabgesetzt, dass es einen sehr großen Effekt auf die Kühlwirkung hat. Das Löschmittel kann schneller verdampfen und so mehr Energie aufnehmen. Zudem benetzt es den gesamten Querschnitt schon nach kurzer Zeit und kann somit umliegende und unbeschädigte Zellen schützen. Mit 0,3% ist der Verbrauch geringer als bei anderen Löschmitteln.

4.8.4 Löschmittel für Lithium-Ionen-Akkus

Seit einigen Jahren werden auf dem Markt speziell entwickelte Löschmittel für Lithium-Ionen-Brände angeboten, die von der Wirkweise mit Metallbrandpulver vergleichbar sind. Der Einsatz dieser Löschmittel ist jedoch weder zweckmäßig noch notwendig. Zudem tritt kein Kühleffekt auf, der den Thermal-Runaway verzögern würde. Auch müssen diese Mittel direkt in die Zelle eingebracht werden, was sich in einem Haufwerk oder Fördergut am Bandförderer, vor allem bei Einbringung durch automatische Löschanlagen, als schwierig erweist. Ein Einsatz von gasförmigen und sauerstoffverdrängenden Löschmitteln benötigt einerseits einen abgedichteten Raum, der an Förderanlagen oder in Lagern nicht vorhanden ist, und andererseits unterdrückt er zwar die freigesetzte Energie, jedoch tritt keine Kühlwirkung ein. Da in der Zelle selbst Sauerstoff an das Lithium angelagert ist, führt der erstickend wirkende Löscheffekt zu keinem Ergebnis. (Vgl. Kunkelmann 2015, S. 147)

Ein Vergleich von unterschiedlichen Versuchen zeigt, dass Wasser für einen guten Löscheffekt von Bränden mit Lithium-Ionen-Akkus geeignet ist. Dies ist aber von der Menge an Batterien und der aufgebrauchten Wassermenge abhängig. In

großen Mengen kann das Löschmittel die fortschreitende Zersetzung am effektivsten bremsen oder sogar stoppen. Netzmittel verstärkt den Kühleffekt, da die Oberflächenspannung herabgesetzt wird, und die wässrige Lösung kann besser in das Brandgut eindringen. Bei großen Bränden von Batterien ist darauf zu achten, dass das Löschwasser kontaminiert ist und dies durch Löschmittelzusätze verstärkt wird. Dieses sollte nicht in die Umwelt gelangen, was durch eine entsprechende Löschwasserrückhaltung zu erreichen ist. (Vgl. Kunkelmann 2017, S. 8-20)

Die Hauptaufgabe des Löschmittels bei einem Brand von Lithium-Ionen-Akkus ist es, die Reaktion in der Batterie zu verlangsamen und die umliegenden Bereiche zu kühlen, damit es zu keiner Brandausbreitung kommt. Somit wird Zeit gewonnen, um das Brandgut aus der Förderanlage zu evakuieren und gesichert ausbrennen zu lassen. Da in den meisten abfallwirtschaftlichen Aufbereitungsanlagen nur vereinzelt Lithium-Ionen-Akkus als Störstoffe auftreten, besteht keine Gefahr, andere Batterien zur Reaktion zu bringen. Der Einsatz von Wasser oder Netzmittel eignet sich daher sehr gut, um den Akku und das umliegende Förder- oder Lagergut zu kühlen, um den Störstoff aus dem System zu entfernen. Wichtig dafür ist aber eine schnelle Detektion des Brandes.

4.9 Versuche

Wie bereits erwähnt, richten sich die Forschungen und Anstrengungen von Universitäten, den Entsorgungs-, bzw. Aufbereitungsbetrieben und der Brandschutzbranche auf die technisch möglichen Brandschutzmaßnahmen. Konstruktive Konzepte, die bereits in der Planungsphase einer Förderanlage in der Aufbereitung ansetzen, werden oft vernachlässigt. Ziel soll es sein, eine mögliche, rasche Brandausbreitung durch eine umsichtige Konstruktion von Förderanlagen, so zu verlangsamen, dass andere Löschanlagen, Mitarbeiter, oder die Feuerwehr ergriffen werden können.

Versuche sollen die Auswirkung von konstruktiven Maßnahmen auf die Brandfortschrittsgeschwindigkeit zeigen, um so einen Maßnahmenkatalog für die Konzeption einer Förderanlage in der Abfallwirtschaft aufstellen zu können. Für diese werden die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche, den Versuchen und die

bestehenden Brandschutzkonzepte zusammengefasst, um eine Planungshilfe für zukünftige Anlagen bereitstellen zu können.

Mit den ermittelnden Daten, wie den Ausbreitungsgeschwindigkeiten, lassen sich Brandsimulationen erstellen, die helfen können, Anlagen nach den modernen Ingenieursmethoden des Brandschutzes zu konzipieren.

Eine Brandsimulation, wie in Abbildung 61, ist ein ingenieurmäßiges Verfahren zur Beschreibung eines Brandes. Ziel ist es, das Verhalten und die Auswirkungen vorhersagbar zu machen. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Methoden und Modelle entwickelt. Die Simulation mit Computergestützten Modellen, wie zum Beispiel mit Hilfe des „Fire Dynamic Simulators“ (FDS), ist eine davon. Wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Thermodynamik und Strömungslehre liegen dabei den Simulationsmodellen zu Grunde. (Vgl. Hosser 2009, S. 99)

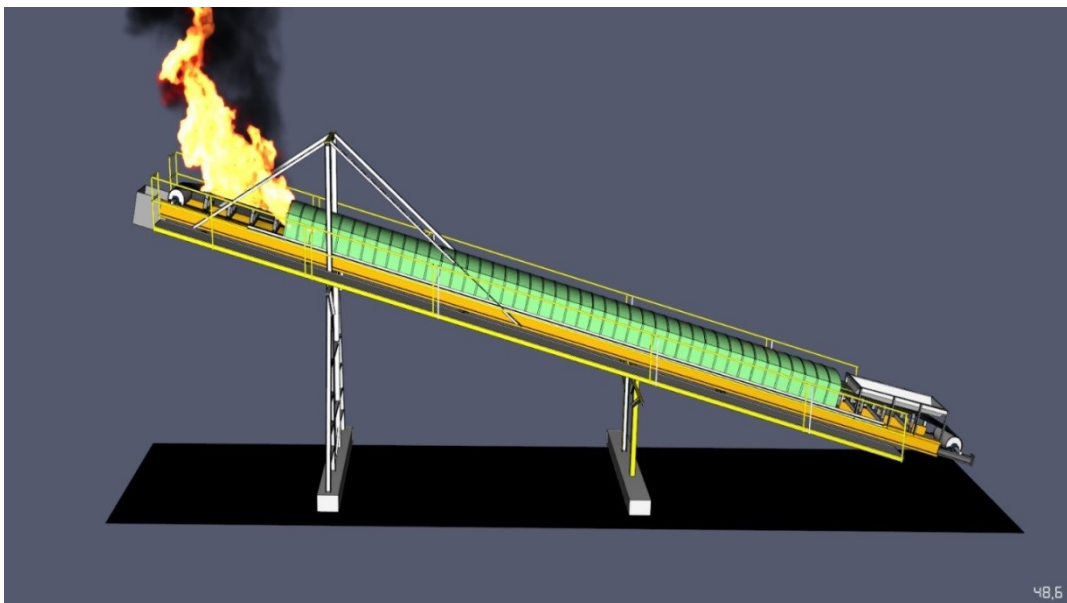


Abbildung 61 Brandsimulation Quelle: Hannes Kern

4.9.1 Versuchsaufbau

Um die Einflüsse konstruktiver Maßnahmen auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zeigen zu können, wurde ein Versuchsaufbau einer Förderanlage in einem geeignetem Maßstab konzipiert. Für die Versuche war eine Bewegung des Förderbandes nicht nötig, was die Konstruktion vereinfachte.

Der Versuchsaufbau bestand aus einer Unterkonstruktion (siehe Abbildung 62) aus Holz und die Aufnahme für das Förderband war neigbar ausgeführt. Die Neigung ließ sich auf 0°, 20°, 35° und 45° einstellen. Auf die Holzunterkonstruktion wurde ein Fördergurt befestigt, damit die Versuchsergebnisse nicht durch die Wärmeleitung anderer Baustoffe beeinflusst und verfälscht wurden.



Abbildung 62 Versuchsaufbau Unterkonstruktion

Das Förderband hatte eine Länge von 4000 mm und eine Breite von 420 mm. Der Gurt wies keine erhöhte Brandbeständigkeit auf, was bei den zu erwartenden Temperaturen und Versuchsdauern nicht nötig war.

Um die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei einem geschlossenen Förderer untersuchen zu können, wurde eine Einhausung konstruiert, die aus drei abnehmbaren Abdeckungen bestand. Diese Abdeckungen waren 400 mm hoch und wiesen eine Länge von 1000 mm auf. Die Einhausung deckte somit die ersten drei Meter der Förderbandlänge ab.

Um die Geschwindigkeiten und Temperaturen auch bei aufgesetzter Abdeckung, aufnehmen zu können war der Versuchsaufbau mit Thermoelementen bestückt. Acht Stück Thermoelemente Typ K befanden sich im Abstand von einem halben Meter am Förderband und nahmen dort die Temperatur auf. Weitere vier Stück

Thermoelemente Typ K befanden sich an der Tunneldecke, mit denen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei aufgesetzter Einhausung über die Abstände und Ansprechzeiten errechnet werden konnten. Verarbeitet wurden die Daten der Thermoelemente mit dem Programm LabVIEW 2015 der Firma National Instruments. Die zwölf Thermoelemente waren an drei NI 9211-Steckkarten angeschlossen. Die Signale wurden von einem NI cDAQ-9172 an das Programm weitergeleitet, das eigens für die Versuche erstellt wurde.

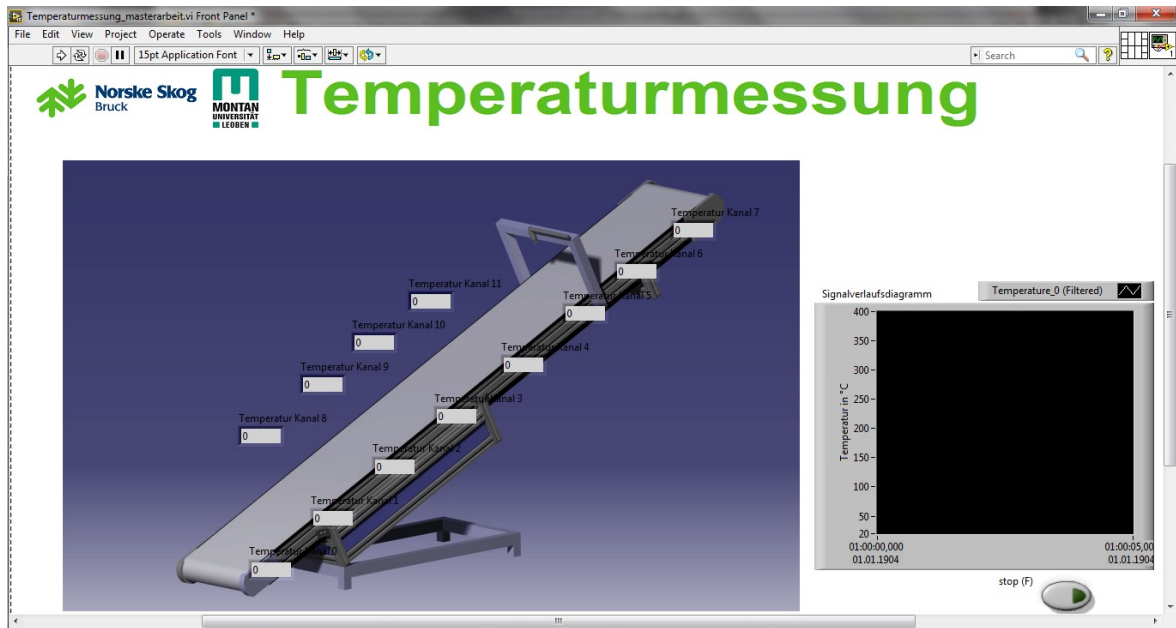


Abbildung 63 LabView – Auswertungsprogramm

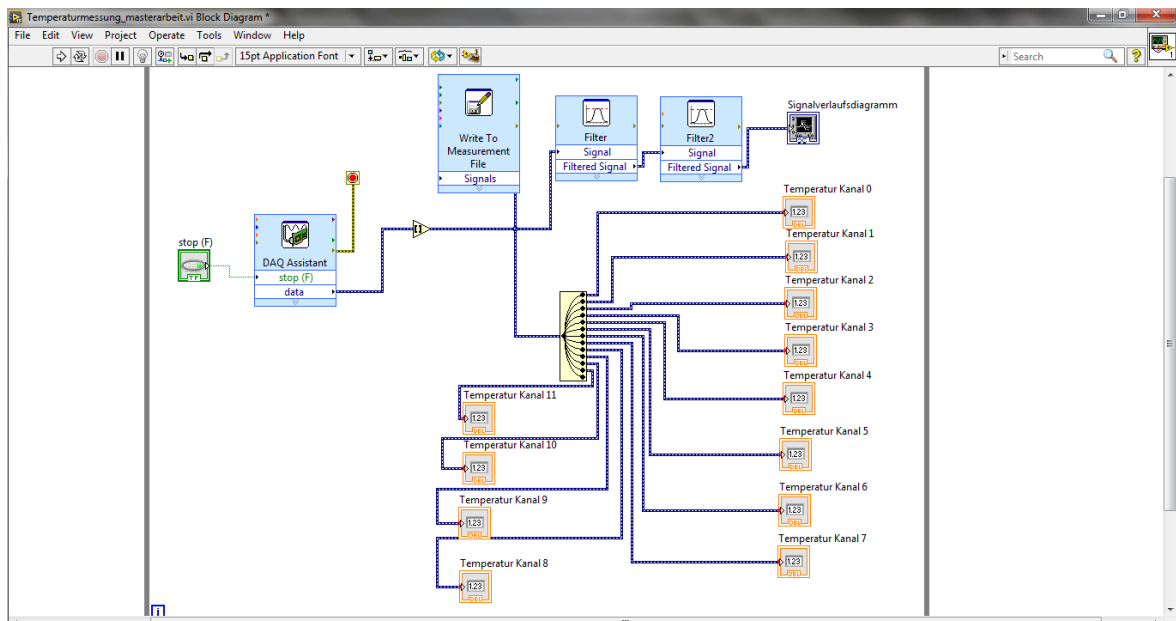


Abbildung 64 LabView Block-Diagramm

Die Temperaturen wurden im Programm angezeigt und als Signalverlaufdiagramm ausgegeben. Im Hintergrund wurden alle Werte in einer Text-Datei zur späteren Weiterverarbeitung abgespeichert.



Abbildung 65 Versuchsanordnung

Als Brand- bzw. Fördergut wurde Papier (Abbildung 66) verwendet, um eine zu starke Umweltbelastung durch Kunststoffe, wie sie eigentlich in der Abfallwirtschaft vorkommen, zu vermeiden. Die Papiermischung bestand zu 75% aus Zeitungsdruckpapier, zu 25% aus gestrichenem Magazinpapier. Diese Mischung aus etwa handgroßen Stücken wurde lose mit einer Höhe von rund 150 mm auf dem Fördergurt verteilt, wie man auch auf Abbildung 67 sieht.



Abbildung 66 Fördermenge



Abbildung 67 Versuchsaufbau vor Entzündung

Die Initialzündung erfolgte mit einem brennenden, rund DIN A4-großen, eingerollten Papierstück am unteren Ende der Konstruktion. Die Versuche wurden zudem mit mehreren Foto- und Videokameras aufgenommen, um alle Brandverläufe bestmöglich dokumentieren zu können.

4.9.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Neigung

In der Regel werden Förderer in Abfall-, Entsorgungs- und Recyclinganlagen sehr steil gebaut, um geringe Abstände zwischen den Aggregaten wie Shreddern, Sieben oder FE-Abscheidern realisieren zu können. Untersuchungen aus anderen Bereichen, wie zum Beispiel der Bautechnik, haben gezeigt, dass sich die Brandausbreitungsgeschwindigkeit mit der Neigung der Oberfläche erhöht. Versuche zeigten, dass sich bereits ab einer Neigung von 20° die Brandausbreitungsgeschwindigkeit rapide erhöht. Im Bereich von 24° - 30° legen sich die Flammen bereits teilweise an der Oberfläche an, ab 60° liegen sie so nah an, dass von einer komplett anliegenden Flamme gesprochen werden kann (Vgl. Bölskey & Schjerve 2011, S. 18-21). Ein ähnliches Verhalten kann auch für die Brandausbreitung auf Förderanlagen angenommen werden. Um genaue Werte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Neigung zu bekommen, sollen Versuche durchgeführt werden.

Diese Versuche, durchgeführt am 17.07.2020, werden mit den Neigungen 0°, 20° und 30°, jeweils mit und ohne Einhausung, durchgeführt. Die Effekte der Einhausung im Vergleich zum offenen Versuchsaufbau werden im nächsten Kapitel besprochen.

Versuch 1

Für den ersten Versuch wurde eine Neigung von 0° gewählt und keine Einhausung aufgesetzt, wie in Abbildung 68 ersichtlich.



Abbildung 68 Versuch 1

Nach Entzünden des Initialbrandes bewegte sich die sichtbaren Flammen nach rund 20 Sekunden zum ersten Thermoelement nach einem halben Meter und nach 50 Sekunden zum zweiten. Die weiteren Markierungen nach 1,5 m und 2 m wurden nach 1:26 min bzw. 1:53 min erreicht. Durch einen Windstoß, der das Brennmaterial vom Versuchsaufbau blies, musste der Versuch nach 2:20 min abgebrochen werden.

Die von den Thermoelementen aufgenommenen Daten (siehe Abbildung 69) erlauben aber, eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den Thermoelementen zu bestimmen. Diese betrug 0,017 m/s bei einer Höchsttemperatur von 562°C, gemessen knapp über dem Förderband.

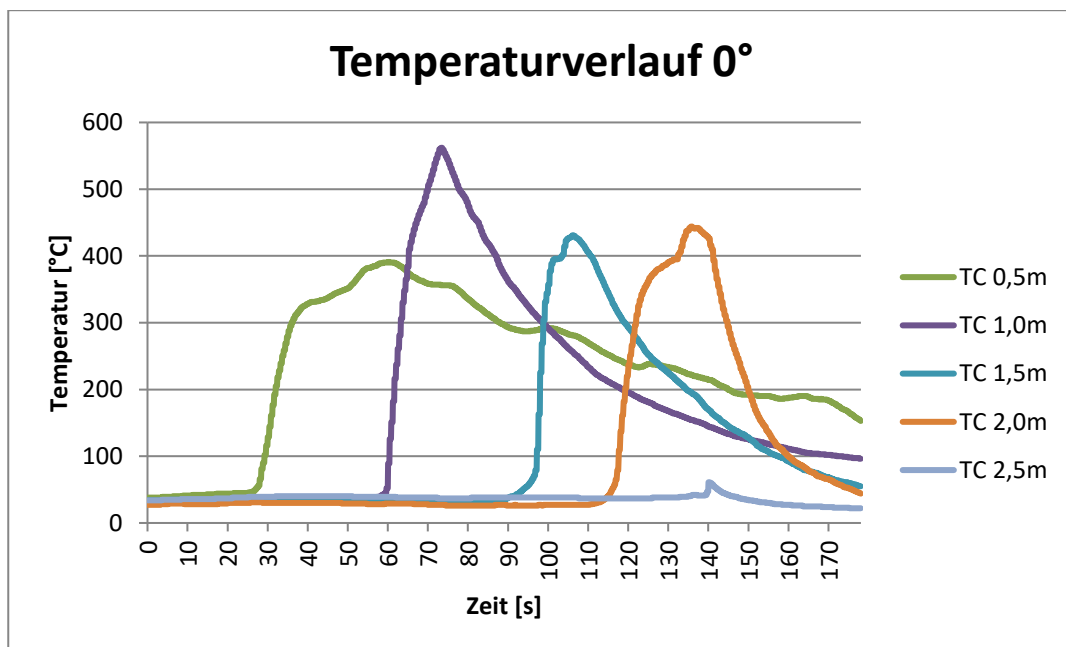


Abbildung 69 Temperaturverlauf 0° Neigung

Versuch 2

Für den zweiten Versuch wurde eine Neigung von 20° gewählt und abermals keine Einhausung aufgesetzt (siehe Abbildung 70).



Abbildung 70 Versuch 2

Nach Start des Initialbrandes erreichte die sichtbare Flammenfront die Messmarken nach jeweils einem halben Meter nach 0:21 min, 0:41 min, 1:09 min, 1:20 min, 1:50 min, 2:08 min, 2:25 min und 2:36 min. Der Versuch wurde nach 4:46 min beendet. Am Förderband selbst blieben nur kleine Reste des Brandgutes übrig, wie in Abbildung 71 ersichtlich, was auf eine gute Verbrennung schließen lässt.



Abbildung 71 Brandrückstände

Die höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit, die die optische Messung zeigte, wird auch durch die Messung mittels Thermoelemente (Abbildung 72) belegt. Die durchschnittliche, errechnete Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den Messstellen betrug 0,026 m/s. Die höchste, gemessene Temperatur über dem Fördergurt betrug 494°C.

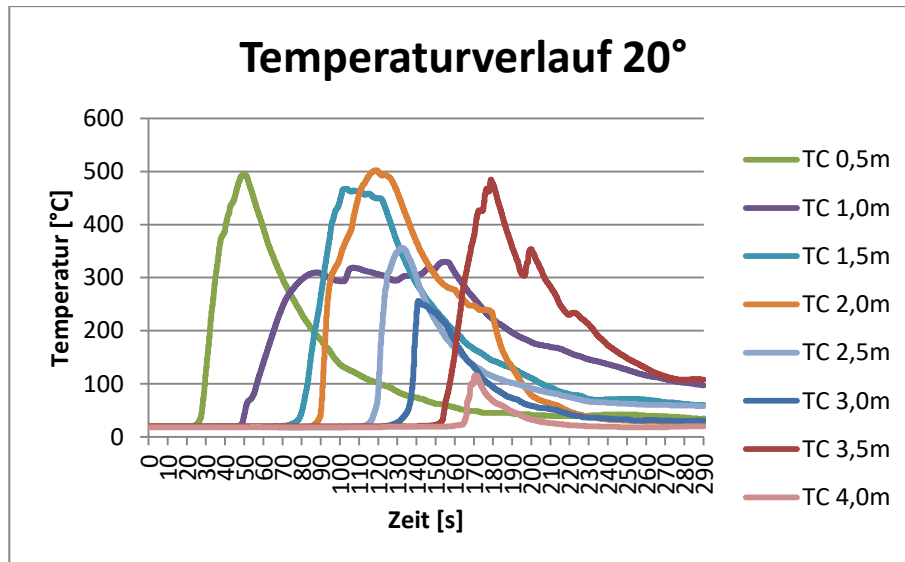


Abbildung 72 Temperaturverlauf 20° Neigung

Versuch 3

Für den dritten Versuch wurde eine Steigung von 35° gewählt. Auch dieser Versuch wurde ohne Einhausung durchgeführt (siehe Abbildung 73). Aufgrund der steilen Neigung konnte das Versuchsband nicht bis zum letzten Thermoelement am Ende des Bandes beschickt werden.



Abbildung 73 Versuch 3

Auch hier zeigte die optische Messung einen Trend zur höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer steileren Neigung. Die Messmarken wurden von der Flammenfront schon nach 0:07 min, 0,21 min, 0:27 min, 0:32 min, 0,42 min, 0:50 min und 0:58 min erreicht. Nach 1:30 min wurde der Versuch beendet und das restliche Brandgut abgelöscht. Die wenigen Überreste des Papierses, wie in Abbildung 74 ersichtlich, zeigten wiederum eine gute Verbrennung an.



Abbildung 74 Brandrückstände Versuch 2

Die gemittelte Geschwindigkeit der Thermoelement-Messung (Abbildung 75) betrug 0,080 m/s und der höchste Temperaturwert wurde mit 587°C gemessen.

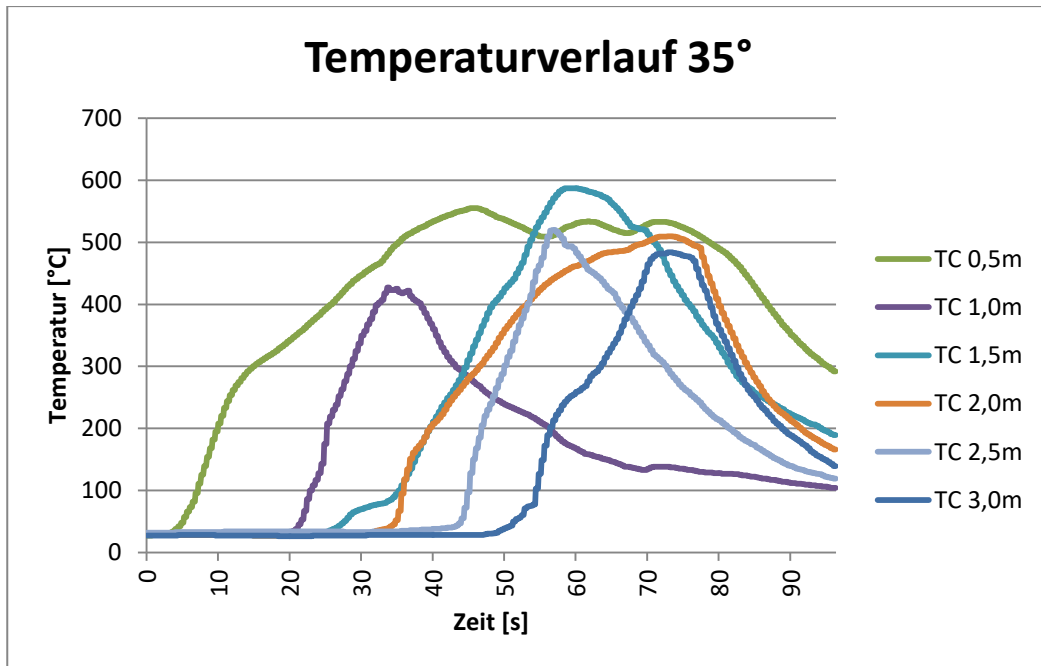


Abbildung 75 Temperaturverlauf 35° Neigung

Vergleicht man die Ausbreitungsgeschwindigkeit, lässt sich eine steigende Tendenz abhängig von der Steigung der Förderanlage erkennen. Bei einer Steigung von 20° beginnt die Ausbreitungsgeschwindigkeit rasch zu steigen, wie Abbildung 76 veranschaulicht.

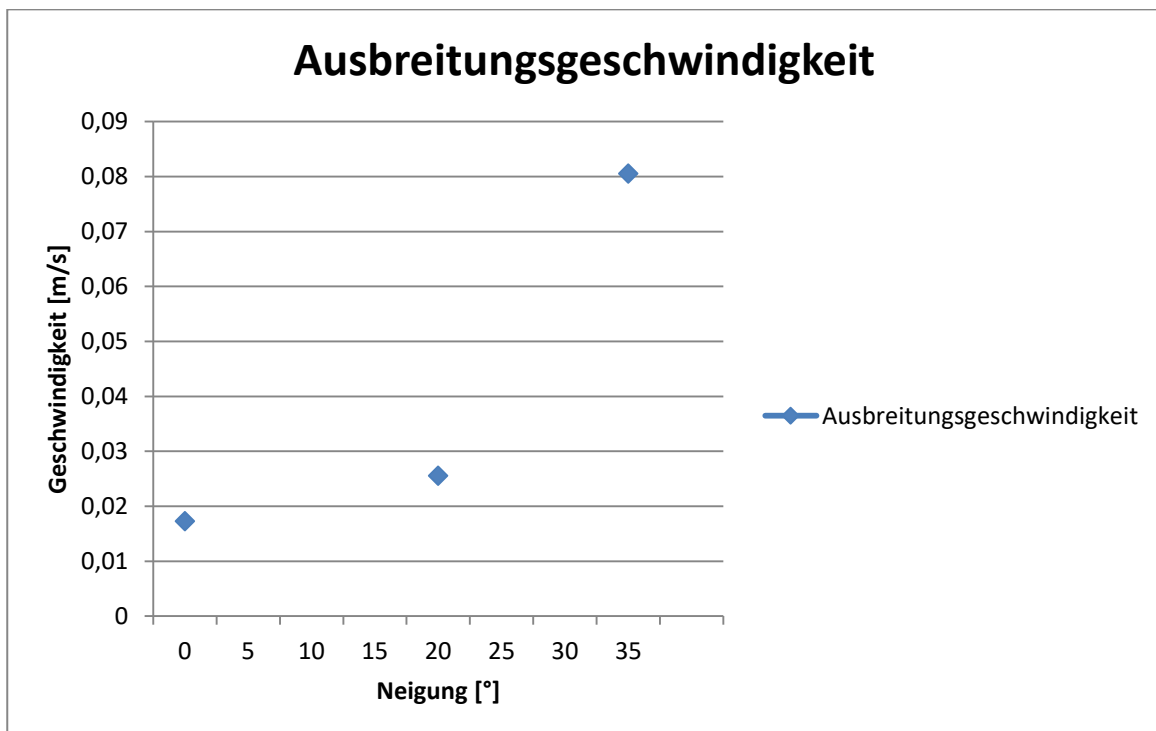


Abbildung 76 Vergleich Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Versuch 4

Dieselben drei Versuche wurden anschließend mit aufgesetzter Einhausung durchgeführt, um auch den Einfluss der Abdeckung auf die Steigung der Förderanlage bewerten zu können. Für den ersten Versuch wurde die Steigung 0° gewählt. Für die Versuche mit Abdeckung wurden vier Thermoelemente an der Decke der drei Meter langen Einhausung installiert. Mit diesen ließ sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der heißen Brandgase im Tunnel messen. Die Messpunkte waren in unregelmäßigen Abständen angebracht und befanden sich nach 111 cm, 183 cm, 213 cm und 275 cm.



Abbildung 77 Versuch 4



Abbildung 78 Bestückung

Aufgrund der Abdeckung konnte bei diesen Versuchen keine optische Messmethode angewendet werden. Durch eine Lücke in der Bestückung mit Brennstoff zwischen dem fünften und sechsten Thermoelement kam es zu einer Verzögerung in der Brandausbreitung. Dieser Fehler wurde berücksichtigt, weswegen die Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den beiden erwähnten Thermoelementen nicht in die gemittelte Geschwindigkeit einberechnet wurden. Nach 3:30 min wurde der Versuch beendet.

Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit betrug demnach 0,057 m/s, die Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Decke der Einhausung 0,130 m/s. Die höchste Temperatur über dem Förderband erreichte 452°C, an der Decke 745°C. Die Reste nach dem Brand waren im Vergleich zu den Versuchen ohne Abdeckung größer (siehe Abbildung 79).



Abbildung 79 Brandrückstände Versuch 4

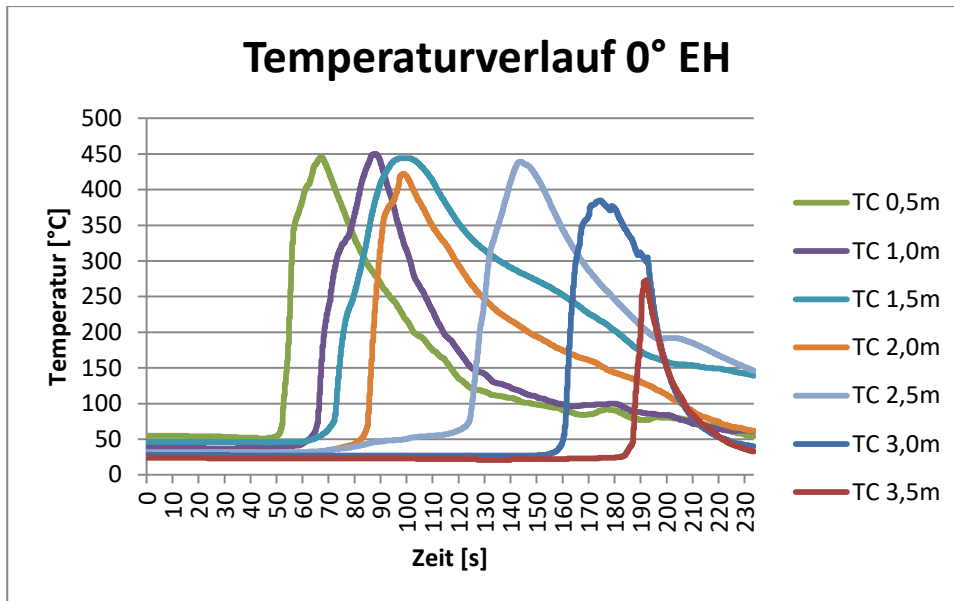


Abbildung 80 Temperaturverlauf 0° Neigung mit Einhausung

Versuch 5

Hierzu wurde eine Neigung von 20° gewählt und die Einhausung aufgesetzt (Abbildung 81).



Abbildung 81 Versuch 5

Bereits wenige Sekunden nach der Initialzündung war ein Ausströmen von heißen Brandgasen am Ende der Einhausung erkennbar, die sich kurz darauf entzündeten. Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit, gemessen mit Hilfe der Thermoelemente knapp über dem Förderband, betrug 0,143 m/s, an der Decke des Tunnels 0,374 m/s. Nach 1:20 min wurde der Versuch beendet.

Die höchste, gemessene Temperatur am Förderband betrug 562°C, an der Decke 761°C. Durch die höhere Brandintensität kam es an einigen Stellen zur Entzündung und Brand des Fördergurtes (Abbildung 83). Die Brandrückstände (Abbildung 82) waren im Vergleich zu denen bei den Versuchen ohne Einhausung größer, was auf eine unvollständige Verbrennung schließen lässt.



Abbildung 82 Brandrückstände Versuch 5



Abbildung 83 Entzündung des Fördergurtes

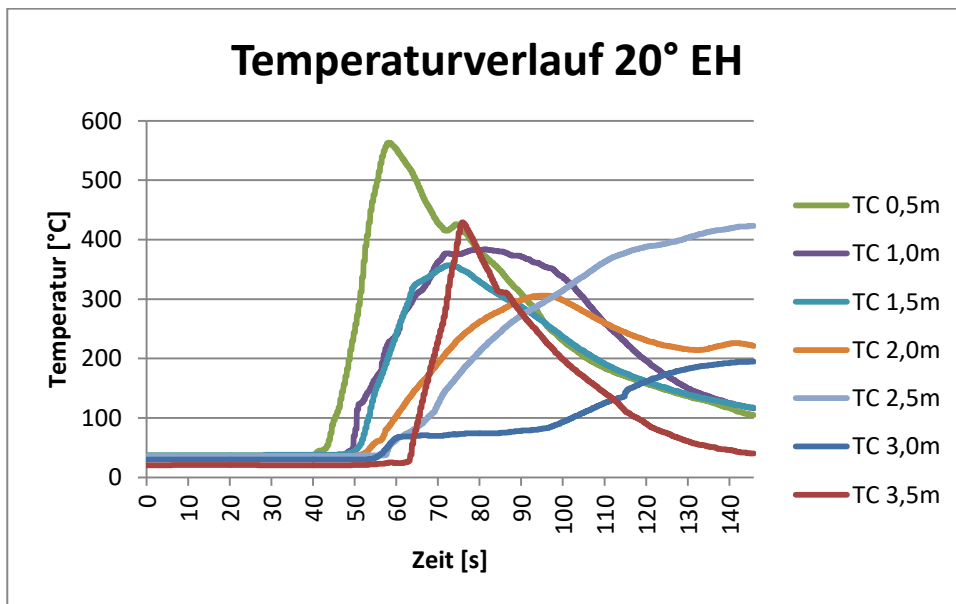


Abbildung 84 Temperaturverlauf 20° Neigung mit Einhausung

Versuch 6

Für den sechsten Versuch wurde eine Steigung von 35° gewählt und wieder die Einhausung aufgesetzt, wie in Abbildung 85 ersichtlich.



Abbildung 85 Versuch 6

Wenige Sekunden nach der Initialzündung schlugen die Flammen aus dem Ende des abgedeckten Förderers. Die gemittelte Geschwindigkeit am Fördergurt betrug 0,155 m/s. Aufgrund von technischen Problemen kam es zu keiner Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Decke der Einhausung, was erst bei der Auswertung bemerkt wurde. Die höchste gemessene Temperatur erreichte 585°C.

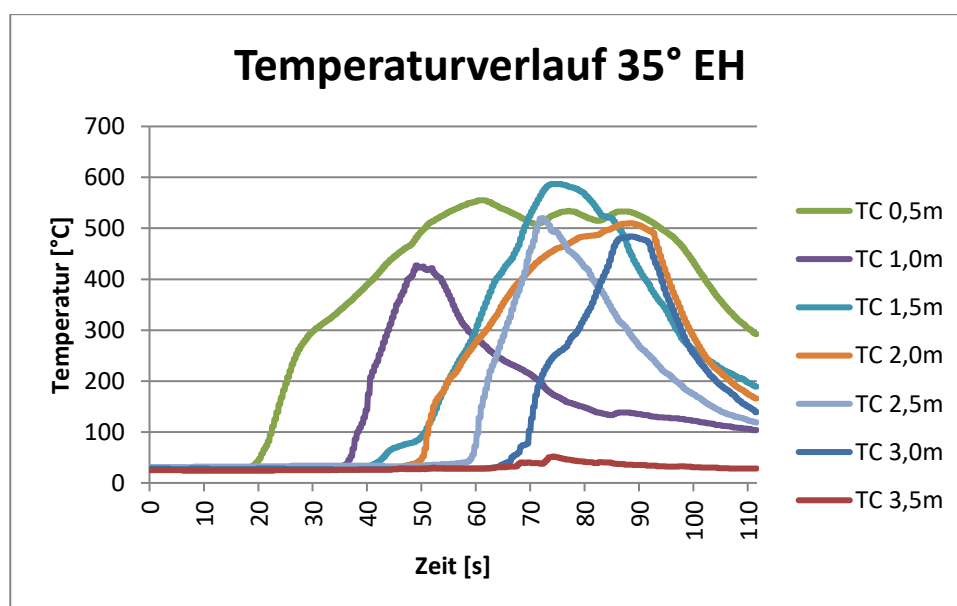


Abbildung 86 Temperaturverlauf 35° Neigung mit Einhausung

Beim Eintragen der gemittelten Geschwindigkeiten über der Neigung des Förderers lässt sich ein steigender Trend erkennen (siehe Abbildung 87). Hier ist erkennbar, dass die Abhängigkeit der Geschwindigkeit zur Neigung schon vor 20° steigt und danach abflacht.

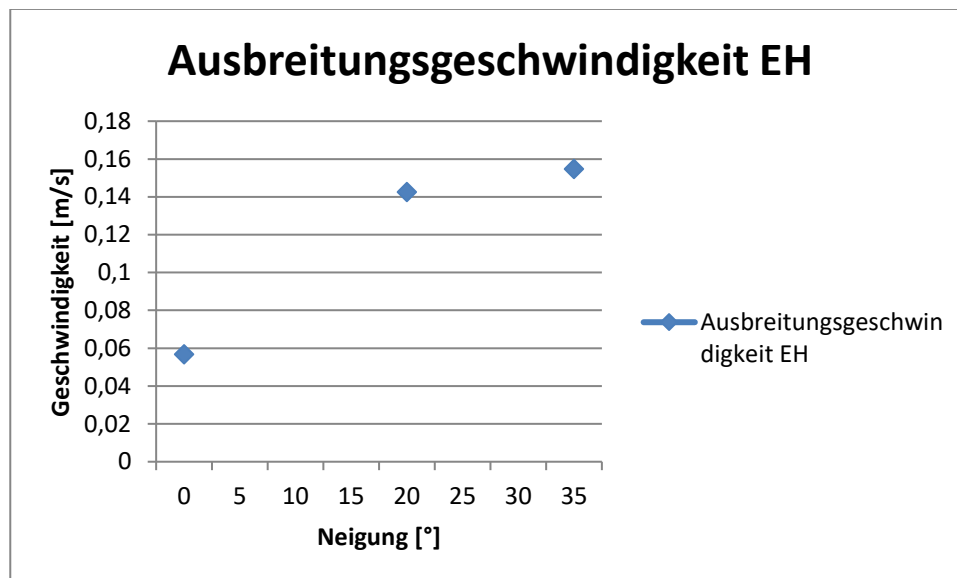


Abbildung 87 Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit Einhausung

4.9.3 Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Einhausung

1987 kam es zu einem verheerenden Brand im Bahnhof Kings Cross der Londoner U-Bahn mit 31 Todesopfern. Fettrückstände, in Verbindung mit Staub und Abfällen, an einer nicht ordnungsgemäß gewarteten hölzernen Rolltreppe fingen Feuer. Daraufhin breitete sich der Brand unerwartet schnell entlang der stetigen Förderanlage aus und führte zu einer Durchzündung, einem Flashover, entlang des Rolltreppenschachtes. Eine eingeleitete Untersuchung der Ereignisse führte 1988 erstmals zur Entdeckung des trench-effects, der als Grabeneffekt übersetzt wird. Dieser Effekt ist eine Überlagerung des Coanda-Effektes, einem Phänomen bei dem ein Fluidstrom die Tendenz hat, an einer konvexen Oberfläche entlangzulaufen anstatt sich abzuheben, und der Rauchgasdurchzündung, dem Flashover. Durch die Seitenwände der Rolltreppen bildete sich ein Graben und die Brandgase legten sich an die weiteren Holzstufen an, erhitzen diese, was folglich zu einem starken Flashover führte. (Vgl. Fenell 1988, S. 93 - 114)



Abbildung 88 Trench-Effekt Quelle: Fenell

Weiterführende Untersuchungen beschäftigten sich daraufhin genauer mit dem Grabeneffekt. In CFD-Simulationen und Realversuchen (Abbildung 88) zeigte sich, dass der Grabeneffekt von vier Parametern abhängt: Der Steigung, dem Grabenprofil, den verwendeten Materialien und der Brandquelle (Vgl. Wu & Drysdale 1996, S. 1). Ausschlaggebend für den Effekt ist der Fluidstrom der Brandgase entlang der geneigten Fläche, welcher in Folge die weitere Fläche erhitzt. Das Anlegen des Gasstroms ist stark abhängig von der Steigung. Das Profil des Grabens spielt eine wichtige Rolle bei der Kanalisierung dieser Brandgase, und so trat der Grabeneffekt bei Experimenten ab einer Steigung von 21° für große Gräben bzw. 26° für kleinere Gräben auf. Die abgegebene Wärme der Brandquelle hat keinen Einfluss auf den eigentlichen Grabeneffekt und spielt nur in der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Entstehungsbrandes eine Rolle. (Vgl. Wu & Drysdale 1996, S. 14)

Der Kamineffekt, der auch im Zusammenhang mit dem Brand in London steht, aber auch zum Beispiel beim Brand der Gletscherbahn in Kaprun auftrat, ist allgemein ein physikalisches Phänomen, bei dem es zu einer starken Anfachung des Brandes kommt, wenn die heißen Rauchgase durch einen vertikalen Schacht geführt werden. Der Effekt entsteht durch die Temperatur- und Höhendifferenz

zwischen Zu- und Abluft infolge der Dichte der Luft (Vgl. Merschbacher 2018, S. 660). In baulichen Objekten wie Stiegenhäusern oder Tunneln tritt dieses Phänomen auf und wird durch die rasante Brandausbreitung zu einer Gefahr für Mitarbeiter oder Einsatzkräfte. Auch bei eingehausten Förderanlagen kann es zum Auftreten des Kamineffektes kommen. Durch stark ansteigende Förderer erhöht sich der Druckunterschied, der infolge das Schadfeuer verstärkt.

Die durchgeführten Versuche, zeigen nicht nur die Abhängigkeit von der Neigung, sondern lassen auch die Unterschiede zwischen Förderanlagen mit bzw. ohne Einhausung erkennen.

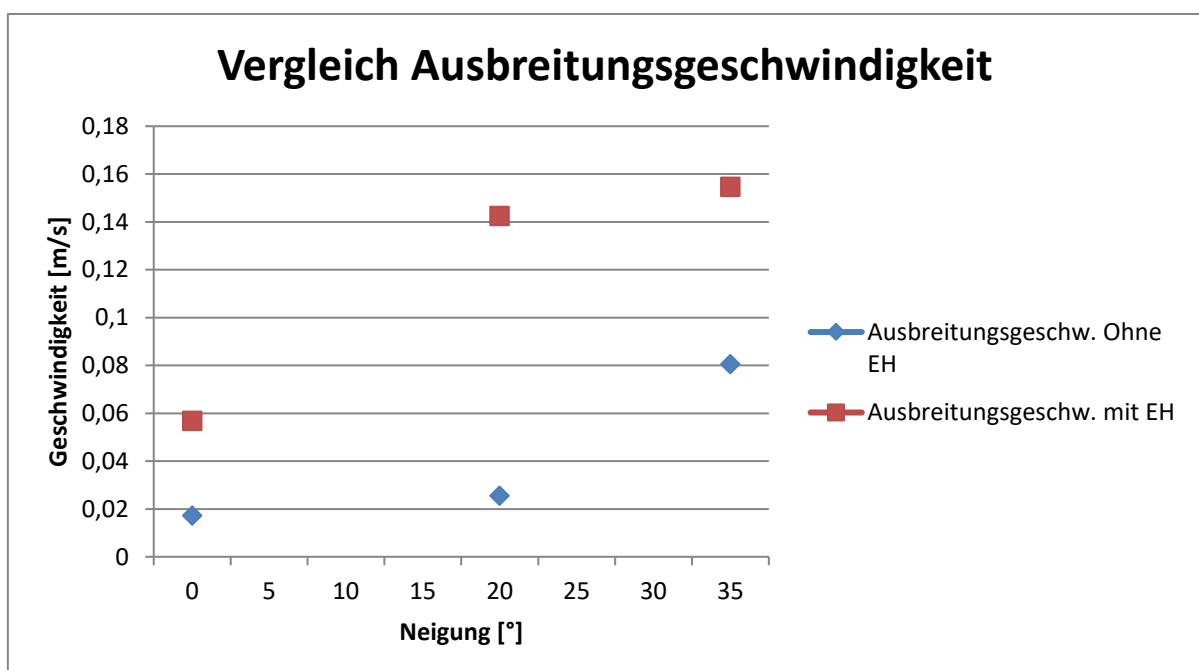


Abbildung 89 Einfluss der Einhausung

Schon bei einer Neigung von 0° kommt es zu einem signifikanten Unterschied zwischen den Brandausbreitungsgeschwindigkeiten. Der größte Unterschied ist im Bereich der Neigung von 20° erkennbar. Bei einem eingehausten Förderer kommt es schon vor diesem Wert zu einer starken Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Beim Förderer ohne Einhausung kommt es erst im Bereich zwischen 20° und 35° zu einem Anlegen der Flammen an die Oberfläche (siehe Abbildung 90), während bei abgedeckten Förderanlagen der Kamin- bzw. Grabeneffekt schon bei einer geringeren Neigung eine Rolle spielt.



Abbildung 90 Anlegen der Flammen bei 35° Neigung

Vergleicht man die Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Decke des Tunnels mit der Bodengeschwindigkeit, lassen sich die physikalischen Effekte gut erkennen. Auch optisch ist dieses Verhalten zu beobachten, wie Abbildung 91 zeigt.



Abbildung 91 Austritt der Flammen nach Einhausung

Bereits kurz nach dem Zünden des Initialbrandes strömen heiße Brandgase in hoher Geschwindigkeit aus dem Ende des Tunnels (Abbildung 92). Diese

Pyrolysegase erhitzen das Brandgut und es kommt zu einer raschen Durchzündung des Fördergutes im gesamten, abgedeckten Bereich (Abbildung 93).



Abbildung 92 Ausströmen der Brandgase



Abbildung 93 Durchzündung der Pyrolysegase

4.9.4 Löschanlage

Versuch 7

Beim abschließenden Versuch wurde der Versuchsaufbau in der 20°-Neigung positioniert und die Einhausung angebracht. Zudem wurde eine Sprinklerleitung am Tunnelausgang positioniert, um den Effekt einer Löschanlage zu veranschaulichen. Am Ende der Löschleitung wurde ein Side-Wall-Sprinkler eingesetzt, bei dem das Löschwasser über ein Prallblech abgelenkt wird und ein Wasservorhang erzeugt wird (Abbildung 94 und 95). Ziel der Versuche war es, zu überprüfen, ob die intensive Brandausbreitung durch den Sprinkler verhindert werden kann.



Abbildung 94 Side-Wall-Sprinkler

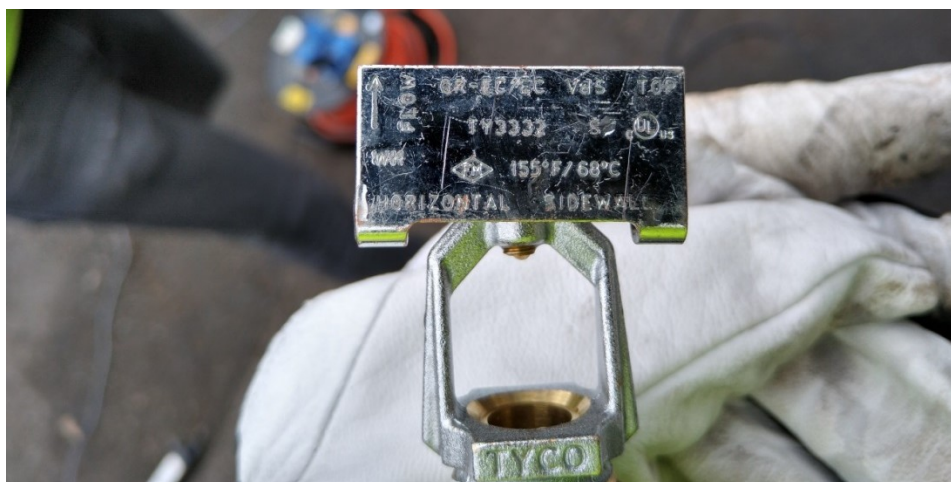


Abbildung 95 Detailansicht Side-Wall-Sprinkler



Abbildung 96 Aufbau Versuch 7

Beim ersten Anstieg der Temperatur des Thermoelementes, einen Meter vor dem Sprinklerkopf, wurde die Löschleitung geöffnet und Löschwasser abgegeben. Kurz vor dem Beginn des Löschvorgangs war bereits erkennbar, dass das Fördergut kurz vor der Durchzündung stand. Die weitere Ausbreitung konnte jedoch durch den Sprinkler verhindert werden. Unter der Abdeckung kam es zu einem Abbrand des Brandgutes. Im Temperaturverlaufdiagramm ist ersichtlich, dass die Temperatur nach dem Beginn der Löschmaßnahmen, nach rund 20 Sekunden, noch immer stieg, oder gleich blieb. Die Temperaturen an den Thermoelementen

nahe der Löschanlage stiegen jedoch durch die Kühlwirkung nicht so stark wie am Anfang des Tunnels. Das Thermoelement nach dem Wasservorhang behielt den ganzen Versuch über seine ursprüngliche Temperatur bei. Brand- bzw. Glutnester konnten aber erst nach der Abnahme der Einhausung, nach Abbruch der Temperaturmessung, direkt bekämpft werden.

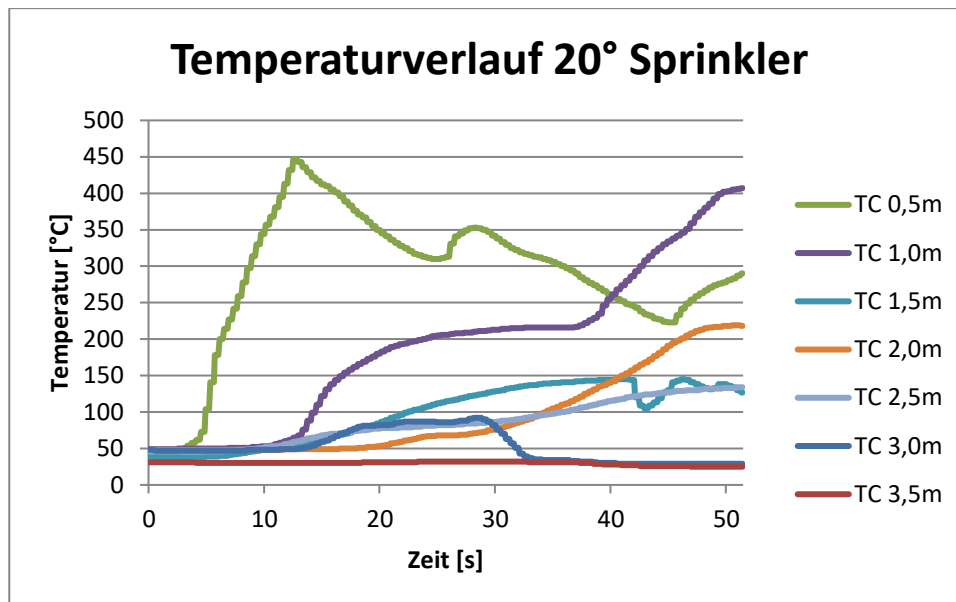


Abbildung 97 Temperaturverlauf 20° Neigung mit Einhausung und Sprinkler



Abbildung 98 Ausströmen der Brandgase am Ende des Tunnels



Abbildung 99 Aktivierung des Sprinklers

Die Versuche zeigen die Wichtigkeit einer schnellen Branderkennung, um eine intensive Brandausbreitung verhindern zu können. Feuerabschlüsse durch Wasserbeaufschlagung, wie mittels des Side-Wall-Sprinklers, sind in der Lage, die Ausbreitung einzudämmen. Andere Sprinkleranlagen dienen nur zur Kühlung des Brandgutes. Eine gezielte Ablöschung des restlichen Brandes kann nur durch geschultes Personal oder Einsatzkräfte erfolgen.



Abbildung 100 Brandabschluss durch Sprinkler

4.10 Diskussion der Versuchsergebnisse

Um die Umweltbeeinträchtigung durch die Versuche so gering wie möglich zu halten, wurden sie mit Papier anstatt mit Ersatzbrennstoffen durchgeführt. Kunststoffhaltige Brandprodukte hätten auch den Nachteil, zu schmelzen und am Förderband festzukleben. Dies hätte einen oftmaligen, aufwendigen Austausch des Versuchsaufbaues zur Folge gehabt. Schon mit dem verwendeten Brandgut wurden hohe Temperaturen und ein intensiver Brandverlauf erreicht. Es kann angenommen werden, dass Ersatzbrennstoffe, aber auch unbehandelte Abfälle, durch den hohen Brennwert einen noch stärkeren Brandverlauf mit viel höheren Temperaturen zu Folge haben. Im Gegensatz dazu ist Papier leichter entzündlich als die in der Abfallwirtschaft vorkommenden Förderstoffe.

Auch wenn das bei den Versuchen verwendete Förderband keine erhöhte Brandbeständigkeit aufweist, sind Einflüsse wie die Wärmeleitung auf den Brand vergleichbar mit realen Förderanlagen. Es ist erkennbar, dass ein Brand von Papier reicht, um das Förderband selbst zu entzünden, was die Wichtigkeit einer Beständigkeit gegen einen Brand aufzeigt.

Eindrucksvoll ist der Unterschied zwischen den Versuchen mit und ohne Einhausung. Schon eine Neigung von 0° wirkt sich negativ auf die Ausbreitung aus, und der Brand beschleunigt sich, von etwa $0,02 \text{ m/s}$ auf rund $0,06 \text{ m/s}$, um das Dreifache (siehe Abbildung 89). Bei den Versuchen mit einer Neigung von 20° und 35° vervielfacht sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von $0,03 \text{ m/s}$ auf $0,14 \text{ m/s}$. Auch die Neigung selbst betrachtet hat einen starken Einfluss auf den Brandfortschritt. Interessant ist, dass es bei dem Aufbau mit Einhausung schon bei 20° zu einem starken Anstieg der Brandausbreitungsgeschwindigkeit kommt, bei den Versuchen ohne Abdeckung erst bei 35° Neigung. Bei den Versuchen ohne Einhausung kommt es erst später zu einem Anlegen der Flammen an die Oberfläche. Durch ein Zusammenwirken von Graben- und Kamineffekt geschieht dies unter der Einhausung schon viel früher, was den Unterschied zur Folge hat.

Bei der Betrachtung der Versuche mit der Einhausung sind die Ergebnisse der Thermoelementmessung unterhalb der Decke des Tunnels sehr interessant. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist um das 2,5-fache höher als knapp über dem Förderband. Dies ist auch optisch sehr gut erkennbar und zeigt Ähnlichkeit zu den

Simulationen und Ergebnissen im Untersuchungsbericht des King's Cross-Brandes.

Der Versuch mit der Sprinkleranlage zeigt die Effektivität einer Löschanlage. Die Reaktionszeit der Anlage muss dabei so kurz wie möglich sein. Die Löscheinrichtungen können nur zum Kühlen oder Aufhalten der Flammenfront dienen. Ist die Reaktionszeit zu lange, breitet sich der Brand über den Wasservorhang hinaus aus. Eine direkte Brandbekämpfung kann nur durch geeignetes Personal erfolgen, da egal ob mit oder ohne Abdeckung der Brand nicht durch die Löschanlage gestoppt werden kann. Hier zeigt sich auch das Problem der Abdeckung, da sie zuerst entfernt werden muss, um an die Brandstelle zu kommen. Auch die Zugänglichkeit zu den Förderanlagen muss in diesem Kontext berücksichtigt werden.

Kurze Reaktionszeiten bedingen eine zu einem gewissen Grad gefüllte Sprinklerleitung, da eine zu lange Wasserförderung wieder viel Zeit benötigt. Hier muss jedoch beachtet werden, dass eine befüllte Löschleitung ein Gewicht aufweist, das dauerhaft von der Konstruktion zu tragen ist. Vor allem bei langen Förderbrücken könnte dies nachteilig gesehen werden.

Die aus den Versuchen gewonnenen Daten können nun für eine genaue Planung von Förderanlagen verwendet werden, da die nötigen Reaktionszeiten abgeschätzt werden können. Brandsimulationen lassen sich auch auf andere Neigungen annähern und können die Brandausbreitungsgeschwindigkeit für solche Konstruktionen zeigen.

5. Maßnahmenkatalog AbER-Brandschutz

Gemeinsam mit den Erkenntnissen aus der Forschung und der Industrie sowie den Aufschlüssen aus den Versuchen soll ein Maßnahmenkatalog für die Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft erstellt werden, der bei der Planung neuer Anlagen hilfreich sein kann. Der Katalog dient unterstützend zu den geltenden baulichen und brandschutztechnischen Maßnahmen, die durch Normen, Regelungen oder von Versicherern vorgegeben werden und ersetzt diese in keinem Fall.

Ziel der vorgeschlagenen Maßnahmen ist es, die Brandausbreitung soweit einzudämmen und zu verlangsamen, bis Löschmaßnahmen durch die Anlage selbst, Mitarbeiter oder Einsatzkräfte, ergriffen werden können. So sollen ein größerer Schaden an der Anlage oder lange Stillstands- oder gar Ausfallzeiten verhindert werden. Die Gefahr der Brandentstehung durch eingeschleppte Glutnester oder Selbstentzündung kann nur durch einige Maßnahmen minimiert werden, jedoch nicht ausgeschlossen werden. Das Risiko durch Störstoffe bleibt weiterhin bestehen und muss durch technische Möglichkeiten schnellst möglich erkannt werden.

Der Maßnahmenkatalog gliedert sich der Übersicht wegen in drei Gebiete des Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozesses. Diese sind der Import und die Aufbereitung mitsamt ihrer Förderanlagen und der Lagertechnik.

Der besseren Übersicht dienend, werden die Maßnahmen in Tabellenform dargestellt. Die Tabellen gliedern sich in die beiden Spalten „Bereich“ und „Maßnahmen“. Unter Bereich versteht man die verschiedenen Arbeitsbereiche, -aufgaben und -prozesse, die in den Gebieten Import, Aufbereitung und Lagertechnik verrichtet werden. Für den jeweiligen Bereich werden die zu treffenden Maßnahmen angeführt, die helfen sollen, den Brandschutz und die Sicherheit zu erhöhen.

5.1 Maßnahmen Import

Bereich	Maßnahmen
Anlieferung per LKW oder Bahn	<ul style="list-style-type: none">• Eingangskontrolle mittels IR-Kamerasystem und Thermografie• Automatische Löschanlage mittels Werfer für zielgenaue Löschung
Lagerung	<ul style="list-style-type: none">• Automatische Brandmeldeanlage gemäß TRVB 123 S• Automatische Löschanlage gemäß TRVB 127 S
Fördertechnik	<ul style="list-style-type: none">• Steigung von Förderanlagen unter 30°• Branddetektion mittels Gassensoren und Thermografie• Automatischer Stillstand der Anlage bei Branddetektion• Automatische Löschanlage mittels Sprinkler und Netzmittel über Förderanlage• Installation der elektrischen Betriebsmittel in der Schutzart IP 5X• Fördergurte der Kategorien 4 oder 5 gemäß EN 12882• Schlupf- und Schiefelaufüberwachung bei Förderbändern• Zugangsmöglichkeiten zu allen Teilen der Förderanlage• Regelmäßige Wartung und Inspektion• Leerfahren der Förderanlage bei längeren Stillständen• Bei Krananlagen: Thermische Überwachung ausgewählter Anlagenbereiche• Brandschutztechnischer Abschluss von

	Brandabschnitten
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Brandmeldeanlage gemäß TRVB 123 S • RWA gemäß TRVB 125 S • Bildung von Brandabschnitten • Staubabsauganlage • Gasdetektion in Absauganlage • Regelmäßige Reinigung und Inspektion der gesamten Anlage

Tabelle 1 Maßnahmen Import

5.2 Maßnahmen Aufbereitung

Bereich	Maßnahmen
Aufbereitungsaggregat	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Branddetektion in der Maschine • Automatische Löschanlage in der Maschine • Stillstand der Maschine bei Branddetektion
Fördertechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Steigung von Förderanlagen unter 30° • Einhausungen vermeiden • Branddetektion mittels Thermografie • Automatischer Stillstand der Anlage bei Branddetektion über festgesetzter Temperatur • Automatische Löschanlage mittels Sprinkler und Netzmittel über Förderanlage • Installation der elektrischen Betriebsmittel in der Schutzart IP 5X • Fördergurte der Kategorien 4 oder 5 gemäß EN 12882 • Schlupf- und Schiefelaufüberwachung bei Förderbändern • Zugangsmöglichkeiten zu allen Teilen der

	Förderanlage
	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Wartung und Inspektion • Leerfahren der Förderanlage bei längeren Stillständen • Bei Krananlagen: Thermische Überwachung ausgewählter Anlagenbereiche • Brandschutztechnischer Abschluss von Brandabschnitten
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Brandmeldeanlage gemäß TRVB 123 S • RWA gemäß TRVB 125 S • Bildung von Brandabschnitten • Staubabsauganlage • Gasetektion in Absauganlage • Regelmäßige Reinigung und Inspektion der gesamten Anlage

Tabelle 2 Maßnahmen Aufbereitung

5.3 Maßnahmen Lager

Bereich	Maßnahmen
Fördertechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Steigung von Förderanlagen unter 30° • Branddetektion mittels Gassensoren und Thermografie • Automatischer Stillstand der Anlage bei Branddetektion • Automatische Löschanlage mittels Sprinkler und Netzmittel über Förderanlage • Installation der elektrischen Betriebsmittel in der Schutzart IP 5X • Fördergurte der Kategorien 4 oder 5 gemäß EN 12882 • Schlupf- und Schiefelaufüberwachung bei

	Förderbändern
	<ul style="list-style-type: none"> • Zugangsmöglichkeiten zu allen Teilen der Förderanlage • Regelmäßige Wartung und Inspektion • Bei Krananlagen: Thermische Überwachung ausgewählter Anlagenbereiche • Brandschutztechnischer Abschluss von Brandabschnitten
Lagertechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Brandmeldeanlage gemäß TRVB 123 S • Automatische Löschanlage gemäß TRVB 127 S • Verwendung von Netzmittel • Lagerzeitbeschränkung beachten (Selbstentzündungsgefahr) • Lagerentnahme nach FIFO-Prinzip (first in – first out) • Lagerflächen klein halten • Bildung von Brandabschnitten • Bei Freiwerden von Lagerflächen, Ablagerungen entfernen
Allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Brandmeldeanlage gemäß TRVB 123 S • RWA gemäß TRVB 125 S • Bildung von Brandabschnitten • Staubabsauganlage • Gasetektion in Absauganlage • Regelmäßige Reinigung und Inspektion der gesamten Anlage

Tabelle 3 Maßnahmen Lager

6. Aufbereitung Norske Skog Bruck GmbH

6.1 Projektbeschreibung

6.1.1 Firmenprofil Norske Skog

Der Konzern Norske Skog gehört zu den weltweit größten Erzeugern von Publikationspapieren, wie Zeitungsdruckpapier und Magazinpapier, mit Sitz in Oslo, Norwegen. Das Unternehmen umfasst sieben Fabriken in Europa und Australasien und beschäftigt rund 2.560 Mitarbeiter.

Der Standort im obersteirischen Bruck an der Mur wurde 1881 gegründet und gehört seit 1996 zum norwegischen Papierkonzern. Die Norske Skog Bruck beschäftigt 410 Mitarbeiter und produziert auf zwei Papiermaschinen (PM) Zeitungsdruckpapier und LWC-Papier (light weight coated), gestrichenes holzhaltiges Papier für Zeitschriften und Magazine. Die Produktionskapazitäten der PM 3 beträgt 128.000 Tonnen Zeitungsdruckpapier und der PM 4 275.000 Tonnen LWC-Papier pro Jahr. Die Exportrate beträgt dafür 77%.

Die Energie für die Papiermaschinen wird durch ein kombiniertes Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk bereitgestellt. Der benötigte Dampf wird zurzeit von vier Brennkesseln erzeugt. Im August 2019 gab der Konzern bekannt, in die Erweiterung der Energieanlagen zu investieren. Neben der Modernisierung eines Kessels und dem Abbau von drei weiteren, wird ein neuer Reststoffverwertungskessel (Kessel 9) errichtet.

Die gesamte Anlage um das Kesselhaus sieht auch ein Brennstofflager samt Aufbereitung vor. Das Kesselhaus und die Aufbereitungsanlage samt Lagerbunker werden mittels einer Förderbrücke verbunden. Von einer Warte aus wird die Anlage von Mitarbeitern rund um die Uhr im Schichtbetrieb gesteuert und überwacht.

6.1.2 Prozessbeschreibung Aufbereitung

Die Rest- beziehungsweise Brennstoffannahme, Aufbereitung sowie die Brennstofflager befinden sich in einem neu zu errichtenden Gebäude, welches Abmessungen von ungefähr 72 m Länge und 35 m Breite und eine Höhe von zirka

30 m aufweist. Das Gebäude teilt sich in mehrere Bereiche, wie zum Beispiel die LKW-Anlieferung und Entladung, den Annahmeförderer inklusive den Förderbändern zu den Anlieferbunkern, die Anlieferbunker für Grob- und Fertigmateriale, je einem Brennstofflager für Grob- und Feinmaterial, die Aufbereitungsanlage selbst, einen Containerbereich für Störstoffe und Metall, sowie andere Räumlichkeiten, die für den Betrieb notwendig sind. Die Abmessungen der Anlieferhalle betragen ca. 24 m Länge und ca. 21 m Breite. Die beiden Brennstofflager haben jeweils Abmessungen von ca. 23 m Länge und 13 m Breite, die beiden Anlieferbunker jeweils ca. 8 m Länge und ca. 6 m Breite. Die Manipulation der Brennstoffe erfolgt mittels eines der beiden Kräne.

Bei dem zu erwartenden durchschnittlichen Heizwert der Brennstoffe von ca. 10 MJ/kg ist die Jahresmenge an angelieferten Brennstoffen ca. 160.000 t. Die genehmigte maximale Brennstoffmenge ist 251.000 t, was aber nur bei durchschnittlich geringeren Heizwerten erreicht wird. Der Großteil der Brennstoffe sind feste Brennstoffe. Ein Teil der Brennstoffe können diverse Schlämme in flüssiger, pumpbarer Form sein, die getrennt gelagert werden. Es können die am Werkstandort von Norske Skog Bruck anfallende Papierfaserschlämme thermisch im K9 verwertet werden, maximal etwa 200.000 t/a (abhängig vom Brennstoffmix). Ebenso andere am Standort anfallende Reststoffe wie Rinden oder Rejekte aus der Altpapieraufbereitung. Die eigenen Reststoffe werden mittels LKW oder Lader in der Anlieferhalle auf die Annahmeförderer entladen.

Anliefernde LKW entladen den Brennstoff auf einen der Annahmeförderer, welcher das Material über einen Schrägförderer in einen der beiden Anlieferbunker fördert. Festbrennstoffe, die in Containern mittels Bahn geliefert werden, werden mit Hilfe von Hakenlader-LKW ebenfalls auf die Annahmeförderer gekippt.

Aus dem Anlieferbunker für Grobmaterial werden die aufzubereitenden Reststoffe mittels eines der beiden Kräne weiter in die Aufbereitung gefördert. Dort werden sie auf den Aufgabetrichter Sieblinie oder den Aufgabetrichter Zerkleinerer aufgegeben. Zerkleinerungsbedürftige Reststoffe sind sperrige Abfälle, diverse Gewerbeabfälle mit einer Korngröße größer 80 mm und die allfällig angelieferten Ballen. Die Ballen werden vor der Aufgabe in den Aufgabetrichter so weit wie möglich mit dem Kran aufgelöst, um den Transport und die Zerkleinerung zu erleichtern. Das aufgegebene Fördergut wird nach der Zerkleinerung zusammen

mit dem Material aus dem zweiten Aufgabetrichter mittels Bandförderern weiter zum Flächensieb transportiert. Auf dem Weg werden Eisenmetalle mittels Magnetabscheider entfernt. Anschließend wird der Siebdurchgang mit einer Korngröße < 80 mm in das „Brennstofflager 2“, für Fertigmaterial, gefördert. Zu großes Fördergut wird mittels reversierbaren Bandförderern entweder zurück in das „Brennstofflager 1“ für Grobmaterial gefördert oder in im Nachzerkleinerer auf die richtige Größe gebracht. Vom Nachzerkleinerer wird der Reststoff mittels Förderbandes in das Brennstofflager für Fertigmaterial gefördert.

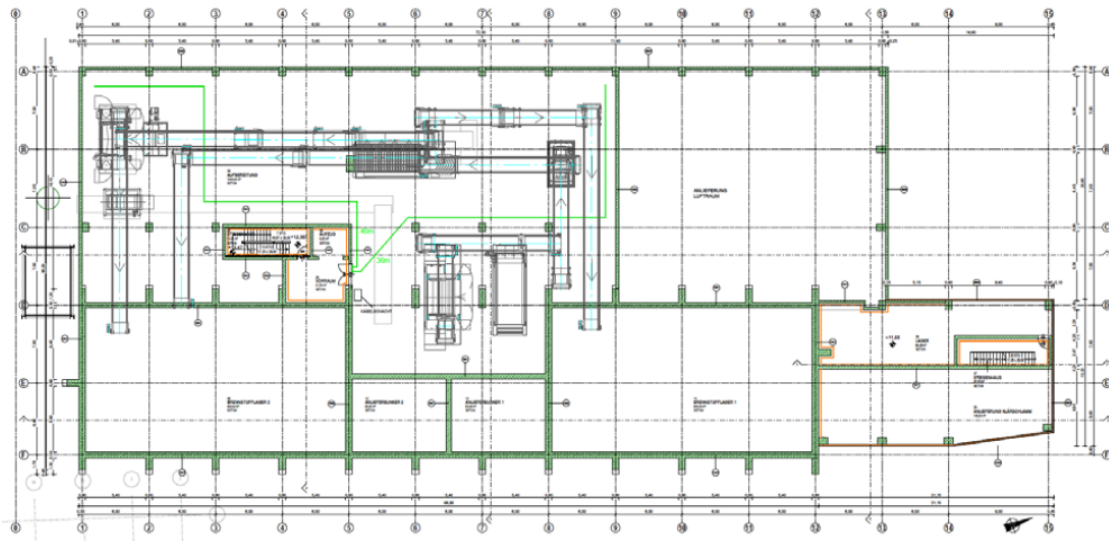


Abbildung 101 Grundriss Aufbereitung

Sämtliche Bereiche der Aufbereitungsanlage (Abbildung 101), insbesondere die beiden Zerkleinerer werden abgesaugt und in die bestehende Hallenabluft integriert.

Die abgetrennten Eisenmetalle werden über einen Schacht und ein schräges Förderband in einem Container gesammelt, welcher von einem befugten Entsorger bei Bedarf abgeholt wird.

Aus dem „Anlieferbunker 2“ für Fertigmaterial können die Reststoffe, welche bereits eine Korngröße < 80 mm haben, mittels eines der beiden Kräne manipuliert werden. Die Reststoffe werden entweder direkt in das „Brennstofflager 2“ befördert, oder auch über das Flächensieb der Aufbereitungslinie geführt. Der Siebüberlauf kann wiederum über den Nachzerkleinerer weiter aufbereitet werden.

Bedarf die angelieferte Qualität einer weiteren Aufbereitung, so wird die Charge über die Zerkleinerungslinie aufgegeben.

Die Brennstofflager haben eine Höhe von etwa 20 m und ein Volumen von zusammen etwa 12.000 m³.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Aufbereitungsanlage als Blockfließbild mit Mengenangaben dargestellt.

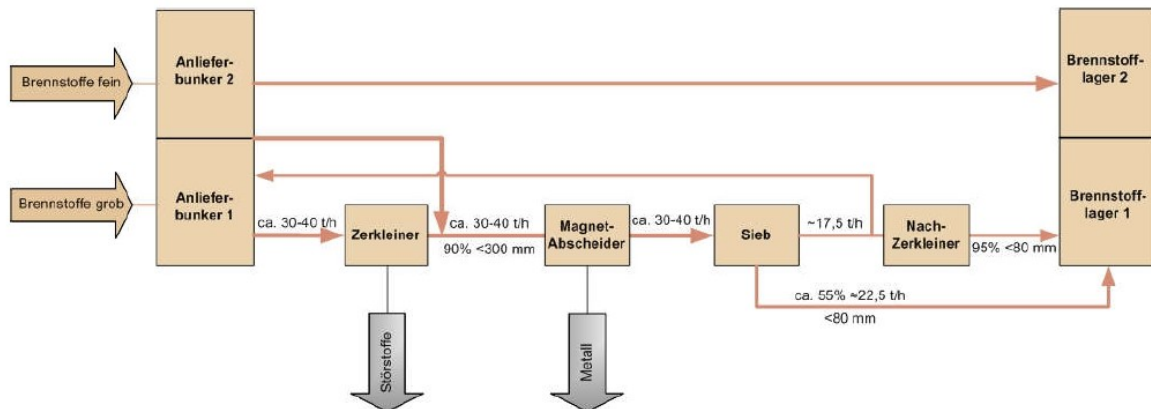


Abbildung 102 Prozessbeschreibung

Die Beschickung des Förderbandes zum Kesselhaus erfolgt mittels eines der beiden Kräne und eines Aufgabetrichters mit Austragsboden. Von dort wird das Fördergut über gekapselte und abgesaugte Förderbänder rund 90 m zum Kesselhaus transportiert. Die Förderbrücke ist für Wartungszwecke mit einem Wartungspodest und Laufstegen versehen.

Die brandschutztechnische Trennung zwischen der Aufbereitung und dem Kesselhaus erfolgt im Bereich der Förderbrücke an der Außenwand des Brennstofflagers. Der Abschluss erfolgt einerseits durch brandbeständige Bauteile der Klassen EI 90 und A2, die Öffnung selbst wird mit einer Wasserbeaufschlagung gemäß Richtlinie des Bundesfeuerwehrverbandes ÖBFV RL VB 05 versehen. Gesichert durch das betriebsinterne Wasserversorgungsnetz werden 20 l/m².min Wasser über eine Dauer von mindestens 90 Minuten aufgebracht. Die Anlagentechnik, wie Leitungsmaterial und Leitungsführung, erfolgt dabei entsprechend der Richtlinie TRVB 128 S 12.

6.2 Bewertung nach Maßnahmenmatrix des VOEB

6.2.1 Risikoeinstufung von Abfällen

Im ersten Schritt ist die Risikoeinstufung von Abfällen nach der Leitlinie des VOEB durchzuführen. Mit der Risikoklasse des Abfalls lassen sich danach die empfohlenen brandschutztechnischen Maßnahmen aus der Maßnahmenmatrix herauslesen. Mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes werden die Abfälle mittels weniger Kriterien eingeordnet. Diese Hauptkriterien sind die Brennbarkeit, der Anteil an sicherheitstechnisch relevanten Stoffen beziehungsweise Bestandteilen und das erhöhte Selbstentzündungspotential.

Im Entscheidungsbaum, der in folgender Abbildung ersichtlich ist, werden die drei Kriterien abgefragt. Die Anzahl der „Ja“ ergibt die Brandrisikoklasse. Klasse 3 heißt hohes Brandrisiko, Klasse 2 mittleres und Klasse 1 niedriges. Wird auf alle Kriterien mit „Nein“ geantwortet ergibt sich folglich kein Brandrisiko. (Vgl. Nigl & Pomberger 2019, S. 2f)

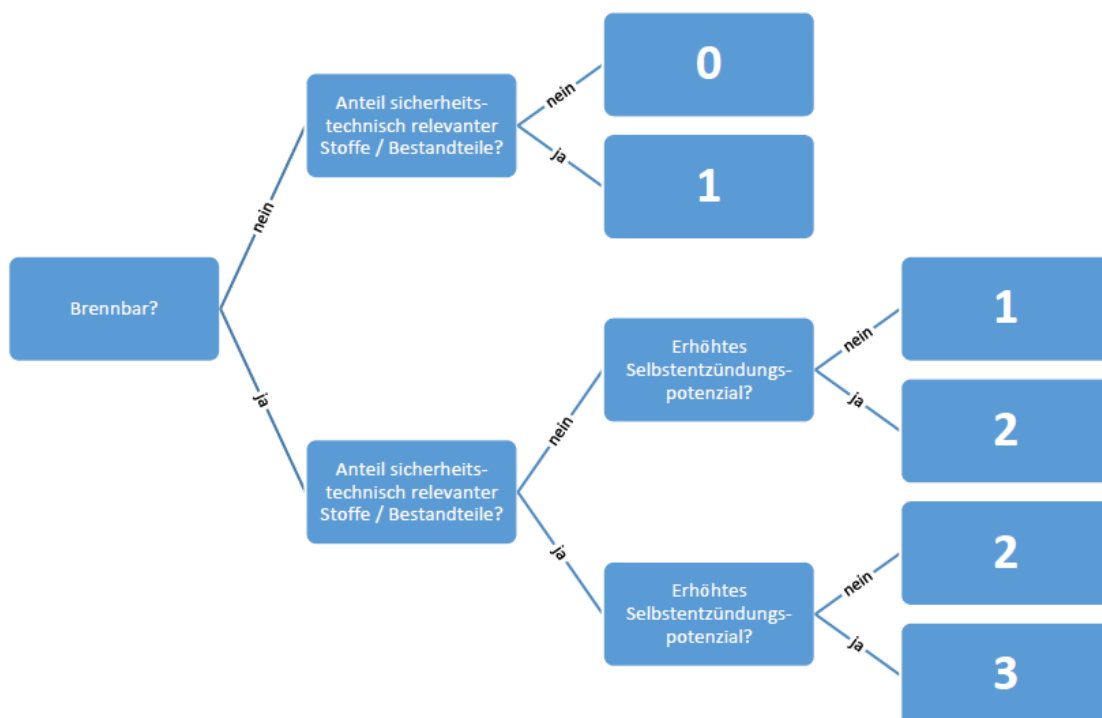


Abbildung 103 Entscheidungsbaum Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger

Die Brennbarkeit von Abfällen wurde in vorhergehenden Kapiteln bereits behandelt. Bei der Betrachtung der verwendeten Abfälle in der geplanten Anlage der Norske Skog GmbH ist dieses erste Kriterium mit „Ja“ zu beantworten.

Bei der Frage nach dem Anteil der sicherheitstechnischen relevanten Stoffe oder Bestandteile muss zwischen den verschiedenen in Zukunft verwendeten Abfällen unterschieden werden. Diese sind Abfälle aus der eigenen Produktion, wie Rinde, Altpapier oder Klärschlamm, Gewerbeabfälle oder fertig aufbereitete Ersatzbrennstoffe. Bei den Abfällen aus dem eigenen Firmenbetrieb und den EBS ist die Frage nach den sicherheitstechnischen relevanten Stoffen mit „Nein“ zu beantworten. Die zugelieferten Gewerbeabfälle hingegen können solche Bestandteile wie Lithium-Ionen-Batterien oder Spraydosen enthalten. Aus diesem Grund ist die Frage mit „Ja“ zu beantworten.

Auch bei dem Selbstentzündungspotenzial, das ebenfalls in den vorherigen Kapiteln behandelt wurde, ist eine Einteilung der Abfälle in die drei Sorten sinnvoll. Relevante Parameter für das Selbstentzündungspotenzial sind der Anteil an organischem Material, Anhaftungen und Verschmutzungen, die Oberflächen der Materialien und die Umgebungstemperatur (Vgl. Nigl & Pomberger 2019, S. 6f). Zugekaufte Ersatzbrennstoffe sind bereits durch eine Aufbereitungsanlage gegangen und sollten nur einen kleinen Anteil an organischem Material und Verschmutzungen aufweisen. Ebenfalls weisen Gewerbeabfälle in der Regel geringe Mengen davon auf. Stoffe aus der eigenen Produktion können hingegen mehr Verschmutzungen, Anhaftungen oder organische Materialien beinhalten. Bei diesen Abfällen kann die Frage nach dem erhöhten Selbstentzündungspotential mit „Ja“ beantwortet werden. Ein wichtiger Punkt bei der Selbstentzündung ist die Lagerungsdauer. Diese ist zwar sehr kurz geplant, nur kann, bedingt durch technische Defekte, Betriebsunterbrechungen etc. nicht gesichert davon ausgegangen werden. Aus diesem Grund kann die Frage nach dem Selbstentzündungspotential bei Gewerbeabfällen und EBS a priori nicht mit „Nein“ beantwortet werden.

Zusammengefasst ergibt es für den Ersatzbrennstoff die Brandrisikostufe 1/2, demnach ein niedriges bis mittleres Brandrisiko. Gewerbeabfälle erreichen bei den Fragen zwei bis drei „Ja“ und sind mit einem Risiko von mittel bis hoch

einzuordnen. Die Abfälle aus der eigenen Produktion haben die Brandrisikoklasse mittel ausgehend von zwei mit „Ja“ beantworteten, Fragen.

Die ermittelten Risikoklassen decken sich auch mit der Auflistung in der Publikation des VOEB (Vgl. Anhang).

6.2.2 Maßnahmenmatrix

Mit den ermittelten Brandrisikoklassen kann man in der Maßnahmenmatrix des VOEB die zu treffenden Maßnahmen eruieren (Vgl. Anhang). Für die geplante Aufbereitungsanlage der Firma Norske Skog GmbH werden die Risikobereiche „Aufbereitungsanlagen innerhalb/außerhalb von Baulichkeiten“, „Zerkleinerungsanlagen/Shredder inkl. Austragsband“ und „Lagerbereiche innerhalb von Baulichkeiten $\leq 1.200 \text{ m}^2$ “ genauer betrachtet, da die Grundfläche der geplanten Anlieferungs- und Brennstoffbunker rund 716 m^2 beträgt.

Für den Risikobereich Aufbereitungsanlage sieht die Maßnahmenmatrix für die Risikoklassen niedrig, mittel und hoch nur eine Maschinen- und Anlagenüberwachung, also eine Detektion, vor. Für die Zerkleinerungsanlage samt Austragsband werden die Maßnahmen Detektion und ein Maschinen- und Anlagenschutz, also eine Löschung, gefordert. Für die Lagerflächen werden die Bildung von Brandabschnitten, eine Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA) und Wandhydranten vorgeschlagen. Eine Brandmeldeanlage gehört gleichermaßen zu den Maßnahmen wie eine automatische Löschanlage, wenn keine Brandabschnitte gebildet werden.

Der Maschinen- und Anlagenschutz hat zum Ziel, Brände am Entstehungspunkt, wie dem Shredder, frühest möglich zu erkennen und zu bekämpfen. Aus diesem Grund werden Branderkennungs- und Löscheinrichtungen direkt an der Maschine oder Anlage angebracht. Diese Systeme werden zusätzlich zu den bestehenden Brandmeldeanlagen installiert und sollen relevante Anlagenteile, wie Förderbänder, Shredder und FE-Abscheider, schützen. (Vgl. VOEB 2019, S. 20)

Durch die Bildung von Brandabschnitten soll das Übergreifen eines Brandes auf andere Anlagenbereiche verhindert werden. Damit sollen längere Betriebsunterbrechungen kurz gehalten und Sach- sowie Personenschaden vermieden werden. Die Brandabschnitte sind möglichst klein zu halten. Ergibt sich

die Notwendigkeit größerer Brandabschnitte wegen betriebstechnischer Gründe, so sind entsprechende brandschutztechnische Maßnahmen wie automatische Löschanlagen vorzusehen. (Vgl. VOEB 2019, S. 17)

Brandmeldeanlagen werden in der technischen Richtlinie des vorbeugenden Brandschutzes TRVB 123 S geregelt und sind nach dieser zu errichten. Alternative Brandmeldeanlagen, wie zum Beispiel Infrarotkameras, können zum Einsatz kommen, wenn sie in Einvernehmen mit akkordierten Stellen und den Versicherern erfolgt. (Vgl. VOEB 2019, S. 18)

Die Auslegung der automatischen Löschanlagen erfolgt gemäß TRVB 127 S. Diese kommt zum Einsatz, wenn aus betriebstechnischen Gründen große Brandabschnitte gebildet werden müssen. Die Löschanlagen erkennen, melden und löschen ohne menschliches Eingreifen die Brände im Entstehungsstadium. Die Typen von Sprinkler- und Sprühflutanlagen wurden in den vorderen Kapiteln bereits besprochen. (Vgl. VOEB 2019, S. 18)

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen dienen dazu, den Brandrauch und die entstehende Wärme abzuführen. So werden Flucht- und Angriffswege rauchfrei gehalten und ermöglichen eine schnelle Brandbekämpfung. Sie werden nach der TRVB 125 S eingebaut. (Vgl. VOEB 2019, S. 19)

Die Maßnahmenmatrix des Verbandes der Österreichischen Entsorgungsbetriebe sieht auch eine Eingangskontrolle mittels Thermografie am Betriebsstandort allgemein vor. Da viele Zündquellen oder Brandherde in die Anlagen eingeschleppt werden, sollten Thermokameras thermisch anormale Zustände im Bereich der Eingangskontrolle, wie zum Beispiel der Brückenwaage, erkennen und melden. (Vgl. VOEB 2019, S.19)

6.3 Konzept Norske Skog GmbH

Die Erkenntnisse aus Literaturrecherche und den Versuchen sowie die daraus resultierenden Empfehlungen können nun gemeinsam mit den Maßnahmen der Matrix für ein Konzept der Aufbereitungsanlage der Firma Norske Skog GmbH angewendet werden. Um einen besseren Überblick zu erhalten, empfiehlt sich eine Aufteilung in die Bereiche Anlieferung, Aufbereitung und Lagerung. Das folgende, vorgeschlagene Konzept konzentriert sich auf die Lager und

Fördertechnik, mit dem Hintergrund, diesen abfallwirtschaftlichen Prozess brandsicherer zu machen. Die allgemeinen brandschutztechnischen Bestimmungen, die durch Normen und Richtlinien geregelt werden, werden vorausgesetzt und sind nicht zu vernachlässigen.

6.3.1 Anlieferung

Anliefernde LKW werden bei der Einfahrt ins Firmengelände auf der Brückenwaage verwogen. Danach fährt das Fahrzeug in die Anlieferungshalle ein, und die Tore werden zur Vermeidung von Staub- und Geruchsbelastung für die Umwelt verschlossen. Der angelieferte Abfall oder schon aufbereitete Ersatzbrennstoffe werden auf den Annahmeförderer abgeladen.

Die Gefahr in diesem Bereich besteht in der Einschleppung von Brandnestern, die sich unentdeckt in der LKW-Ladung befinden. Wie auch in der Maßnahmenmatrix des VOEB vorgeschlagen, empfiehlt sich in diesem Bereich eine Einfahrtskontrolle mittels Infrarot-Kameras. Kombinierte IR-Kameras, die neben einem Thermobild gleich ein Echtbild liefern, eignen sich hier für die Überwachung der gesamten Anlieferungshalle. Da das Anlieferungsfahrzeug das Fördergut direkt auf den Annahmeförderer abkippt und es nicht in der Halle zwischengelagert wird, ist eine automatische Löschanlage mittels Löschmonitoren oder Sprühfluranlagen nicht nötig. Eine stationäre Löscheinrichtung mit einem Schnellangriffsschlauch ermöglicht den Mitarbeitern eine direkte und schnelle Brandbekämpfung.

Eine abermalige Kontrolle des Fördergutes erfolgt mittels IR-Sensoren am Anfang und Ende des Annahmeförderers. Durch Sprinkler am Anfang und Ende des Förderers können detektierte Brandnester schnell abgelöscht werden. Zudem dienen sie als brandschutztechnische Trennung der Anlieferungshalle von der weiteren Anlage. Nach Möglichkeit ist der Annahmeförderer einzuhausen, da mittels Gasdetektion Glutnester besser erkannt werden können und eine Verschleppung in die Annahmehalle verhindert wird. Um den Kamineffekt möglichst gering zu halten, ist der Förderer möglichst horizontal zu konstruieren. Ein Umkehrbetrieb des Bandförderers ermöglicht es, detektiertes Brandgut in die Anlieferungshalle zurück zu fördern, da die Zugänglichkeit sonst erschwert ist.

6.3.2 Aufbereitung

Wie auch in der Maßnahmenmatrix vorgeschlagen, empfiehlt sich in der gesamten Aufbereitungsanlage eine vollständige Maschinen- und Anlagenüberwachung, sowie ein Maschinen- und Anlagenschutz in Form einer automatischen Löschanlage. Der Hauptgefahrenpunkt liegt in der Zündung sicherheitstechnischer Stoffe im Abfall, wie zum Beispiel Lithium-Ionen-Akkus oder Spraydosen, während des Shredder- bzw. Zerkleinerungsvorganges. Die Siebanlagen und der FE-Abscheider bilden weitere Gefahrenquellen, die es zu überwachen gilt. Die Löschanlage hat die primäre Aufgabe eine Brandausbreitung durch die Förderanlagen zu verhindern.

Die Bandförderanlagen sind generell möglichst horizontal zu konstruieren und sollten längere Strecken aufweisen, was eine Detektion erleichtert und Löschkräften mehr Zeit gibt, einzugreifen. Um eine einfache Zugänglichkeit zu den Förderern zu ermöglichen, ist eine offene Bauweise von Vorteil. So empfiehlt sich auch eine Zugangsmöglichkeit zum Untertrum, beispielsweise durch die Abdeckung mittels mit Reißverschluss zu öffnenden Planen. Generell ist auf eine gute Zugänglichkeit zu allen Bereichen der Anlage zu achten, um im Schadensfall schnell und effektiv eingreifen zu können. Auch die regelmäßig durchzuführende Reinigung der Förderer, ein Teil des organisatorischen Brandschutzes, wird dadurch erleichtert.

6.3.3 Lager

Die Lager für die Abfälle beziehungsweise Ersatzbrennstoffe in der Aufbereitungsanlage der Firma Norske Skog GmbH sollen in Form von vier Bunkerlagern ausgeführt werden. Die beiden Brennstofflager besitzen eine Grundfläche von jeweils 303 m², die beiden Anlieferungslager jeweils 55m². Durch kurze Lagerzeiten wird versucht, das Risiko einer Selbstentzündung so gering wie möglich zu halten. Die etwas höhere Gefährdung besteht im Anlieferungslager 1, da dort nicht aufbereitete Abfälle angeliefert werden. In den restlichen drei Bunkern befinden sich bereits aufbereitete Ersatzbrennstoffe, bei denen das Risiko der Selbstentzündung minimiert ist.

Die Hauptgefahr besteht in der Einschleppung eines Brandnestes in das Bunkerlager. Ebenso können unentdeckte Störstoffe zu einem Brand im Lager führen. Ein Problem können dabei nicht detektierte Lithium-Ionen-Akkus darstellen, die erst nach einem längeren Zeitraum reagieren.

Um das Risiko einer Einschleppung zu minimieren, wird vorgeschlagen, das Fördergut auf den Förderern vor der Übergabe in den Bunker zu kontrollieren. Dies kann mit Thermokameras oder Infrarot-Sensoren geschehen. In Verbindung mit der Detektion an der Förderanlage steht ein entsprechendes Löschesystem. Dieses hat die Aufgabe, bei stehender Bandförderanlage das Brandgut abzukühlen und zu löschen und eine Verschleppung in den Bunker zu verhindern.

Die Maßnahmenmatrix des VOEB schlägt bei Lagern eine Brandmeldeanlage vor. Glutnester oder Glimmbrände im Inneren des Haufwerks sind jedoch sehr schwer zu detektieren, da sie keine sichtbare Rauch- oder Flammenbildung aufweisen. Eine Infrarot-Überwachung bietet die beste Möglichkeit, um frühzeitig eine Brandentstehung zu erkennen. Brandmelder an der Decke der Halle detektieren entstehende Brände im Gegensatz dazu erst viel später.

Durch das Isolationsvermögen der Kunststoffe kann Wärmestrahlung nicht an die Oberfläche des Haufwerkes treten. Die beste Möglichkeit um Entstehungsbrände zu erkennen, wäre daher eine Gasdetektion. Durch die Abmessungen der Bunker und Anlagengebäude ist dies nur schwer möglich. Nichts desto trotz sollte im Abzugssystem nicht auf eine Gasmessung verzichtet werden, um Glimmbrände eventuell noch früher detektieren zu können.

Bei der Bildung von Brandabschnitten könnte laut Maßnahmenmatrix auf eine automatische Löschanlage verzichtet werden. Trotzdem empfiehlt sich eine automatische Werferanlage, die mit dem Infrarot-System gekoppelt ist, um auftretende Brände punktgenau ablöschen zu können. Durch diese Maßnahme wird das restliche Lagergut nicht durch Löschmittel kontaminiert. Der betroffene Abfall muss entfernt und das restliche Haufwerk mittels Kran umgewälzt werden, um mögliche Brandnester ausschließen zu können. Alternativ ist auch eine Löschung mittels Sprühflutanlage möglich. Diese erhöht die Sicherheit gegen eine großflächige Brandausbreitung, jedoch wird mehr Löschmittel eingesetzt und das restliche Haufwerk kontaminiert. Auf jeden Fall muss eine Möglichkeit geschaffen

werden, um aufgebrachtes Löschwasser oder Löschmittel anschließend wieder entfernen zu können.

6.4 Zusammenfassung

Die hohen Sicherheitsstandards der Norske Skog Bruck GmbH bieten schon ein gutes Schutzniveau. Um dieses auch auf die neu zu errichtende Anlage übertragen zu können, benötigt es eine genaue Auseinandersetzung mit den Gefahren von abfallwirtschaftlichen Systemen. Die bekannten brandschutztechnischen Überlegungen der Papierindustrie können nicht direkt auf eine Abfallbehandlungsanlage übertragen werden. Es bedarf einiger Adaptionen, um auch diesen Risiken gewachsen zu sein.

Ein Großteil der allgemein gültigen Sicherheitsvorkehrungen können übernommen werden, aber ein Augenmerk ist auf die Förderanlagen zu legen. Durch die im Abfall vorhandenen Störstoffe kann es jederzeit und an jedem Punkt zu einem Brandausbruch kommen. Der Brand kann sich dann in Folge in der gesamten Anlage verteilen oder schlimmsten Falls in einen der Bunker gelangen, wo er äußerst schwierig zu bekämpfen ist. Um dies verhindern zu können, hat es höchste Priorität, den Brand möglichst schnell zu erkennen und die Bandförderanlagen außer Betrieb zu nehmen. Hier spielt die Branddetektion die wichtigste Rolle. Eine automatische Löschanlage verlangsamt die Brandausbreitung und dämmt den Brand so weit ein, dass ein Wiederauffahren der Aufbereitungsanlage nach dem raschen Einsatz der Mitarbeiter oder Betriebsfeuerwehr (BtF) schnell ermöglicht wird.

Eine gut konzipierte Anlage mit guten Erreichbarkeiten aller Systemeinheiten ermöglicht ein schnelles und effektives Eingreifen der Löschkraften. Dies wird gewährleistet, wenn in einer frühen Phase der Planung und Konstruktion der Anlage der Brandschutz berücksichtigt wird. Nachträglich installierte Systeme bieten zwar auch einen entsprechenden Schutz, können aber Versäumnissen in der Planung nie ausgleichen. Unzugängliche Förderanlagenteile oder Aggregate, wie Shredder- oder Siebanlagen, erhöhen das Risiko einer weitflächigeren Schadensausbreitung und folglich eine längere Betriebsunterbrechung.

7. Schlussfolgerung

Um das Brandrisiko in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft generell zu senken, muss die Menge an Störstoffen im Abfall gesenkt werden. Dies kann nur durch ein Umdenken in der Bevölkerung, angeregt durch langfristige und intensive Initiativen, erfolgen. Zusätzlich erschwert der fixe Einbau von gefährlichen Lithium-Ionen-Akkus seitens der Produzenten in alltägliche Konsumgüter das Trennen und gesonderte Entsorgen der Batterien für den Konsumenten.

Durch die verstärkte In-Verkehr-Bringung brandgefährlicher Konsumgüter ist bereits jetzt ein Anstieg von Störstoffen in den abfallwirtschaftlichen Systemen in den nächsten Jahren erkennbar, auf den die AbER-Betriebe reagieren müssen. Zusätzliche große Brandereignisse verschlechtern das Bild des Industriezweiges in der Öffentlichkeit und führen zu höheren Versicherungssummen der Anlagen in der Branche allgemein.

Eine Aufrüstung von bestehenden Anlagen im Bereich des Brandschutzes ist daher unumgänglich. Seitens der abfallverarbeitenden Branche, der universitären Forschung und der Brandschutzindustrie sind in den letzten Jahren gut einsetzbare und brauchbare Systeme dazu entwickelt worden, die helfen, entstehende Brände schnellstmöglich zu detektieren und zu bekämpfen. Bei der Konstruktion von Förderanlagen und der Anlegung von Lagerflächen, vor allem bei der Neukonzeption, steht der Brandschutz aber immer noch in Konflikt mit den wirtschaftlichen Interessen. Die Bildung von Brandabschnitten verringert die Lagerkapazitäten und erschwert die Führung von Förderanlagen. Lange und flache Bandförderer verlängern die Förderstrecken und haben einen höheren Platzbedarf, ein geringerer Förderstrom verringert die Kapazität der gesamten Anlage. Nicht umsonst werden aber die Förderbänder als Zündschnur bezeichnet, die einen anfangs kleinen Brand auf verschiedensten Wegen durch die Anlage transportieren, und gerade unentdeckte Glutnester in Lagern führen oft zu einem verheerenden Brandereignis mit weitreichenden Folgen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Brandes steigt ab einer Neigung von 20° der Förderanlage stark an, ab 30° vergrößert sie sich um ein Vielfaches. Eine Steigung über diesem Wert sollte auf alle Fälle vermieden werden. Lange

Förderwege erhöhen die Möglichkeit einer raschen Detektion und einfachen Löschung des Brandes. Automatische Sprinkleranlagen garantieren keine vollständige Ablöschung des Brandgutes, und so ist der Einsatz von Mitarbeitern oder Feuerwehrkräften nötig. Eine zugängliche Konstruktion zu allen Teilen der Förderanlage ist unumgänglich. Einhausungen der Anlage erschweren nicht nur den Zugang, sondern haben auch eine negative Wirkung auf den Brandverlauf. Der Kamin- sowie Tunneleffekt erhöhen die Ausbreitungsgeschwindigkeit und auch Intensität des Brandes. Eingehauste oder geschlossene Förderanlagenteile, die das Fördergut unbedingt vor Umwelteinflüssen schützen müssen, sind möglichst horizontal zu planen, um diese Effekte vermeiden zu können. Außerdem ist es notwendig, leicht zu öffnenden Zugänge vorzusehen, um das Brandgut ablöschen und entfernen zu können.

Die größte Gefahr bei Lagern geht von der Verschleppung von Glutnestern aus. Aus diesem Grund ist eine Überwachung mittels Thermografie bei den Lagereingängen notwendig. Glimmbrände im Haufwerk sind nur schwer zu detektieren. Je größer die Lagerfläche, desto schwerer ist der Brand zu lokalisieren. Aufgrund der Isolierfähigkeit von Kunststoffabfällen kann ein Hotspot an der Oberfläche des Haufwerkes erst sehr spät und an einer anderen Stelle auftreten, wodurch nicht auf den eigentlichen Brandherd geschlossen werden kann. Daher soll die Löschanlage auf das gesamte gelagerte Material wirken. Der Einsatz von Löschmittelzusätzen hilft, dass das Löschmittel tiefer in das Brandgut eindringen kann. Ein weiteres großes Risiko bestimmter Abfallsorten ist die Gefahr der Selbstentzündung. Diese erhöht sich in Freilagern und bei einer langen Lagerzeit. Eine konsequente Lagerplanung ist unumgänglich und verringert das Risiko. Vor allem große Freilager erschweren die Branderkennung und – Löschung, da Brandmelder und Sprinkler an keiner Decke befestigt werden können. Um das Risiko dennoch zu minimieren, wäre es von Vorteil, die Lagerflächen zu verkleinern und in Brandabschnitte zu unterteilen.

Eine konsequentere Einteilung der gesamten Anlage in Brandabschnitte würde die Gefahr eines längeren Stillstandes oder eines Totalschadens nach einem Brandereignisses stark reduzieren. Jedoch müssten längere Förderstrecken und die Installation von Brandabschottungsanlagen in Kauf genommen werden, was im Gegensatz zu einer hohen Durchsatzrate steht.

Neben den technischen Maßnahmen darf nie auf den organisatorischen Brandschutz verzichtet werden. Die Schulung und Sensibilisierung der Mitarbeiter hat oberste Priorität. Erste Maßnahmen durch die anwesenden Mitarbeiter helfen, den Brand schnellstmöglich einzudämmen oder das Brandgut zu entfernen. Ein konsequent durgeführter Inspektions- und Wartungsplan senkt das Risiko der Brandentstehung durch technische Defekte oder schief bzw. heiß laufende Förderaggregate.

Die Sauberkeit der gesamten Anlage ist von sehr hoher Bedeutung. Besonders Ansammlungen an Bauteilen der Förderanlagen können als Brandquelle dienen. Durch die Erwärmung der mechanischen Einrichtungen wie Motoren, Lagern oder Rollen können sich die abgelagerten Abfallpartikel entzünden und in weiterer Folge auf das Fördergut übergreifen. Ein anfänglicher Glimmbrand kann von Brandmeldeanlagen schwer detektiert werden und liegt oft außerhalb des Aufnahmebereichs von thermografischen Erfassungssystemen. Um eine sorgfältige Reinigung aller Anlagenteile gewährleisten zu können, ist eine Zugänglichkeit zu diesen notwendig. So ist es zum Beispiel auch nötig, die Abdeckung des Untertrums der Bandförderanlage leicht öffnen und schließen zu können. Staubabsauganlagen sind auch regelmäßig zu warten. Bei diesen ist auch besonders auf den Explosionsschutz zu achten.

Auch wenn eine Brandentstehung durch Störstoffe oder eine Einschleppung von Glutnestern nicht ausgeschlossen werden kann, können durch solche Maßnahmen andere Brandquellen wie Selbstentzündung oder technische Defekte vermieden werden. Die brandschutztechnischen Einrichtungen ermöglichen bei regelmäßiger Wartung und Inspektion eine schnelle Branddetektion und eine Eindämmung des Brandes auf den Entstehungsort.

Die vorgestellten Maßnahmen sollen bei der Konstruktion und Planung einer neuen Abfallaufbereitungs- und Verarbeitungsanlage einen Weg vorgeben, um die Sicherheit der Anlage zu erhöhen. Nur eine konsequente Umsetzung der brandschutztechnischen und konstruktiven Maßnahmen bereits während der Planungsphase wird helfen, die Sicherheitsstandards der Branche zu erhöhen. Davon wird das Image der gesamten Branche profitieren und Kostenprämien von Versicherungen werden nicht weiter steigen. Dafür muss aber dem Brandschutz ein höherer Stellenwert zugeordnet werden, und es dürfen keine wirtschaftlichen

Interessen, wie hohe Förderleistungen und großer Durchsatz, darüber gestellt werden.

Literaturverzeichnis

- Berger, A. et al.: Leitfaden zur Brandvermeidung durch Selbstentzündung bei der Lagerung von Recycling- und Deponiestoffen, o.V., 2010
- Bußer, M., Mähliß, J.: Lithiumbatterien, o.V., 2016
- Fenell, D.: Investigation into the King's Cross Underground Fire, o.V., 1988
- GDV: Brandschutz in Kraftwerken, o.V., 2017
- Grech, H., et al.: Thermische Abfallbehandlung in Österreich, 2.Aufl., BMLFUW., 2009
- Gressmann, H.: Abwehrender und anlagentechnischer Brandschutz, 5.Aufl., UTB, 2019
- Griemert, R., Römisch, P.: Fördertechnik, 12.Aufl., Springer, 2018
- Holzer, C., et al.: Anforderungen an die Zwischenlagerung von heizwertreichen Abfällen, BMLFUW , 2007
- Hosser, D.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 2.Aufl., vfdb, 2009
- Kunkelmann, J.: Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatz-taktischer Empfehlungen, KIT, 2015
- Kunkelmann, J.: Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien, KIT, 2017
- LANUV: Brandereignisse in Abfallbehandlungsanlagen, o.V., 2016
- Merschbacher, A.: Brandschutzfibrel, Springer, 2018
- Nigl, T., Pomberger, R.: Brandgefährlicher Abfall – Über Risiken und Strategien in der Abfallwirtschaft, in: Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech, o.V., 2018
- Nigl, T., Pomberger, R.: Risikoeinstufung von Abfällen in Abhängigkeit ausgewählter Eigenschaften, o.V., 2019
- Pfeiffer, A.: Löschmittel in der Brandbekämpfung, Springer, 2016
- SIEMENS: Brandschutz-Wegweiser, 2. Auflage, Publicis Publishing, 2013
- Wu, Y., Drysdale, D.: Study of upward flame spread on inclined surfaces, HSE, 1996
- VDS: Abfallverbrennungsanlagen (AVA), o.V., 1998
- VOEB: Brandschutz für Abfall- und Ressourcenwirtschaftsbetriebe Leitlinie, o.V., 2019
- VOEB: Brandschutz für Abfall- und Ressourcenwirtschaftsbetriebe Maßnahmenmatrix, o.V., 2019

Zeitschriften:

Bölskey, E., Schjerve, N.: Die Baustelle im Griff, in: Brandschutz, Heft 5 (2011), S. 18 – 21

Eichinger, M.: Brandschutz im Recyclingprozess, in: FeuerTRUTZ Magazin, Heft 2 (2012), S. 1 – 2

Weitere verwendete Literatur:

Continental Contitech: Brandsichere Fördergurte nach EN 14973 und EN 12882, o.J.

Rosenbauer: Case Study Abfallsortieranlage Remondis GmbH und Co. KG, 2012

Rosenbauer: Case Study Abfallrecycling Korn Recycling GmbH, 2014

Rosenbauer: Datenblatt Brandschutz für Müllbunker Werferlöschanlagen, 2014

Rosenbauer: Case Study Abfallrecycling Grundon Waste Management Ltd., 2018

Rosenbauer: Case Study Entsorgungszentrum AWG Bassum, 2019

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Brand einer Abfall-Förderanlage Quelle: FF Laxenburg	1
Abbildung 2 Brand einer Förderbrücke Quelle: BG RCI	3
Abbildung 3 Brandbekämpfung Förderanlage Quelle: FF Laxenburg	4
Abbildung 4 Ersatzbrennstoff-Ballen	6
Abbildung 5 Verbrennungsdreieck	9
Abbildung 6 Brandtetraeder.....	9
Abbildung 7 Brandausbreitung bei Recyclinganlage Quelle: Bayern1.....	11
Abbildung 8 Brand Abfalllager Quelle: FF Zisterdorf	12
Abbildung 9 Gegenüberstellung Brandursachen Quelle: Nigl & Pomberger	13
Abbildung 10 Zersetzung Lithium-Ionen-Batterie Quelle: Buser & Mähliß.....	16
Abbildung 11 Brand Akku nach mechanischer Beschädigung Quelle: BR	17
Abbildung 12 Gliederung Transporttechnik Quelle: Griemert & Römisch	19
Abbildung 13 Abhängigkeit der Strukturträger Quelle: Griemert & Römisch	20
Abbildung 14 Inhalt Materialflusstechnik Quelle: Griemert & Römisch.....	20
Abbildung 15 Greiferkran Quelle: Voith	21
Abbildung 16 Bagger mit Greifer Quelle: JCB	21
Abbildung 17 Stapler mit Ballenzange Quelle: Kaup GmbH.....	22
Abbildung 18 Abfallwirtschaftliche Förderanlagen Quelle: M-U-T	23
Abbildung 19 Bezeichnungen Gurtförderer Quelle: Griemert & Römisch.....	24
Abbildung 20 Geschlossener Gurtförderer Quelle: Beumer Group	25
Abbildung 21 Geschlossener Gurtförderer (Tropfenform) Quelle: Schulte Strathaus	25
Abbildung 22 Einhausung Gurtförderer Quelle: Stag AG	26
Abbildung 23 Gurtförderer in Rohr Quelle: Westeria GmbH.....	27
Abbildung 24 Kettenförderanlagen Quelle: Coparm	28
Abbildung 25 Detail Kettenförderer Quelle: GEPE-Technik	28
Abbildung 26 Schneckenförderer Quelle: Steiner.....	30
Abbildung 27 Brandursachen Abfallbehandler Quelle: LANUV	31

Abbildung 28 Erschwerte Brandbekämpfung Quelle: Christian Elsner	32
Abbildung 29 Brandbekämpfung eingehauster Förderer Quelle: FF Golling	33
Abbildung 30 Abfall-Lagerhalle Quelle: BEE	34
Abbildung 31 Müllbunker Quelle: Graf.....	34
Abbildung 32 Ballenlager Quelle: Kretschmer	35
Abbildung 33 Einteilung Brandschutz Quelle: Gressmann	37
Abbildung 34 Entscheidungsbaum Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger.....	39
Abbildung 35 Schadensentwicklung Brand Quelle: Gressmann.....	40
Abbildung 36 Einteilung Meldertypen Quelle: Gressmann	42
Abbildung 37 Sprinklertypen Quelle: Gressmann.....	45
Abbildung 38 Feuerschutzabschluss Quelle: Merschbacher	47
Abbildung 39 Feuerschutzabschluss Quelle: Merschbacher	48
Abbildung 40 IR-Überwachung Quelle: Rosenbauer	50
Abbildung 41 Automatische Löschanlage Quelle: Rosenbauer	50
Abbildung 42 Überwachung Entladevorgang Quelle: Rosenbauer.....	51
Abbildung 43 Zusammenspiel IR-Kamera und Löschmonitor Quelle: Rosenbauer	51
Abbildung 44 Zielgenaues Löschen Quelle: Rosenbauer.....	52
Abbildung 45 Überwachung Müllbunker Quelle: Rosenbauer	52
Abbildung 46 Geschützter Löschmonitor in Bunker Quelle: Rosenbauer	53
Abbildung 47 IR-Überwachung an Förderband Quelle: Rosenbauer	54
Abbildung 48 CAFS-Sprinklerdüsen Quelle: Rosenbauer	54
Abbildung 49 Gurtförderer mit Löschanlage Quelle: Rosenbauer	55
Abbildung 50 CAFS-Sprinklerdüse Quelle: Rosenbauer	55
Abbildung 51 CAFS-Anlage Quelle: Rosenbauer.....	56
Abbildung 52 Prinzipien Löschen Quelle: Pfeiffer.....	58
Abbildung 53 Löschen mit Schaum Quelle: padpa	61
Abbildung 54 EBS-Ballen	63
Abbildung 55 Brand EBS-Ballen.....	63
Abbildung 56 Löschen eines EBS-Ballens	64
Abbildung 57 Versuchsaufbau.....	65

Abbildung 58 Versuchsaufbau in Ofen	66
Abbildung 59 Kühlwirkung verschiedener Löschmittel	66
Abbildung 60 Versuchsaufbau.....	67
Abbildung 61 Brandsimulation Quelle: Hannes Kern.....	70
Abbildung 62 Versuchsaufbau Unterkonstruktion.....	71
Abbildung 63 LabView – Auswertungsprogramm.....	72
Abbildung 64 LabView Block-Diagramm	72
Abbildung 65 Versuchsanordnung	73
Abbildung 66 Fördermenge	74
Abbildung 67 Versuchsaufbau vor Entzündung.....	74
Abbildung 68 Versuch 1	75
Abbildung 69 Temperaturverlauf 0° Neigung	76
Abbildung 70 Versuch 2	77
Abbildung 71 Brandrückstände	77
Abbildung 72 Temperaturverlauf 20° Neigung	78
Abbildung 73 Versuch 3	78
Abbildung 74 Brandrückstände Versuch 2	79
Abbildung 75 Temperaturverlauf 35° Neigung	80
Abbildung 76 Vergleich Ausbreitungsgeschwindigkeiten	80
Abbildung 77 Versuch 4	81
Abbildung 78 Bestückung.....	81
Abbildung 79 Brandrückstände Versuch 4	82
Abbildung 80 Temperaturverlauf 0° Neigung mit Einhausung	83
Abbildung 81 Versuch 5	83
Abbildung 82 Brandrückstände Versuch 5	84
Abbildung 83 Entzündung des Fördergurtes	85
Abbildung 84 Temperaturverlauf 20° Neigung mit Einhausung	85
Abbildung 85 Versuch 6	86
Abbildung 86 Temperaturverlauf 35° Neigung mit Einhausung	86
Abbildung 87 Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit Einhausung.....	87
Abbildung 88 Trench-Effekt Quelle: Fenell.....	88

Abbildung 89 Einfluss der Einhausung	89
Abbildung 90 Anlegen der Flammen bei 35° Neigung	90
Abbildung 91 Austritt der Flammen nach Einhausung	90
Abbildung 92 Ausströmen der Brandgase	91
Abbildung 93 Durchzünden der Pyrolysegase	91
Abbildung 94 Side-Wall-Sprinkler	92
Abbildung 95 Detailansicht Side-Wall-Sprinkler	92
Abbildung 96 Aufbau Versuch 7	93
Abbildung 97 Temperaturverlauf 20° Neigung mit Einhausung und Sprinkler	94
Abbildung 98 Ausströmen der Brandgase am Ende des Tunnels	94
Abbildung 99 Aktivierung des Sprinklers	95
Abbildung 100 Brandabschluss durch Sprinkler	95
Abbildung 101 Grundriss Aufbereitung	105
Abbildung 102 Prozessbeschreibung	106
Abbildung 103 Entscheidungsbaum Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger	107
Abbildung 104 Auflistung Abfallgruppen und Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger	II
Abbildung 105 Maßnahmenmatrix Teil 1 Quelle: VOEB	III
Abbildung 106 Maßnahmenmatrix Teil 2 Quelle: VOEB	IV

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Maßnahmen Import	100
Tabelle 2 Maßnahmen Aufbereitung	101
Tabelle 3 Maßnahmen Lager	102

10. Abkürzungsverzeichnis

AbER	Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft
BMA	Brandmeldeanlage
BMZ	Brandmeldezentrale
BtF	Betriebsfeuerwehr
CAFS	Compressed Air Foam System
CAFSM	Class-A-Foam-Schaummittel
CFD	Computational fluid dynamics
DEM	Diskrete-Elemente-Methode
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBS	Ersatzbrennstoffe
EN	Europäische Norm
FAA	Förderanlagenabschluss
FDS	Fire Dynamic Simulator
FIFO	first in – first out
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IP	Ingress Protection
IR	Infrarot
ISO	Internationale Organisation für Normung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LVP	Leichtverpackungsabfall
LWC	light weight coated - Papier
MBS	Mehrbereichsschaummittel
ÖBFV	Österreichischer Bundesfeuerwehrverband

ÖNORM	Österreichische Norm
PM	Papiermaschine
RL	Richtlinie
RWA	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
SBS	Sekundärbrennstoffe
TRVB	Technische Richtlinien Vorbeugender Brandschutz
UV	Ultraviolett
VB	Vorbeugender Brandschutz
VdS	Institut für Unternehmenssicherheit
VOEB	Verband der Österreichischen Entsorgungsbetriebe

Anhang Inhaltsverzeichnis

Auflistung Abfallgruppe und Brandrisikoklasse nach Nigl & Pomberger 2019.....	II
Maßnahmenmatrix nach VOEB 2019	III
Versuchsergebnisse	V

Anhang

Auflistung Abfallgruppe und Brandrisikoklasse nach Nigl & Pomberger 2019

Nicht taxative Auflistung von Abfallgruppen bzw. Abfallarten und beispielhafte Zuordnung zur jeweiligen Brandrisikoklasse

Ftl.Nr.	Abfallgruppe / Abfallart (nicht taxativ)	Anmerkungen	Brandrisiko- stufe	Brandrisiko- klasse
1	Gemischte Siedlungsabfälle (Restmüll)	j-j-j/n	2/3	mittel/hoch
2	Gewerbeabfall	j-j-j/n	2/3	mittel/hoch
3	Sperrmüll	j-j-n	2	mittel
4	Biogene Abfälle (z.B. Küchenabfälle)	j-n-n	1	niedrig
5	Grünschnitt	j-n-j	2	mittel
6	Altpapier, Karton	j-j/n-n	1/2	niedrig/mittel
7	Altglas	n-n-n	0	kein
8	Leichtverpackungen (z.B. gelbe Tonne, gelber Sack)	j-j-n	2	mittel
9	Metallabfälle, ohne brennbaren Anteil	n-n-n	0	kein
10	Metallabfälle, <10% brennbarer Anteil	j-n-n	1	niedrig
11	Metallabfälle, >10% brennbarer Anteil (z.B. Fe-Abscheider-Fraktion, Rückstände aus Behandlung)	j-j-j/n	2/3	mittel/hoch
12	Elektrokleingeräte	j-j-n	2	mittel
13	Elektrogroßgeräte (ohne/mit Lithiumbatterien)	j-n/j-n	1/2	niedrig/mittel
14	Bauschutt	j-n-n	1	niedrig
15	Baustellenabfälle, gemischt	j-j-n	2	mittel
16	Ersatzbrennstoffe	j-n-j/n	1/2	niedrig/mittel
17	Werkstättenabfälle	j-j-j	3	hoch
18	Altholz	j-n-n	1	niedrig
19	Altreifen (stückig)	j-n-n	1	niedrig
20	Flusen (z.B. aus Altreifen)	j-n-j	2	mittel
21	Kunststoffabfälle (inkl. Schaumstoffe)	j-j-n	2	mittel
22	Aschen und Schlacken	n-n-n	0	kein

Abbildung 104 Auflistung Abfallgruppen und Risikoklasse Quelle: Nigl & Pomberger

Maßnahmenmatrix nach VOEB 2019

Maßnahmenmatrix														
Risikobereiche	Maßnahmen	Brandrisikoklasse bezogen auf die Abfallart	Organisatorischer Brandschutz	Baulicher Brandschutz				Technischer Brandschutz						
			Brandrisikoklasse bezogen auf die Abfallart siehe 2.1.1 bis 2.1.15	Baustoffe, Bauteile siehe 2.2.1	Brandabschnitte siehe 2.2.2 bzw. Schutzabstand >20m im Freien	Eingelungung siehe 2.2.4	Begrünung / Bepflanzung siehe 2.2.5	Brandmeldeanlage (inkl. Weiterleitung) siehe 2.3.1	Automatische Löschanlage / Alternative Löschanlage siehe 2.3.2 und 2.3.3	Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) siehe 2.3.4	Eingangskontrolle mittels Thermographie siehe 2.3.5	Maschinen- und Anlagenschutz (Löschung) siehe 2.3.6	Maschinen- und Anlagenüberwachung (Detektion) siehe 2.3.6	Trockenlöscheinrichtungen mit Anspeisung durch Betrieb oder Feuerweh
Betriebsanlagenstandort allgemein	kein	x	x			x	x							
	nieder	x	x			x	x							
	mittel	x	x			x	x							
	hoch	x	x			x	x							
Technikräume (Heizraum, elektr. Betriebsräume, Steuerwarte, Kompressorraum) siehe 3.1.1, 3.1.6	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Filteranlagen, siehe 3.1.7	kein													x
	nieder													x
	mittel													x
	hoch													x
Produktionsgebäude, siehe 3.2.	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Aufbereitungsanlagen innerhalb/außerhalb von Baulichkeiten, siehe 3.2.3	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Zerkleinerungsanlagen/Shredder inkl. Austragsband, siehe 3.2.2	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lagerbereiche innerhalb von Baulichkeiten ≤ 1.200 m² (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lagerbereiche innerhalb von Baulichkeiten > 1.200 m² (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lagerungen unter Flugdach (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Freilagerbereiche, siehe 3.3.3, (bei Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material kann die Brandmeldeanlage entfallen, wenn eigener Brandabschnitt)	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lager brennbarer flüssiger Abfälle und Betriebsmittel, siehe 3.3.4, (Löschanlage kann entfallen, wenn < 5m³ brennbare Flüssigkeit und Trockeneinspeisung vorhanden)	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lager für Altbatterien (ausgenommen Lager mit insgesamt < 100 kg Batterien)	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Lager von Gasen in Flaschen	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Werkstatt siehe 3.5	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													
Betriebstankstelle	kein													
	nieder													
	mittel													
	hoch													

x = erforderlich

(1) = Ersatzmaßnahme, sofern kein eigener Brandabschnitt

(2) = kann entfallen, wenn ≤ 1.200 m² und eigener Brandabschnitt

* Lagerflächen von insgesamt < 100 m² mit brennbaren Materialien müssen bei der Einstufung nicht berücksichtigt werden

Alle Verweise beziehen sich auf das Dokument "Brandschutz für Abfall- und Ressourcenwirtschaftsbetriebe - Leitlinie"

Abbildung 105 Maßnahmenmatrix Teil 1 Quelle: VOEB

Maßnahmenmatrix							
Risikobereiche	Maßnahmen	Abwehrender Brandschutz			Sonstige Maßnahmen	BCM	Infrastruktur
		Brandrisikoklasse bezogen auf die Abfallart	Betriebslöschtrupp siehe 2.4.2 (kann für Standorte <30 Mitarbeiter entfallen)	Wandhydranten siehe 2.4.5			
Betriebsanlagenstandort allgemein	kein			x	x	x	x
	nieder			x	x	x	x
	mittel			x	x	x	x
	hoch	x		x	x	x	x
Technikräume (Heizraum, elektr. Betriebsräume, Steuerwarte, Kompressorraum) siehe 3.1.1, 3.1.6	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Filteranlagen, siehe 3.1.7	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Produktionsgebäude, siehe 3.2.	kein						
	nieder						
	mittel		x				
	hoch		x				
Aufbereitungsanlagen innerhalb/außerhalb von Baulichkeiten, siehe 3.2.3	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Zerkleinerungsanlagen/Shredder inkl. Austragsband, siehe 3.2.2	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Lagerbereiche innerhalb von Baulichkeiten ≤ 1.200 m² (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein						
	nieder						
	mittel		x				
	hoch		x				
Lagerbereiche innerhalb von Baulichkeiten > 1.200 m² (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein						
	nieder						
	mittel		x				
	hoch		x				
Lagerungen unter Flugdach (ausgenommen Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material)*, siehe 3.3.2	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Freilagerbereiche, siehe 3.3.3, (bei Lager < 100 m² belegter Fläche mit brennbarem Material kann die Brandmeldeanlage entfallen, wenn eigener Brandabschnitt)	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Lager brennbarer flüssiger Abfälle und Betriebsmittel, siehe 3.3.4, (Löschanlage kann entfallen, wenn < 5m³ brennbare Flüssigkeit und Trockeneinspeisung vorhanden)					x		
Lager für Altbatterien (ausgenommen Lager mit insgesamt < 100 kg Batterien)	siehe 3.3.5						
Lager von Gasen in Flaschen	siehe 3.3.6						
Werkstatt siehe 3.5	kein						
	nieder						
	mittel						
	hoch						
Betriebstankstelle	siehe 3.4						

x = erforderlich
 (1) = Ersatzmaßnahme, sofern kein eigener Brandabschnitt
 (2) = kann entfallen, wenn ≤ 1.200 m² und eigener Brandabschnitt

* Lagerflächen von insgesamt < 100 m² mit brennbaren Materialien müssen bei der Einstufung nicht berücksichtigt werden
 Alle Verweise beziehen sich auf das Dokument "Brandschutz für Abfall- und Ressourcenwirtschaftsbetriebe - Leitlinie"

Abbildung 106 Maßnahmenmatrix Teil 2 Quelle: VOEB

Versuchsergebnisse

Neigung 0° ohne Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	38	33	34	27	34	35	24	20	19	18	19	16
1	38	33	34	27	34	35	24	20	19	18	19	16
2	38	33	34	27	34	35	25	20	19	18	19	16
3	38	33	34	27	34	36	25	20	19	19	19	16
4	39	34	34	28	35	36	25	20	19	19	19	16
5	39	34	34	28	35	35	25	20	19	19	19	16
6	39	34	35	29	35	35	25	20	19	19	19	16
7	40	34	35	29	35	35	25	20	19	19	19	16
8	40	34	34	29	35	34	25	20	19	19	19	16
9	41	34	34	29	36	34	25	20	19	19	19	16
10	41	34	34	28	36	33	25	20	19	19	19	16
11	41	34	34	28	36	33	25	20	19	19	19	16
12	42	34	34	28	36	32	25	20	19	19	19	16
13	42	34	34	28	36	32	25	20	19	19	19	16
14	42	34	34	28	36	31	25	20	19	19	19	16
15	43	34	34	28	36	31	25	20	19	19	20	16
16	43	35	35	28	36	31	25	20	19	19	20	16
17	43	35	35	28	37	31	25	20	19	19	20	16
18	44	35	35	29	37	31	25	20	19	19	20	16
19	44	35	35	29	37	31	25	20	19	19	20	16
20	44	35	36	30	37	32	25	20	19	19	20	16
21	44	36	36	30	37	32	25	20	19	19	20	16
22	45	36	36	30	38	32	25	20	19	19	20	16
23	45	36	37	30	38	32	25	20	19	19	20	16
24	45	36	37	30	38	32	25	20	19	19	20	16
25	45	36	37	30	38	32	25	20	19	19	20	16
26	47	37	37	31	39	33	25	20	19	19	20	16
27	50	36	38	31	39	33	25	20	19	19	20	16
28	66	36	37	31	39	33	25	20	19	19	19	16
29	90	36	37	30	39	34	25	20	19	19	19	15
30	129	35	37	30	39	34	25	20	19	19	19	15
31	161	35	37	30	39	34	25	20	19	19	19	15
32	205	35	37	30	40	35	25	20	19	19	19	15
33	228	35	37	30	40	35	25	20	19	19	19	15
34	259	34	37	30	40	35	25	20	19	18	19	15
35	279	34	37	30	40	35	25	20	19	18	19	15
36	301	34	36	30	40	36	25	20	19	18	19	15
37	311	34	36	30	40	36	25	19	19	18	19	15
38	320	34	36	30	40	36	26	19	19	18	19	15
39	325	34	36	30	40	36	26	19	19	18	19	15
40	329	34	36	30	40	36	25	19	19	18	19	16
41	331	34	36	30	40	36	25	19	19	18	19	16
42	332	33	36	30	40	36	25	19	19	18	19	16
43	333	33	36	30	40	36	25	19	19	18	19	16
44	335	33	36	30	40	37	25	19	19	18	19	16
45	337	33	36	30	40	36	25	19	19	18	19	16
46	341	33	36	30	40	37	25	19	19	18	19	16
47	344	33	36	30	40	37	25	19	19	18	19	16
48	347	33	36	30	40	37	25	19	19	18	19	16
49	349	34	35	29	40	37	24	19	19	18	19	16
50	352	34	35	29	40	37	24	19	19	18	19	16
51	357	34	35	29	40	37	24	19	19	18	19	16
52	365	34	35	29	39	37	24	19	19	18	19	16
53	371	34	35	29	39	37	24	18	19	18	19	16
54	379	35	34	29	39	37	24	19	19	18	19	16
55	382	36	34	28	39	37	24	19	19	18	19	16
56	384	37	34	28	39	37	24	19	19	18	18	16
57	385	38	34	28	39	37	24	19	19	18	18	16
58	389	40	34	28	39	38	24	19	19	18	18	16
59	390	43	34	28	39	38	24	19	19	18	18	16
60	391	89	34	29	39	38	24	19	19	18	18	16
61	390	151	34	29	39	38	24	19	19	18	18	16
62	388	237	34	29	38	38	24	19	19	18	18	16
63	385	281	34	29	38	38	24	19	19	18	18	16
64	380	348	34	29	38	38	23	19	19	18	18	16
65	375	384	34	29	38	38	23	19	19	18	18	16
66	369	431	34	29	38	38	23	19	19	18	18	16
67	367	448	34	28	38	38	23	19	19	18	18	16
68	363	468	34	28	38	38	23	19	19	18	18	16
69	361	479	33	28	38	38	23	19	19	18	19	16
70	358	506	33	27	38	38	23	19	19	18	19	16
71	357	521	33	27	38	38	23	19	19	18	19	16
72	357	546	33	27	38	39	23	19	19	18	19	15
73	357	560	33	27	37	39	23	19	19	18	19	15
74	356	554	33	27	37	39	23	19	19	18	19	16
75	356	544	32	26	37	39	23	19	19	18	19	15
76	355	525	32	26	37	39	23	19	19	18	19	15
77	352	513	32	26	37	39	23	19	19	18	19	15
78	346	496	32	26	37	39	23	19	18	18	19	15
79	341	490	32	26	37	39	23	19	18	18	19	15
80	335	474	32	26	37	39	24	19	19	18	19	15
81	331	462	32	26	38	39	24	19	19	18	19	15
82	325	453	32	26	38	39	24	19	19	18	19	16
83	322	444	32	26	38	39	24	19	19	18	20	16
84	316	426	32	26	38	39	24	19	19	18	20	16
85	313	419	32	26	38	39	24	19	19	18	20	16
86	307	408	32	26	38	39	24	19	19	18	20	16
87	304	400	33	27	38	39	24	19	19	18	20	16
88	299	382	34	27	38	39	24	19	19	18	20	16
89	297	373	35	27	38	39	24	19	19	18	20	16
90	293	361	38	26	38	39	24	19	19	18	20	16
91	291	355	40	26	38	39	24	20	19	18	20	16
92	289	347	43	26	38	39	24	20	19	18	20	16
93	288	340	46	26	38	39	24	20	19	19	20	16
94	287	331	52	26	38	40	24	20	19	19	20	16

95	287	325	56	26	38	40	24	20	19	19	20	16
96	288	316	66	26	38	40	24	20	19	19	21	16
97	289	311	79	26	38	40	25	20	19	19	21	16
98	291	303	225	27	38	40	25	20	19	19	21	16
99	292	298	304	27	38	40	25	20	19	19	21	16
100	292	291	357	27	38	40	25	20	19	19	21	16
101	292	286	388	27	38	40	25	20	19	19	21	16
102	290	279	395	27	38	40	25	20	19	19	21	16
103	288	275	396	27	38	40	25	20	19	19	21	16
104	285	267	414	27	38	40	25	20	19	19	21	16
105	283	262	426	27	38	40	25	21	19	19	21	16
106	281	256	431	27	38	40	25	21	19	19	21	16
107	280	251	427	27	38	40	25	21	19	19	21	16
108	276	245	421	27	37	40	25	21	19	19	21	16
109	274	240	415	27	37	40	25	21	19	19	21	16
110	269	233	404	27	37	40	25	21	19	19	21	16
111	266	228	398	28	37	40	24	21	19	19	21	16
112	262	222	382	30	37	41	24	21	19	19	21	16
113	259	219	371	31	37	41	25	21	19	19	21	16
114	255	215	355	36	37	41	25	21	19	19	21	16
115	252	212	345	40	37	41	25	21	19	19	21	16
116	248	208	329	52	37	40	25	21	19	19	21	16
117	246	205	320	65	37	40	25	21	19	19	21	16
118	243	201	308	137	37	40	25	21	19	19	21	16
119	240	199	301	182	37	40	25	21	19	19	21	16
120	237	195	292	236	37	40	25	21	19	19	21	16
121	236	193	286	266	37	39	25	21	19	19	21	16
122	234	189	276	312	37	39	25	21	19	19	21	16
123	234	186	269	334	37	39	25	21	19	19	21	16
124	236	183	258	353	37	38	25	20	19	19	21	16
125	238	181	252	362	37	38	25	20	19	19	21	17
126	237	178	245	373	38	38	25	21	19	19	21	17
127	237	175	241	378	38	38	25	21	19	19	22	17
128	236	172	234	382	38	37	25	21	19	19	22	17
129	235	170	230	386	38	37	26	21	19	19	22	17
130	233	167	224	391	38	37	26	21	19	19	22	17
131	232	165	220	393	38	37	26	21	19	19	22	17
132	230	163	213	395	38	37	26	21	20	19	22	17
133	228	161	209	406	39	37	26	21	20	19	22	17
134	225	158	202	430	39	37	26	21	20	19	22	17
135	223	156	198	438	40	38	26	21	20	19	22	17
136	221	154	193	442	42	37	26	22	20	19	22	17
137	220	152	190	442	42	37	25	22	20	19	22	17
138	218	150	182	437	41	37	25	22	20	19	22	17
139	216	148	176	433	41	37	25	22	20	19	21	17
140	214	144	169	426	61	37	24	22	20	19	21	17
141	213	143	164	410	58	37	24	21	20	19	21	17
142	209	140	158	365	51	37	23	21	20	19	21	16
143	206	138	154	343	48	37	23	21	20	19	21	16
144	203	135	149	311	44	37	23	21	20	19	21	16
145	200	133	145	294	42	37	23	21	20	19	21	16
146	196	131	141	267	40	37	23	21	20	19	21	16
147	194	130	138	253	39	37	23	21	20	19	21	16
148	193	128	134	231	37	37	23	22	20	19	21	16
149	192	127	132	219	36	37	23	22	20	19	21	16
150	192	125	127	196	34	37	23	22	20	19	21	16
151	191	124	123	183	34	37	23	22	20	19	21	16
152	191	122	116	164	32	37	23	22	20	19	21	16
153	190	121	113	154	31	37	23	22	19	18	21	16
154	190	119	109	144	31	37	23	22	19	18	21	16
155	190	118	107	136	30	37	23	22	19	18	21	16
156	189	117	103	124	29	37	23	22	19	18	21	16
157	187	116	101	117	28	37	23	22	19	18	21	16
158	186	114	98	111	28	37	23	22	19	18	21	16
159	187	113	97	106	27	37	23	22	19	18	21	16
160	188	111	92	99	27	37	23	22	19	18	21	16
161	188	110	89	95	26	37	23	22	19	18	21	16
162	189	108	85	90	26	37	23	21	19	18	21	16
163	190	107	83	87	26	36	23	21	19	18	21	16
164	190	106	79	83	25	36	23	21	19	18	21	16
165	189	105	78	79	25	36	23	21	19	18	21	16
166	186	104	76	75	25	36	23	21	19	19	21	16
167	186	104	75	72	25	36	23	21	19	19	21	16
168	186	103	72	69	25	36	23	21	19	19	21	16
169	185	103	70	67	24	36	23	21	19	19	22	16
170	183	102	68	65	24	36	23	21	18	19	22	16
171	180	101	66	63	24	36	23	22	18	19	22	16
172	176	100	64	59	23	36	23	21	18	19	22	16
173	173	100	62	57	23	36	23	21	18	19	22	16
174	169	99	61	53	23	36	23	21	18	19	22	16
175	166	98	60	52	23	36	23	21	18	19	22	16
176	161	97	58	49	22	36	23	21	18	19	22	16
177	157	97	57	47	22	36	23	21	18	18	22	16
178	153	96	55	44	22	36	23	21	18	18	22	16

Neigung 20° ohne Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	20	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	18
1	20	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	18
2	20	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	18
3	21	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	18
4	22	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	18
5	24	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
6	31	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
7	37	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
8	71	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
9	98	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
10	146	19	19	19	19	19	20	18	18	17	17	19
11	173	19	19	19	19	19	20	18	18	18	17	19
12	221	19	19	19	19	19	20	18	18	18	17	19
13	248	19	19	19	19	19	20	18	18	18	17	19
14	288	19	19	19	19	19	20	18	18	18	17	19
15	312	19	19	19	19	19	20	18	18	18	17	19
16	343	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
17	366	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
18	379	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
19	384	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
20	403	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
21	416	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
22	433	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
23	439	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
24	446	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
25	456	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
26	473	20	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
27	482	21	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
28	491	24	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
29	494	31	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
30	494	50	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
31	490	62	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
32	477	69	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
33	468	71	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
34	454	78	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
35	445	84	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
36	430	100	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
37	422	110	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
38	409	124	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
39	400	133	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
40	386	146	19	19	19	19	20	18	18	18	18	19
41	377	155	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
42	363	168	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
43	355	177	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
44	344	191	19	19	19	19	20	18	19	18	18	19
45	337	200	20	19	19	18	20	18	19	18	18	19
46	326	213	20	19	19	19	20	18	19	18	18	19
47	319	221	20	19	19	18	20	18	19	18	18	19
48	310	233	20	19	18	19	20	18	19	18	18	19
49	304	240	20	19	18	18	20	18	19	18	18	19
50	293	250	21	19	19	18	20	18	19	18	18	19
51	288	256	21	19	19	18	20	18	18	18	18	19
52	279	264	22	19	18	18	20	18	19	18	18	19
53	274	269	22	19	18	18	20	18	19	18	18	19
54	266	275	24	18	18	18	20	18	19	18	18	19
55	261	279	25	18	18	18	20	18	19	18	18	19
56	253	284	27	18	18	18	20	18	19	18	18	19
57	248	287	29	18	18	18	20	18	19	18	18	19
58	241	292	34	18	18	18	20	18	19	18	18	19
59	236	295	40	18	18	18	20	18	19	18	18	19
60	228	298	54	18	18	18	20	18	19	18	18	19
61	223	301	69	19	19	18	20	18	19	18	18	19
62	217	303	90	19	18	18	20	18	19	18	18	20
63	213	305	108	19	19	18	20	18	19	18	18	20
64	206	307	143	20	19	18	20	18	19	18	18	20
65	203	308	165	21	19	18	20	18	19	18	18	20
66	197	309	193	23	19	18	20	18	19	18	18	20
67	193	310	209	25	19	18	20	18	19	18	18	20
68	188	310	233	31	19	18	20	18	19	18	18	20
69	185	309	249	36	19	18	20	18	19	18	18	20
70	180	307	280	71	19	18	20	18	19	18	18	20
71	176	305	299	121	19	18	20	18	19	18	18	20
72	170	303	329	202	19	18	20	18	19	18	18	20
73	168	301	347	245	19	18	20	18	19	18	18	20
74	163	299	374	287	19	18	20	18	19	18	18	20
75	158	298	395	301	19	18	20	18	19	18	18	20
76	151	296	412	312	19	18	20	18	19	18	18	20
77	148	295	423	318	19	18	20	18	19	18	18	20
78	142	294	431	325	19	18	20	18	19	18	18	20
79	139	294	437	330	19	18	20	18	19	18	18	20
80	135	293	453	344	19	18	20	18	19	18	18	20
81	133	293	465	354	19	18	20	18	19	18	19	20
82	130	294	467	364	19	18	20	18	19	18	19	20
83	129	301	467	371	19	19	20	18	19	18	19	20
84	127	313	464	380	19	19	20	18	19	18	19	20
85	125	317	463	386	19	19	20	18	19	18	19	20
86	123	319	463	402	19	19	20	18	19	18	19	20
87	122	319	464	418	19	19	20	18	19	18	19	20
88	120	318	463	436	20	19	20	18	19	18	19	20
89	118	317	461	448	20	19	20	18	19	18	19	20
90	116	316	459	464	20	19	20	18	19	18	19	20
91	114	315	460	470	20	19	20	18	19	18	19	20
92	112	313	457	476	21	19	20	18	19	18	19	20
93	110	313	456	481	22	19	20	18	19	18	19	20
94	108	312	458	489	24	19	20	18	19	19	19	20
95	107	311	458	493	26	19	20	18	19	19	19	20
96	105	310	455	498	32	19	20	18	19	19	19	20
97	105	309	452	500	40	19	20	18	19	19	19	20
98	103	308	450	502	52	19	20	18	19	19	19	20

99	102	307	449	502	63	19	20	18	19	19	19	20
100	100	306	450	497	120	19	20	18	19	19	19	20
101	99	305	449	494	176	19	20	18	19	19	19	20
102	97	304	442	493	232	20	20	18	19	19	19	20
103	97	303	435	493	265	20	20	19	19	19	19	20
104	95	301	422	492	302	21	20	19	19	19	19	20
105	94	299	414	490	310	22	20	19	19	19	19	20
106	92	297	401	486	321	22	20	19	19	19	19	20
107	91	295	393	481	329	23	20	19	19	19	19	20
108	88	294	380	473	340	25	20	19	19	19	19	20
109	87	294	372	466	346	26	20	19	19	19	19	20
110	84	296	361	455	350	28	20	19	19	19	19	20
111	83	298	353	448	354	31	20	19	19	19	19	20
112	81	301	343	436	356	35	20	19	19	19	19	21
113	80	302	337	428	355	38	20	19	19	19	19	21
114	78	303	327	417	350	44	20	19	19	19	19	21
115	78	303	321	410	342	49	20	19	19	19	19	21
116	77	304	312	398	334	63	20	19	19	19	19	21
117	76	304	307	391	328	80	20	19	19	19	19	21
118	75	304	298	380	316	135	20	19	19	19	19	21
119	74	304	293	373	307	191	20	19	19	19	19	20
120	74	304	285	363	294	252	20	19	19	19	19	20
121	73	305	281	356	285	255	21	19	19	19	19	20
122	72	307	275	348	274	249	21	19	19	19	19	20
123	71	309	270	342	267	249	21	19	19	19	19	20
124	69	313	263	334	257	247	21	19	19	19	19	20
125	68	316	259	329	250	246	21	19	19	19	19	20
126	66	317	254	322	241	242	21	19	19	19	19	20
127	66	317	250	317	236	239	22	19	19	19	19	20
128	64	315	245	311	228	237	22	19	19	19	19	20
129	63	316	241	307	223	235	22	19	19	19	19	20
130	62	320	236	301	215	232	23	19	19	19	19	20
131	62	324	232	297	211	228	24	19	19	19	19	20
132	62	328	227	293	203	223	27	19	19	19	19	20
133	61	329	224	290	198	220	30	19	19	19	19	20
134	61	330	219	286	191	215	51	19	19	19	19	20
135	60	330	216	284	187	212	69	19	19	19	19	20
136	58	329	211	281	182	204	85	20	19	19	19	20
137	58	326	208	280	179	199	100	20	19	19	19	20
138	57	318	204	279	173	190	125	20	19	19	19	20
139	56	313	201	278	170	185	142	21	19	19	19	20
140	55	306	197	275	164	177	173	22	19	19	19	20
141	54	302	194	270	161	171	196	22	19	19	19	20
142	53	296	190	265	158	165	228	23	19	19	19	20
143	52	292	187	263	156	161	251	23	19	19	19	20
144	51	286	181	258	152	154	283	26	19	19	19	20
145	51	282	178	255	149	150	300	32	19	19	19	20
146	50	276	174	250	145	144	321	66	19	19	19	20
147	49	272	172	248	142	141	334	72	19	19	19	20
148	49	267	170	247	138	138	358	100	19	19	19	20
149	49	264	167	247	136	135	368	99	19	19	19	20
150	49	259	164	247	133	129	391	116	19	19	19	20
151	48	255	163	244	131	126	411	116	19	19	19	20
152	48	250	160	240	129	120	427	108	19	19	19	20
153	47	247	159	239	127	115	427	101	19	19	19	20
154	46	241	156	239	124	109	426	91	19	19	19	20
155	45	238	154	239	122	107	443	86	19	18	19	20
156	45	233	151	240	119	103	467	80	19	18	19	20
157	45	230	149	239	118	101	466	76	19	18	19	20
158	45	226	146	237	116	98	479	72	19	18	19	20
159	45	223	144	235	115	96	480	69	19	18	19	20
160	45	220	143	217	113	92	471	66	19	18	19	20
161	45	218	142	205	112	90	460	64	19	18	19	20
162	45	214	140	189	110	87	444	62	19	18	19	20
163	45	213	139	179	109	86	434	61	19	18	19	20
164	45	210	137	166	108	83	420	59	19	18	19	20
165	45	208	136	159	107	81	410	57	19	18	19	20
166	45	205	134	151	105	78	395	55	19	18	19	20
167	45	203	133	145	104	76	386	53	19	18	19	20
168	45	200	131	138	103	75	373	50	19	18	19	20
169	45	198	130	135	102	74	365	48	19	18	18	20
170	44	195	129	128	101	72	352	47	19	18	18	20
171	43	194	127	123	100	72	344	46	19	18	18	20
172	43	191	125	116	99	70	333	44	19	18	18	20
173	43	190	123	111	99	69	323	43	19	18	18	20
174	43	188	120	103	98	66	310	40	19	18	18	20
175	43	186	119	99	97	65	305	39	19	18	18	20
176	43	184	117	94	95	62	303	37	19	18	18	20
177	43	183	115	91	94	61	321	36	19	18	18	20
178	42	181	113	85	93	60	343	34	19	18	18	20
179	42	180	112	81	92	59	352	33	19	18	18	20
180	41	178	110	77	91	58	349	32	19	18	18	20
181	41	176	108	75	90	57	344	32	19	18	18	20
182	41	175	106	73	89	56	333	31	19	18	18	20
183	41	174	104	71	88	55	328	30	19	18	18	20
184	41	173	102	69	87	55	319	29	19	18	18	19
185	40	173	100	68	86	54	313	28	19	18	18	19
186	41	172	98	67	85	54	302	27	19	18	18	19
187	40	171	97	66	85	54	296	27	19	18	18	19
188	40	171	95	65	84	53	290	27	18	18	18	19
189	40	170	94	64	83	53	286	26	18	18	18	19
190	39	169	92	62	82	52	280	26	19	18	18	19
191	39	168	91	61	82	51	275	26	19	18	18	19
192	39	168	89	60	81	51	268	25	19	18	18	19
193	39	167	87	59	81	50	262	25	19	18	18	19
194	40	167	86	57	80	49	252	24	18	18	18	19
195	39	166	85	56	79	47	247	24	18	18	18	19
196	40	164	83	53	78	46	242	23	18	18	18	19
197	39	163	83	52	77	45	237	23	18	18	18	19
198	39	161	82	50	76	44	233	23	18	17	18	19
199	39	160	81	48	76	44	230	22	18	17	18	19
200	39	158	80	47	75	42	231	22	18	17	18	19
201	39	156	79	46	74	41	234	22	18	17	18	19

202	39	155	79	44	73	40	234	22	18	17	17	19
203	40	154	79	43	72	40	233	22	18	17	17	19
204	40	153	78	42	71	39	229	21	18	17	17	19
205	40	152	78	42	70	39	226	21	18	17	17	19
206	40	150	76	41	69	38	222	21	18	17	17	19
207	40	149	75	40	69	37	220	21	18	17	17	19
208	40	148	73	39	68	37	216	20	18	17	17	19
209	40	147	72	38	67	36	214	20	18	17	17	19
210	40	146	71	37	67	36	210	20	18	17	17	19
211	40	145	71	37	66	36	206	20	18	17	17	19
212	41	144	70	37	66	36	201	20	18	17	17	19
213	41	143	70	36	66	36	197	20	18	17	17	19
214	41	142	70	36	65	36	192	20	18	17	17	19
215	41	141	70	35	65	36	189	20	18	17	17	19
216	41	140	70	34	65	35	185	19	18	17	17	19
217	41	139	70	34	65	35	182	19	18	17	17	19
218	42	138	70	33	65	35	178	19	18	17	17	19
219	42	137	71	33	65	35	175	19	18	17	17	19
220	42	136	71	32	64	34	171	19	18	17	17	19
221	42	136	71	32	64	34	169	19	18	17	17	19
222	42	134	71	32	64	34	166	19	18	17	17	19
223	42	134	71	32	64	34	164	19	18	17	17	19
224	42	132	71	32	64	33	161	19	18	17	17	19
225	42	132	71	32	63	33	159	19	18	17	17	19
226	42	130	72	32	63	33	156	18	18	17	17	19
227	42	129	72	31	63	33	154	18	18	17	17	19
228	42	128	72	31	63	33	152	18	18	17	17	19
229	42	127	72	31	63	33	150	18	18	17	17	19
230	42	126	72	31	62	33	147	18	18	17	17	19
231	42	125	72	31	62	32	146	18	18	17	17	19
232	42	123	72	30	62	32	143	18	18	17	17	19
233	42	123	72	30	62	31	142	18	18	17	17	19
234	42	121	72	30	62	31	140	18	18	17	17	19
235	41	120	72	30	61	31	138	18	18	17	17	19
236	41	119	71	30	61	31	136	18	18	17	17	19
237	41	118	71	30	61	31	134	18	18	17	17	19
238	41	117	71	29	61	31	132	18	18	17	17	19
239	40	116	70	29	61	31	130	18	18	17	17	19
240	40	115	70	29	60	32	128	18	18	17	17	20
241	40	115	70	29	60	32	127	18	18	17	17	20
242	40	114	69	29	60	32	124	18	18	17	18	20
243	40	113	69	29	60	32	123	18	18	17	18	20
244	40	113	68	29	60	32	121	18	18	18	18	20
245	39	112	68	29	60	32	120	18	18	18	18	20
246	39	112	67	29	60	31	118	18	18	18	18	20
247	39	111	67	29	60	31	117	18	18	18	18	20
248	39	110	66	28	60	31	116	18	18	18	18	20
249	39	109	66	28	60	31	115	18	18	18	18	20
250	39	108	65	28	60	31	113	18	18	18	18	20
251	38	108	65	28	60	31	112	19	18	18	18	20
252	38	107	65	28	60	31	111	19	18	18	18	20
253	38	106	65	28	59	30	111	19	18	18	18	20
254	38	105	64	28	59	30	110	19	18	18	18	20
255	37	105	64	28	59	30	109	19	18	18	18	20
256	38	104	64	28	59	30	108	19	18	18	18	20
257	37	103	63	28	59	30	108	19	18	18	18	20
258	37	103	63	28	59	30	108	19	18	18	18	20
259	37	102	62	28	59	30	108	19	19	18	18	20
260	36	102	62	28	59	30	108	19	19	18	18	20
261	36	101	62	28	59	30	108	20	19	18	18	20
262	36	101	61	29	59	30	108	20	19	18	18	20
263	35	100	61	29	59	30	108	20	19	18	18	20
264	35	100	61	29	59	30	109	20	19	18	18	20
265	35	100	60	29	59	30	109	20	19	18	18	20
266	35	99	60	29	58	31	109	20	19	18	18	20
267	34	98	60	28	58	31	109	20	19	18	18	20
268	34	98	60	28	58	31	108	20	19	18	18	20
269	34	97	60	28	58	30	108	20	19	18	18	20

Neigung 35° ohne Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	27	28	31	29	29	27	24	20	18	18	18	19
1	27	28	31	29	29	27	24	20	18	18	18	19
2	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
3	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
4	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
5	27	28	32	29	29	28	24	20	18	18	18	19
6	27	28	32	29	29	28	25	20	18	18	18	19
7	27	29	31	29	29	28	25	20	18	18	18	19
8	27	28	31	29	30	27	25	20	19	18	18	19
9	27	28	31	29	30	27	25	20	19	18	18	19
10	27	28	31	29	30	28	25	20	18	18	18	19
11	27	28	31	29	30	28	25	20	19	18	18	19
12	27	29	31	29	31	28	25	20	19	18	18	19
13	27	29	30	29	31	28	25	20	18	18	18	19
14	27	29	30	29	31	28	25	20	19	18	18	19
15	27	29	30	29	31	28	25	20	19	18	18	19
16	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
17	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
18	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
19	27	29	29	28	31	27	24	20	19	18	18	19
20	27	29	29	28	31	28	24	20	19	18	18	19
21	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
22	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
23	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
24	27	29	29	28	32	27	24	20	19	18	18	19
25	27	29	29	28	32	27	24	20	18	18	18	19
26	27	29	29	28	32	27	24	19	19	18	18	19
27	27	29	29	28	32	27	24	19	19	18	18	19
28	27	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
29	28	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
30	28	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
31	32	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
32	42	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
33	57	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
34	82	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
35	111	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
36	154	29	28	28	33	28	25	20	19	19	19	19
37	182	29	28	28	33	28	25	20	19	18	19	19
38	220	29	28	28	33	27	25	20	19	19	19	19
39	244	29	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
40	269	29	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
41	281	30	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
42	296	30	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
43	304	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
44	313	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
45	319	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
46	329	31	27	27	34	26	26	22	19	19	19	20
47	336	32	27	27	34	26	26	22	19	19	19	20
48	347	35	28	27	34	26	26	22	19	19	19	20
49	355	45	28	28	34	26	26	22	19	19	19	20
50	367	86	30	28	34	26	26	22	19	19	19	20
51	375	108	31	28	34	27	26	22	19	19	19	20
52	388	143	32	28	34	27	26	22	19	19	19	20
53	396	208	34	28	34	27	26	22	19	19	19	20
54	409	238	40	28	34	27	26	22	19	19	19	20
55	419	263	47	28	34	27	26	22	19	19	19	20
56	433	300	61	28	33	27	26	22	19	19	19	20
57	441	325	67	29	33	27	27	22	19	19	19	20
58	452	357	72	30	33	27	28	23	19	19	19	20
59	458	376	75	32	33	28	28	23	19	19	19	20
60	466	403	78	36	34	28	27	23	19	19	19	19
61	476	418	80	38	34	28	27	23	19	19	19	19
62	493	423	89	45	34	28	27	23	19	19	19	19
63	501	420	100	67	34	28	27	23	19	19	19	19
64	513	422	126	134	35	28	29	24	19	19	19	19
65	518	408	146	161	36	28	29	25	19	19	19	19
66	525	394	177	178	37	28	29	25	19	19	19	19
67	530	377	195	196	37	28	28	25	19	19	19	19
68	536	349	219	212	38	28	28	25	19	18	19	19
69	540	330	235	223	39	28	28	25	19	18	19	19
70	545	309	255	245	40	28	28	25	19	18	19	19
71	549	298	270	257	43	28	28	25	19	18	19	19
72	552	287	298	274	72	28	28	25	19	18	19	19
73	555	279	321	285	128	28	28	25	19	18	19	19
74	554	268	354	300	185	28	29	25	19	18	19	19
75	551	259	375	312	220	29	29	25	19	18	19	19
76	544	249	402	330	252	31	31	26	19	18	19	19
77	539	244	412	346	278	35	31	26	19	18	19	19
78	534	236	431	366	315	41	32	26	19	18	19	19
79	530	232	441	378	340	50	32	27	19	18	19	19
80	524	226	467	394	377	60	37	28	19	19	19	19
81	519	222	493	403	401	74	40	30	19	19	19	19
82	512	214	524	418	454	103	40	29	19	19	19	19
83	509	208	540	427	475	149	39	28	19	19	19	19
84	510	197	564	439	519	202	38	27	19	19	19	19
85	515	187	577	445	517	222	41	27	19	19	19	19
86	524	176	587	454	496	243	51	28	19	18	19	19
87	527	171	587	459	494	252	51	29	19	18	19	19
88	532	164	586	464	477	261	48	28	19	18	19	19
89	533	159	584	468	463	268	46	28	19	18	19	19
90	533	155	580	475	450	289	44	28	19	18	19	19
91	530	153	577	480	442	298	43	27	19	18	19	19
92	524	149	569	484	425	322	42	27	19	18	19	19
93	520	146	560	485	418	337	41	27	19	18	19	19
94	516	140	544	486	394	365	39	27	19	18	19	19
95	515	138	532	488	384	386	41	27	19	18	19	19
96	521	135	523	496	363	415	40	27	19	18	19	19
97	525	133	521	498	348	437	40	27	19	18	19	19
98	532	137	506	504	326	473	38	26	19	18	18	19

99	533	138	495	508	315	481	37	26	19	18	18	19
100	533	138	466	509	301	482	36	26	18	18	18	19
101	531	137	447	510	288	484	36	26	18	18	18	19
102	526	135	422	506	271	481	35	26	18	18	18	19
103	522	134	407	503	262	478	35	26	18	18	18	19
104	515	132	389	495	250	470	34	25	18	18	18	19
105	510	130	374	491	242	443	34	26	19	18	18	19
106	501	129	355	446	227	409	33	26	18	18	18	19
107	495	128	345	421	218	381	33	25	18	18	18	19
108	486	127	322	386	209	349	32	25	18	18	18	19
109	479	127	306	365	201	329	32	25	18	18	18	19
110	465	126	284	334	191	298	33	26	18	18	18	19
111	454	124	274	315	183	279	32	26	18	18	18	19
112	436	122	263	290	175	256	31	26	18	18	18	19
113	423	121	255	275	169	245	31	25	18	18	18	19
114	404	119	247	253	161	229	30	25	18	18	18	19
115	391	117	241	242	155	218	30	25	18	18	18	19
116	373	115	233	227	148	204	30	24	18	18	18	19
117	362	114	227	220	143	195	29	24	18	18	18	19
118	347	112	220	209	137	185	29	24	19	18	19	19
119	337	111	216	201	134	179	28	24	19	18	19	19
120	324	109	209	190	130	168	28	24	19	18	19	19
121	316	108	206	184	128	160	28	24	19	18	19	19
122	305	106	198	176	124	151	28	23	19	18	19	19
123	299	105	194	171	121	146	28	23	19	18	19	19

Neigung 0° mit Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	55	38	46	30	32	28	23	20	28	23	25	24
1	55	38	46	30	32	28	23	20	28	24	25	24
2	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
3	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
4	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
5	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
6	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
7	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
8	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
9	55	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	24
10	55	38	46	30	32	28	24	20	29	24	25	23
11	55	38	46	30	32	28	24	20	29	24	25	23
12	55	38	46	30	32	28	24	20	29	24	25	23
13	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
14	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
15	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
16	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
17	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
18	55	38	46	30	32	28	24	20	28	23	25	23
19	54	38	46	30	32	28	24	20	28	24	25	23
20	54	38	46	30	32	28	24	20	29	24	25	23
21	54	38	46	30	32	28	24	20	29	24	25	23
22	54	38	46	30	32	28	24	20	29	24	26	23
23	54	38	46	30	32	28	24	20	29	25	26	24
24	54	38	46	30	32	28	24	20	29	25	26	24
25	54	38	46	30	32	28	24	20	29	25	26	24
26	54	38	46	31	32	28	24	20	29	25	26	25
27	54	37	46	31	32	28	24	20	29	25	26	25
28	54	37	46	31	32	28	23	20	29	26	27	25
29	54	37	46	31	32	28	23	20	29	26	27	25
30	54	37	46	31	32	28	23	20	30	26	27	26
31	54	37	46	31	32	28	23	20	31	26	27	26
32	54	37	46	31	32	28	23	20	32	26	27	26
33	53	37	46	31	32	28	23	20	34	27	28	26
34	53	37	46	32	32	28	23	20	37	27	28	26
35	53	37	46	32	32	28	23	20	39	27	29	26
36	53	37	46	32	32	27	23	20	45	28	30	27
37	53	37	46	32	32	27	23	20	51	29	31	27
38	53	37	46	32	32	27	23	20	60	30	34	27
39	52	38	46	32	32	27	23	20	65	33	37	28
40	52	38	46	32	32	27	23	20	70	36	42	29
41	52	38	46	32	32	27	23	20	72	38	44	29
42	52	38	46	32	32	27	23	20	74	39	46	31
43	52	38	46	32	32	27	23	20	76	39	46	31
44	52	38	46	32	32	27	23	20	77	40	47	30
45	52	38	46	32	32	27	23	20	76	40	46	29
46	52	38	46	32	32	27	23	20	76	39	45	29
47	51	38	46	32	32	27	23	20	75	38	44	28
48	51	38	46	31	32	27	23	20	72	36	42	27
49	51	38	46	31	32	27	23	20	69	36	41	27
50	51	38	46	31	32	27	23	20	66	35	40	26
51	52	38	45	31	32	27	23	20	65	34	39	26
52	52	38	45	31	32	27	23	20	62	33	38	26
53	53	39	46	31	32	27	23	20	61	32	37	25
54	55	39	46	31	32	27	23	20	60	32	36	25
55	57	39	46	31	32	27	23	20	59	31	36	25
56	71	39	46	31	32	27	23	20	69	31	36	24
57	112	40	46	31	32	27	23	20	78	31	35	24
58	160	40	46	31	32	27	23	20	96	31	37	24
59	220	40	46	31	32	27	23	19	108	32	40	24
60	325	40	46	31	32	27	23	19	132	37	52	24
61	351	41	46	31	32	27	23	19	152	47	65	28
62	365	41	46	31	32	27	23	19	178	68	88	43
63	374	42	46	31	32	27	23	19	207	82	106	56
64	389	44	47	31	32	27	23	19	282	112	144	75
65	399	46	47	31	32	27	23	19	331	135	173	91
66	407	49	48	31	32	27	23	19	391	166	211	115
67	413	51	49	31	33	27	23	19	442	187	236	131
68	430	56	50	32	33	27	23	19	512	220	277	156
69	435	62	51	32	33	27	23	19	549	239	298	169
70	442	90	53	32	33	27	23	19	596	262	331	184
71	446	138	55	33	34	27	23	19	619	278	353	193
72	441	195	58	33	34	27	23	19	636	305	387	208
73	435	216	60	34	34	27	23	19	656	321	403	219
74	424	238	65	35	35	27	23	19	666	337	421	234
75	416	258	69	35	35	27	23	19	662	348	436	244
76	404	286	76	36	36	27	23	19	661	366	463	254
77	396	301	100	37	36	27	23	19	652	381	484	261
78	385	314	152	38	37	27	23	19	641	403	512	273
79	378	321	180	38	37	27	23	19	635	419	530	282
80	367	326	210	39	37	27	23	20	623	439	544	295
81	359	332	223	40	38	27	23	20	616	451	556	303
82	348	340	236	41	38	27	23	20	618	475	591	319
83	341	350	243	42	39	27	23	20	615	492	609	326
84	330	368	258	44	40	27	23	20	627	516	635	342
85	324	380	269	45	40	27	23	20	639	539	662	348
86	314	402	287	49	41	27	23	20	645	574	702	365
87	309	413	300	52	42	27	23	20	652	591	717	370
88	301	427	319	60	43	27	23	20	657	603	735	378
89	295	434	334	69	44	27	23	20	654	611	745	382
90	289	445	357	137	45	27	23	20	650	622	739	388
91	285	449	370	187	45	27	23	20	644	622	733	394
92	279	450	388	248	46	27	23	20	627	636	736	405
93	275	447	398	283	46	27	23	20	613	632	730	408
94	267	436	411	328	47	27	23	20	595	612	723	404
95	262	426	417	353	47	27	23	20	586	599	718	399
96	257	411	425	369	48	27	23	20	567	577	701	393
97	253	401	430	375	48	27	23	20	553	566	684	389
98	247	388	437	380	48	27	23	20	533	552	656	382

99	244	377	440	384	48	27	23	20	519	544	638	378
100	239	359	442	396	49	27	23	20	497	534	608	372
101	234	350	444	407	49	27	23	20	482	531	589	366
102	227	334	444	421	49	27	23	20	461	525	560	358
103	221	324	444	422	50	27	23	20	449	515	541	353
104	216	313	444	418	51	27	23	20	431	498	516	345
105	212	305	444	413	51	27	23	20	421	488	500	340
106	203	288	443	403	52	27	23	20	406	472	477	332
107	199	278	441	397	53	27	23	20	394	461	462	326
108	196	270	438	388	53	27	22	20	380	445	440	312
109	194	265	435	383	54	27	22	20	370	435	427	304
110	192	258	431	375	54	27	22	20	355	416	408	295
111	189	252	427	370	54	27	22	20	346	405	397	289
112	183	243	422	361	54	27	22	20	333	389	382	279
113	179	237	418	355	55	27	22	20	324	379	373	274
114	174	229	411	348	55	27	22	20	312	364	360	265
115	173	222	406	343	55	27	22	20	305	356	352	259
116	169	213	398	337	56	27	22	20	295	343	342	252
117	166	208	393	333	56	27	22	20	289	333	334	247
118	164	200	386	328	56	27	22	20	280	322	324	241
119	160	195	381	324	57	27	22	20	274	316	317	236
120	154	191	374	317	58	27	22	20	266	307	308	231
121	150	189	370	313	58	27	22	20	260	301	302	229
122	144	183	363	305	60	27	22	20	252	295	294	226
123	140	179	358	300	61	27	22	20	248	292	289	224
124	135	173	352	293	63	27	22	20	241	287	282	222
125	133	169	348	289	64	27	22	20	237	284	278	224
126	129	163	343	282	67	27	22	20	232	280	273	232
127	127	159	339	278	69	27	22	20	229	277	269	237
128	123	153	334	271	76	27	22	20	225	279	266	252
129	121	150	331	267	92	27	22	20	223	281	265	266
130	119	147	327	262	131	27	22	20	224	290	268	285
131	119	146	324	258	159	27	22	20	226	298	272	292
132	119	144	321	253	201	27	21	20	234	315	284	296
133	118	144	318	250	219	27	21	20	242	330	293	300
134	117	141	315	246	252	27	21	20	250	341	304	316
135	115	139	312	243	281	27	21	20	254	346	306	338
136	113	134	309	239	313	27	21	20	258	345	307	358
137	112	131	307	236	324	27	21	19	259	347	309	372
138	111	129	304	232	338	27	21	19	262	350	312	384
139	111	128	302	229	347	27	21	19	263	352	317	390
140	110	128	299	226	361	27	21	19	269	365	325	395
141	110	127	297	224	371	27	21	19	274	371	329	400
142	109	125	295	221	387	27	21	19	283	390	341	409
143	108	124	293	219	398	27	21	19	288	401	350	417
144	108	122	291	216	413	27	22	19	297	421	364	434
145	108	121	289	215	422	27	22	19	301	432	369	441
146	106	119	287	212	433	27	22	19	307	439	377	448
147	105	118	285	210	438	27	22	19	310	438	380	449
148	102	117	283	207	439	27	22	19	316	438	379	454
149	101	115	282	205	437	27	22	19	318	435	377	455
150	101	113	280	202	435	27	22	19	320	440	381	449
151	101	112	278	200	433	27	22	19	323	445	383	439
152	100	111	276	197	428	27	22	19	327	453	386	430
153	99	111	274	196	424	27	22	19	329	458	390	435
154	99	109	272	194	417	27	22	19	332	458	394	479
155	98	108	271	192	412	28	22	19	332	452	390	490
156	97	107	269	190	404	28	22	19	329	446	385	501
157	97	106	267	188	398	28	22	19	327	443	381	502
158	96	104	265	186	389	29	22	19	325	439	378	495
159	95	103	264	184	383	29	22	19	325	434	375	489
160	95	102	261	182	373	31	22	19	324	428	371	481
161	94	101	259	180	367	32	22	19	322	424	368	475
162	94	100	257	178	358	35	22	19	320	426	371	473
163	93	100	255	176	352	39	22	19	320	426	371	477
164	91	99	252	174	343	49	22	19	319	422	369	506
165	90	98	250	173	338	68	22	19	319	420	369	519
166	89	96	247	171	330	152	23	19	320	417	367	544
167	89	96	245	170	325	203	23	19	321	417	367	553
168	87	96	242	168	318	264	23	19	325	422	374	552
169	86	96	240	167	313	296	23	19	329	427	375	547
170	85	96	237	165	307	319	23	19	334	426	375	528
171	84	97	235	164	302	338	23	19	332	422	372	520
172	84	98	231	163	296	354	23	19	329	418	368	515
173	84	98	229	162	292	358	23	19	329	409	362	500
174	85	98	226	161	286	365	23	19	323	396	351	485
175	85	98	224	160	283	378	23	19	317	385	343	467
176	86	98	222	158	278	379	23	19	308	370	330	434
177	87	99	220	157	274	383	23	19	300	358	319	415
178	90	99	217	154	269	385	24	19	289	344	307	395
179	90	99	215	152	266	384	24	19	283	338	299	381
180	91	99	213	150	261	379	24	19	274	326	290	360
181	92	99	211	148	258	376	24	19	269	317	282	348
182	91	100	207	146	254	371	24	19	261	305	272	332
183	91	100	205	145	250	377	24	19	257	299	266	323
184	90	100	202	143	246	373	24	19	251	291	260	309
185	90	99	200	142	242	368	25	19	247	284	255	302
186	87	98	196	141	238	358	25	19	241	274	246	291
187	86	96	194	140	235	352	26	19	235	267	241	284
188	83	94	190	138	231	344	28	19	227	258	235	274
189	82	92	188	137	228	339	33	20	221	253	232	269
190	80	90	184	136	223	333	40	20	215	247	226	261
191	79	89	181	135	220	327	46	20	212	242	222	255
192	79	88	178	133	216	315	116	20	206	233	214	247
193	78	88	176	132	213	308	154	20	202	228	209	242
194	77	88	173	130	209	310	217	20	195	219	201	238
195	77	87	171	129	206	306	259	20	190	214	197	233
196	77	86	169	127	202	299	273	21	185	206	191	224
197	77	86	167	126	200	296	258	21	181	200	185	219
198	79	86	166	124	196	259	234	22	173	189	175	208
199	80	86	165	122	194	237	219	22	168	181	168	197
200	81	85	163	119	191	211	203	22	160	178	161	183
201	81	84	162	118	191	195	190	23	158	172	158	175

202	80	84	161	116	191	175	171	25	154	163	152	166
203	80	84	160	114	191	165	162	25	151	156	147	161
204	80	84	158	112	192	150	149	25	146	147	139	152
205	80	83	157	110	192	140	141	25	142	141	134	148
206	80	82	156	107	192	128	130	25	136	132	126	141
207	79	81	156	105	192	121	124	24	134	127	122	139
208	79	79	155	103	192	111	116	24	131	122	117	135
209	79	78	155	102	191	106	112	23	129	119	114	131
210	78	77	155	99	190	100	105	23	125	115	110	123
211	78	76	155	96	189	96	99	23	122	110	106	118
212	77	75	154	93	187	89	92	22	119	104	99	111
213	76	74	154	92	186	85	88	22	115	100	96	108
214	74	72	153	89	185	79	84	22	111	94	91	102
215	74	71	153	87	183	76	81	22	108	92	89	99
216	73	70	152	84	181	72	76	21	106	89	85	95
217	72	70	152	83	180	70	73	21	104	86	83	92
218	71	69	151	81	178	66	70	21	102	82	80	87
219	70	68	150	81	177	64	69	21	101	80	79	85
220	69	67	150	79	174	61	65	21	99	78	77	80
221	69	67	150	78	173	59	63	21	97	76	75	77
222	68	66	149	76	171	57	59	21	95	72	72	73
223	67	65	149	76	170	55	57	21	94	70	70	71
224	67	64	149	74	167	53	53	20	93	67	67	67
225	66	64	149	72	166	52	51	20	92	66	66	65
226	65	63	148	70	164	51	49	20	91	64	64	62
227	63	62	147	70	163	49	47	20	90	62	63	60
228	62	62	146	69	161	47	44	20	89	61	61	57
229	61	62	146	67	159	46	43	20	88	60	59	56
230	60	61	145	66	157	45	41	20	86	57	57	55
231	59	62	144	66	156	44	40	20	85	57	56	54
232	58	62	143	66	154	44	39	20	84	55	54	52
233	58	62	143	65	153	43	38	20	83	54	54	51
234	56	62	142	64	151	42	36	19	82	53	54	49
235	55	62	141	63	150	42	35	19	82	53	53	48
236	55	62	140	62	148	41	34	19	81	52	52	46
237	54	61	140	62	147	40	33	19	80	51	51	45

Neigung 20° mit Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	37	31	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
1	37	31	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
2	37	31	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
3	37	32	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
4	37	32	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
5	37	32	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
6	37	32	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
7	37	32	37	35	36	30	20	18	22	23	23	23
8	37	32	37	35	36	30	20	18	22	24	23	23
9	37	32	37	35	36	30	20	18	22	24	23	23
10	37	32	37	35	36	30	21	18	22	24	23	23
11	37	32	37	35	36	30	21	18	22	24	23	23
12	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	24	23
13	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	24	23
14	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	24	23
15	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	24	23
16	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
17	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
18	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
19	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
20	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	23	22
21	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	23	22
22	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	23	22
23	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	23	22
24	37	32	37	36	36	30	21	18	23	23	23	22
25	37	32	37	36	36	30	21	18	23	23	23	22
26	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
27	37	32	37	35	36	30	21	18	23	24	23	22
28	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	23	21
29	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	22	21
30	37	32	37	35	36	30	21	18	23	23	22	21
31	37	32	37	35	36	30	20	18	23	23	22	21
32	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	21
33	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	21
34	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	21
35	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	20
36	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	20
37	37	32	38	35	36	30	20	18	23	23	22	20
38	37	31	38	35	36	30	20	18	25	23	22	20
39	37	31	38	35	36	30	20	18	27	23	22	20
40	37	31	38	35	36	30	20	18	30	26	24	21
41	37	31	38	35	36	30	20	18	32	27	25	23
42	37	31	38	35	36	30	20	18	38	30	28	25
43	37	32	38	35	36	30	20	18	45	35	32	28
44	39	32	38	35	36	30	20	18	63	46	42	36
45	45	32	38	35	36	30	20	18	84	61	52	44
46	47	32	38	35	36	30	20	18	196	123	103	80
47	54	32	38	35	36	30	20	18	259	167	139	110
48	88	33	38	35	36	30	20	18	331	242	208	168
49	104	34	38	35	36	30	20	18	378	289	240	199
50	131	35	39	35	36	30	20	18	461	384	337	273
51	157	37	39	36	36	30	20	18	501	440	398	333
52	198	44	41	36	36	30	20	18	560	529	493	434
53	230	48	42	36	36	30	21	18	584	575	547	503
54	273	114	49	37	37	30	21	19	586	610	596	574
55	312	125	57	38	37	30	21	19	582	623	623	612
56	389	137	83	42	37	30	21	19	563	626	642	644
57	429	146	104	48	37	31	22	19	551	626	650	663
58	476	163	138	57	37	32	22	19	525	621	654	677
59	500	171	155	61	37	35	23	19	509	613	647	678
60	540	193	175	66	37	41	23	19	487	614	647	690
61	557	217	191	80	38	48	24	19	473	610	646	689
62	562	230	215	90	56	58	25	19	465	634	679	718
63	556	235	231	98	60	64	24	20	456	655	698	734
64	545	250	255	110	67	68	24	20	443	676	716	756
65	537	271	270	118	69	69	24	20	433	666	712	758
66	525	284	291	130	74	69	26	20	416	647	695	757
67	517	293	309	137	77	69	38	20	408	644	683	746
68	501	307	325	148	83	70	79	20	392	623	658	731
69	488	312	329	155	87	70	104	20	378	609	638	722
70	469	320	333	164	94	71	140	21	361	580	604	683
71	458	328	336	170	100	71	162	21	347	564	583	658
72	444	345	342	181	108	70	195	22	330	537	562	625
73	434	357	346	188	116	70	216	22	319	521	540	602
74	423	366	351	198	133	70	247	22	301	497	508	568
75	416	375	355	205	143	71	270	22	290	482	487	545
76	417	377	357	215	153	72	322	22	276	457	459	515
77	421	375	357	221	160	72	353	22	269	440	439	496
78	426	375	354	231	170	72	394	22	258	416	413	475
79	422	376	350	236	177	73	424	22	251	402	397	460
80	411	379	346	244	187	74	423	22	241	381	375	446
81	403	381	343	248	193	74	412	22	234	368	362	441
82	392	383	336	255	202	74	397	22	224	349	343	427
83	384	383	332	259	208	74	384	23	218	338	332	414
84	375	383	326	264	217	74	366	29	208	320	314	398
85	371	384	322	268	222	74	355	30	201	308	304	386
86	363	382	316	273	230	74	339	29	192	291	289	369
87	358	381	313	276	235	74	327	28	185	281	279	356
88	350	380	308	280	243	74	312	28	177	266	264	343
89	344	380	304	282	248	75	311	27	171	257	256	335
90	333	377	299	287	255	76	309	27	163	244	243	323
91	327	374	296	290	260	77	301	26	158	237	235	321
92	318	373	292	294	266	78	289	25	150	226	223	314
93	313	373	289	297	270	78	282	25	145	218	216	305
94	304	370	284	300	275	79	271	25	138	208	205	290
95	297	367	280	302	279	79	264	24	134	201	199	281
96	289	363	275	304	284	80	254	24	130	192	189	270
97	283	361	271	305	287	80	249	24	128	187	184	262
98	270	358	265	306	292	81	239	24	123	179	176	249

99	261	355	261	306	295	82	232	23	121	174	171	241
100	251	352	254	306	300	84	223	23	117	167	164	231
101	246	351	250	305	303	86	217	22	114	163	161	224
102	239	343	244	302	309	89	208	22	111	157	155	214
103	233	339	239	300	312	92	202	22	109	154	152	208
104	226	333	233	296	318	95	194	21	107	148	147	200
105	222	328	229	293	322	98	189	21	106	145	143	194
106	216	320	223	288	328	102	182	21	103	139	139	187
107	212	313	219	285	332	104	177	21	101	137	137	183
108	205	304	214	280	337	108	171	21	99	132	133	178
109	201	297	210	277	341	111	167	21	98	130	131	175
110	196	287	205	273	347	114	160	21	96	126	130	172
111	193	280	201	269	351	117	156	20	95	124	128	169
112	189	271	197	265	357	121	149	20	93	122	127	167
113	186	264	193	262	360	123	145	20	92	120	126	166
114	182	256	189	258	365	127	139	20	90	118	125	165
115	180	250	186	255	368	129	135	19	89	117	125	164
116	176	243	182	251	372	132	128	19	87	115	125	166
117	174	238	179	248	374	134	123	19	87	115	124	168
118	171	230	176	245	377	136	114	19	86	115	125	170
119	169	224	174	242	379	147	109	19	86	115	124	168
120	166	216	170	239	382	151	104	19	85	113	123	166
121	164	211	168	237	384	154	101	19	84	112	121	164
122	161	203	165	234	386	158	97	19	83	111	120	162
123	159	199	163	232	387	160	93	19	82	111	119	162
124	156	193	160	229	389	163	87	19	82	111	119	162
125	155	188	158	228	390	166	84	19	82	111	119	161
126	152	182	155	225	391	168	80	19	81	109	117	158
127	150	178	153	224	392	170	78	18	80	107	115	156
128	147	173	151	222	393	173	75	18	79	105	113	151
129	146	169	149	221	395	175	73	18	79	104	112	148
130	143	164	146	219	396	177	69	18	77	101	108	143
131	141	160	145	218	398	179	67	18	76	100	106	139
132	139	155	142	217	400	181	64	18	75	97	104	134
133	137	152	141	216	402	182	62	18	75	96	102	131
134	135	148	138	215	405	184	59	18	74	95	102	129
135	133	145	137	215	406	185	57	18	74	95	101	129
136	132	142	135	214	409	186	55	18	74	94	100	130
137	130	140	134	215	410	187	54	18	74	94	100	129
138	128	137	132	216	413	188	52	18	73	93	99	128
139	127	135	131	218	414	189	51	19	73	92	98	126
140	124	132	129	220	415	190	50	20	72	91	96	124
141	122	130	128	221	416	191	48	20	72	90	95	123
142	119	128	127	223	417	192	47	19	71	89	94	120
143	118	126	125	224	418	192	46	19	70	87	93	118
144	115	124	123	226	420	193	45	19	69	85	90	115
145	113	122	122	226	421	193	44	19	68	84	89	113
146	110	121	121	225	422	194	42	19	67	83	88	111
147	108	120	120	225	422	194	42	19	67	83	88	110
148	106	118	118	223	423	195	41	19	67	83	88	109
149	105	117	118	222	423	195	40	19	66	83	88	108

Neigung 35° mit Einhausung

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	27	28	31	29	29	27	24	20	18	18	18	19
1	27	28	31	29	29	27	24	20	18	18	18	19
2	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
3	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
4	27	28	32	29	29	27	24	20	18	18	18	19
5	27	28	32	29	29	28	24	20	18	18	18	19
6	27	28	32	29	29	28	25	20	18	18	18	19
7	27	29	31	29	29	28	25	20	18	18	18	19
8	27	28	31	29	30	27	25	20	19	18	18	19
9	27	28	31	29	30	27	25	20	19	18	18	19
10	27	28	31	29	30	28	25	20	18	18	18	19
11	27	28	31	29	30	28	25	20	19	18	18	19
12	27	29	31	29	31	28	25	20	19	18	18	19
13	27	29	30	29	31	28	25	20	18	18	18	19
14	27	29	30	29	31	28	25	20	19	18	18	19
15	27	29	30	29	31	28	25	20	19	18	18	19
16	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
17	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
18	27	29	30	28	31	27	25	20	19	18	18	19
19	27	29	29	28	31	27	24	20	19	18	18	19
20	27	29	29	28	31	28	24	20	19	18	18	19
21	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
22	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
23	27	29	29	28	32	28	24	20	19	18	18	19
24	27	29	29	28	32	27	24	20	19	18	18	19
25	27	29	29	28	32	27	24	20	18	18	18	19
26	27	29	29	28	32	27	24	19	19	18	18	19
27	27	29	29	28	32	27	24	19	19	18	18	19
28	27	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
29	28	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
30	28	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
31	32	29	28	28	32	27	24	19	19	18	18	19
32	42	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
33	57	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
34	82	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
35	111	29	28	28	33	28	24	20	19	18	19	19
36	154	29	28	28	33	28	25	20	19	19	19	19
37	182	29	28	28	33	28	25	20	19	18	19	19
38	220	29	28	28	33	27	25	20	19	19	19	19
39	244	29	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
40	269	29	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
41	281	30	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
42	296	30	28	28	34	27	25	21	19	19	19	19
43	304	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
44	313	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
45	319	30	27	27	34	27	25	21	19	19	19	20
46	329	31	27	27	34	26	26	22	19	19	19	20
47	336	32	27	27	34	26	26	22	19	19	19	20
48	347	35	28	27	34	26	26	22	19	19	19	20
49	355	45	28	28	34	26	26	22	19	19	19	20
50	367	86	30	28	34	26	26	22	19	19	19	20
51	375	108	31	28	34	27	26	22	19	19	19	20
52	388	143	32	28	34	27	26	22	19	19	19	20
53	396	208	34	28	34	27	26	22	19	19	19	20
54	409	238	40	28	34	27	26	22	19	19	19	20
55	419	263	47	28	34	27	26	22	19	19	19	20
56	433	300	61	28	33	27	26	22	19	19	19	20
57	441	325	67	29	33	27	27	22	19	19	19	20
58	452	357	72	30	33	27	28	23	19	19	19	20
59	458	376	75	32	33	28	28	23	19	19	19	20
60	466	403	78	36	34	28	27	23	19	19	19	19
61	476	418	80	38	34	28	27	23	19	19	19	19
62	493	423	89	45	34	28	27	23	19	19	19	19
63	501	420	100	67	34	28	27	23	19	19	19	19
64	513	422	126	134	35	28	29	24	19	19	19	19
65	518	408	146	161	36	28	29	25	19	19	19	19
66	525	394	177	178	37	28	29	25	19	19	19	19
67	530	377	195	196	37	28	28	25	19	19	19	19
68	536	349	219	212	38	28	28	25	19	18	19	19
69	540	330	235	223	39	28	28	25	19	18	19	19
70	545	309	255	245	40	28	28	25	19	18	19	19
71	549	298	270	257	43	28	28	25	19	18	19	19
72	552	287	298	274	72	28	28	25	19	18	19	19
73	555	279	321	285	128	28	28	25	19	18	19	19
74	554	268	354	300	185	28	29	25	19	18	19	19
75	551	259	375	312	220	29	29	25	19	18	19	19
76	544	249	402	330	252	31	31	26	19	18	19	19
77	539	244	412	346	278	35	31	26	19	18	19	19
78	534	236	431	366	315	41	32	26	19	18	19	19
79	530	232	441	378	340	50	32	27	19	18	19	19
80	524	226	467	394	377	60	37	28	19	19	19	19
81	519	222	493	403	401	74	40	30	19	19	19	19
82	512	214	524	418	454	103	40	29	19	19	19	19
83	509	208	540	427	475	149	39	28	19	19	19	19
84	510	197	564	439	519	202	38	27	19	19	19	19
85	515	187	577	445	517	222	41	27	19	19	19	19
86	524	176	587	454	496	243	51	28	19	18	19	19
87	527	171	587	459	494	252	51	29	19	18	19	19
88	532	164	586	464	477	261	48	28	19	18	19	19
89	533	159	584	468	463	268	46	28	19	18	19	19
90	533	155	580	475	450	289	44	28	19	18	19	19
91	530	153	577	480	442	298	43	27	19	18	19	19
92	524	149	569	484	425	322	42	27	19	18	19	19
93	520	146	560	485	418	337	41	27	19	18	19	19
94	516	140	544	486	394	365	39	27	19	18	19	19
95	515	138	532	488	384	386	41	27	19	18	19	19
96	521	135	523	496	363	415	40	27	19	18	19	19
97	525	133	521	498	348	437	40	27	19	18	19	19
98	532	137	506	504	326	473	38	26	19	18	18	19

99	533	138	495	508	315	481	37	26	19	18	18	19
100	533	138	466	509	301	482	36	26	18	18	18	19
101	531	137	447	510	288	484	36	26	18	18	18	19
102	526	135	422	506	271	481	35	26	18	18	18	19
103	522	134	407	503	262	478	35	26	18	18	18	19
104	515	132	389	495	250	470	34	25	18	18	18	19
105	510	130	374	491	242	443	34	26	19	18	18	19
106	501	129	355	446	227	409	33	26	18	18	18	19
107	495	128	345	421	218	381	33	25	18	18	18	19
108	486	127	322	386	209	349	32	25	18	18	18	19
109	479	127	306	365	201	329	32	25	18	18	18	19
110	465	126	284	334	191	298	33	26	18	18	18	19
111	454	124	274	315	183	279	32	26	18	18	18	19
112	436	122	263	290	175	256	31	26	18	18	18	19
113	423	121	255	275	169	245	31	25	18	18	18	19
114	404	119	247	253	161	229	30	25	18	18	18	19
115	391	117	241	242	155	218	30	25	18	18	18	19
116	373	115	233	227	148	204	30	24	18	18	18	19
117	362	114	227	220	143	195	29	24	18	18	18	19
118	347	112	220	209	137	185	29	24	19	18	19	19
119	337	111	216	201	134	179	28	24	19	18	19	19
120	324	109	209	190	130	168	28	24	19	18	19	19
121	316	108	206	184	128	160	28	24	19	18	19	19
122	305	106	198	176	124	151	28	23	19	18	19	19
123	299	105	194	171	121	146	28	23	19	18	19	19

Versuch Sprinkler

Zeit	Temp_1	Temp_2	Temp_3	Temp_4	Temp_5	Temp_6	Temp_7	Temp_8	Temp_9	Temp_10	Temp_11	Temp_12
0	41	50	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
1	41	50	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
2	40	49	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
3	40	49	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
4	40	49	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
5	40	49	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
6	40	49	36	49	46	47	31	20	29	30	32	33
7	40	49	37	49	46	47	31	20	29	30	32	33
8	40	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
9	40	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
10	40	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
11	39	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
12	39	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
13	39	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
14	39	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
15	39	49	37	49	46	47	31	19	29	30	32	33
16	39	49	37	49	46	47	31	19	30	30	32	33
17	40	49	37	49	46	47	31	19	30	30	32	33
18	40	49	37	49	46	47	31	19	30	31	32	33
19	40	49	37	49	46	47	30	19	30	31	32	33
20	39	49	37	49	46	47	30	19	30	31	32	33
21	40	49	38	49	46	47	30	19	30	31	32	33
22	39	49	38	49	46	47	30	19	30	31	32	33
23	39	49	38	49	46	47	30	19	30	31	32	33
24	39	49	37	49	46	47	30	19	30	31	32	33
25	39	49	37	49	46	47	30	19	30	31	32	33
26	39	49	37	49	46	47	30	19	31	31	32	33
27	39	49	37	49	46	47	30	19	31	31	32	33
28	39	49	37	49	46	47	31	19	31	31	32	34
29	40	49	37	49	46	47	31	19	31	31	33	34
30	40	49	37	49	46	47	31	19	31	31	32	34
31	40	49	37	49	46	47	31	19	31	31	33	34
32	40	49	37	49	46	48	31	19	30	31	33	34
33	40	49	37	49	46	48	31	19	30	31	32	34
34	40	49	37	49	46	48	31	20	30	31	32	34
35	40	49	37	49	46	48	31	20	30	31	32	33
36	40	49	37	49	46	48	31	19	30	31	32	33
37	40	49	37	49	46	48	31	19	31	31	32	33
38	40	49	37	49	46	48	31	19	32	31	32	33
39	40	49	37	49	46	48	31	19	33	31	32	33
40	40	49	38	48	46	48	31	19	44	36	34	34
41	40	49	38	48	46	47	31	19	61	45	40	37
42	41	49	38	48	46	47	31	19	92	64	55	53
43	46	50	38	48	46	47	31	19	108	78	68	66
44	58	50	38	48	46	47	31	19	147	101	86	75
45	73	50	38	48	46	47	30	19	200	130	104	78
46	178	50	39	48	46	47	30	19	301	189	150	88
47	214	50	40	48	47	47	30	19	344	220	174	99
48	259	51	43	48	48	47	30	19	410	276	218	113
49	297	51	45	48	49	48	30	19	463	320	260	125
50	344	53	48	48	51	48	30	19	520	396	341	179
51	368	54	49	48	53	48	30	19	546	454	408	265
52	413	60	52	49	56	49	30	19	571	538	506	393
53	447	65	54	49	59	49	30	19	589	586	565	463
54	429	88	60	49	64	52	30	19	601	640	635	556
55	417	110	62	49	66	57	30	19	603	665	668	607
56	405	138	66	49	70	64	30	19	608	706	703	669
57	396	149	69	50	71	70	30	20	610	733	727	698
58	376	162	74	50	74	77	30	21	611	747	748	724
59	367	169	77	51	75	81	31	21	606	740	750	742
60	350	180	84	53	77	82	31	21	599	739	752	756
61	341	186	89	55	78	82	31	21	599	744	751	736
62	328	193	96	59	79	86	31	20	612	749	736	671
63	321	196	101	62	79	87	31	19	628	741	716	613
64	313	200	106	66	81	87	32	18	629	718	693	537
65	310	204	110	67	81	87	32	17	614	696	669	494
66	313	206	115	68	82	86	32	17	597	664	635	448
67	341	208	117	68	83	87	32	17	585	648	624	428
68	352	209	122	70	84	91	32	16	571	646	639	415
69	352	211	124	72	85	92	32	16	567	649	648	408
70	342	213	128	76	86	82	32	16	562	643	631	420
71	333	214	130	79	88	70	32	16	554	631	614	412
72	322	215	134	85	90	51	32	16	540	602	579	384
73	317	216	136	89	92	39	32	16	524	579	550	362
74	312	216	138	96	95	35	31	17	500	534	498	338
75	308	216	139	102	97	34	31	16	481	499	459	318
76	300	216	141	110	100	34	31	17	450	446	406	285
77	294	216	141	115	103	33	31	17	420	410	369	265
78	281	222	143	125	107	32	30	16	385	364	324	232
79	274	229	143	131	110	31	29	16	360	337	295	211
80	262	255	144	140	115	30	28	16	326	300	255	178
81	255	268	145	147	117	29	28	16	305	277	228	160
82	246	286	144	157	121	29	27	16	275	248	195	133
83	238	300	109	165	123	29	26	15	258	229	175	117
84	228	320	113	177	125	29	26	15	234	201	140	96
85	224	330	127	186	127	29	26	15	219	177	109	83
86	233	342	143	198	129	29	26	15	198	149	86	67
87	249	351	144	205	130	29	26	15	186	127	65	59
88	263	374	135	213	131	29	25	15	171	93	43	53
89	271	386	131	216	132	29	25	15	161	84	38	47
90	278	402	138	218	133	29	25	15	151	68	36	42
91	283	405	134	219	133	29	25	15	146	62	35	41