



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Entwicklung von Brandversuchen im
Technikums-Maßstab zur Beurteilung der
Effizienz von Löschmittelzusätzen

Stefan Simon Holubar, BSc

Mai 2021

Masterarbeit

Entwicklung von Brandversuchen im Technikums-Maßstab zur Beurteilung der Effizienz von Löschmittelzusätzen

Mai 2021

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Vorgelegt von:

Stefan Holubar, B.Sc.
m01435670

Betreuer:

Dipl.-Ing. Michael Hohenberger
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 26.05.2021

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, 26.05.2021

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanke, die mich während der Verfassung dieser Masterarbeit und während meines Studiums in Leoben unterstützt haben.

Besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Dipl.-Ing. Michael Hohenberger, für seine große Unterstützung über den gesamten Verlauf meiner Forschungstätigkeit am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, widmen.

Für die Möglichkeit an interessanten Themen zu arbeiten und mich dabei persönlich weiterzuentwickeln, bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing- Dr.techn. Harald Raupenstrauch.

Bei allen teilhabenden Kolleginnen und Kollegen, welche mich bei der Durchführung der Versuche tatkräftig unterstützt haben, möchte ich mich ebenso bedanken. Ohne ihre Unterstützung wären viele Abläufe nicht möglich gewesen. Für die Möglichkeit Brandversuche bei der Firma Sappi Papier Holding GmbH durchzuführen, bedanke ich mich speziell bei Betriebsfeuerwehr Kommandanten Mario Papst.

Abschließend gilt größter Dank meiner Familie, allen voran meinen Eltern und Großeltern, welche stets meinen Rücken stärkten und in schwierigen Situationen zur Seite standen.

Kurzfassung:

In dieser Masterarbeit wird eine Durchführungsmethodik für Brand- und Löschversuche im Technikums-Maßstab entwickelt, die zum Ziel hat, die Wirkung unterschiedlicher Löschmittel für Brände der Brandklasse A zu quantifizieren. Neben der Auswahl von geeigneten Brandlasten und der Entzündungsmethodik erfolgen Untersuchungen hinsichtlich der Löschtechnik. Es werden sowohl 5A-Normholzkrippen-Aufbauten als auch handelsübliche Holzpaletten entzündet, welche durch eine Versuchsperson standardisiert gelöscht werden. Mit Hilfe von Thermoelementen, Gewichtssensoren und einer Infrarot-Kamera können Aussagen über die Löscheffizienz des verwendeten Löschangriffes, bzw. des eingesetzten Löschmittels getroffen werden. Als Bewertungskriterien wurden die verbrauchte Löschmittelmenge sowie die Abkühlrate ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) im Inneren und an der Oberfläche des Brandes herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beurteilung der Löscheffizienz von Löschmitteln anhand der vorgestellten Methodik möglich ist. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die angewandte Löschtaktik einen größeren Einfluss auf das Ergebnis hat als das eingesetzte Löschmittel.

Abstract:

This master's thesis develops an implementation methodology for fire and extinguishing tests on a pilot plant scale, which aims to quantify the effect of different extinguishing agents for class A fires. In addition to the selection of suitable fire loads and the ignition method, investigations are carried out regarding the extinguishing technique. Both 5A-standard wooden cribs and commercially available wooden pallets are ignited, which are extinguished by a test person in a standardized manner. With the help of thermocouples, weight sensors and an infrared camera, statements can be made about the extinguishing efficiency, of the used extinguishing attack or the used extinguishing agent. The evaluation criteria were the quantity of extinguishing agent used and the cooling rate ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) inside and on the surface of the fire. The results show, that an assessment of the extinguishing efficiency of extinguishing agents is possible, based on the presented methodology. Another finding is that the extinguishing tactic used has a greater influence on the result than the extinguishing agent used.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Akronyme	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Brand.....	5
2.1.1 Brandstoffklassen	6
2.1.2 Brandverlauf	7
2.1.3 Brandkenngößen.....	8
2.2 Löschung.....	9
2.2.1 Löschmittel	11
2.3 Automatisierte Laborlöschvorrichtung.....	13
2.4 Brände im Technikums-Maßstab	14
3 Versuchsplanung.....	18
3.1 Brandlast.....	18
3.1.1 Entzündung	20
3.1.2 Prüfobjekt	21
3.2 Wannenbrandversuche	21

3.3	Löschvorrichtung	24
3.3.1	Aufbau der Löschvorrichtung.....	25
3.3.2	Sprühversuche	26
3.4	Messeinheit und Sensorik	29
3.5	Versuchsaufbau	34
3.5.1	Aufbau des Prüfstandes	34
3.5.2	Aufbau der Brandlast.....	36
4	Versuchsdurchführung	39
4.1	Vorbrennphase.....	40
4.2	Hauptbrennphase.....	40
4.3	Löschtätigkeit	41
4.3.1	Löschangriff für 5A-Holzkrippe	42
4.3.2	Löschangriff für Holzpaletten – händisch	43
4.4	Nachbereitung.....	44
4.5	Löschmittel	45
5	Ergebnisse.....	46
5.1	Umgebungsbedingungen	46
5.2	Abbrand/Wärmefreisetzungsrate	47
5.3	Temperaturmessung	51
5.3.1	Thermoelemente	51
5.3.2	Infrarot-Kamera	61
6	Schlussfolgerung.....	66
	Literaturverzeichnis	68
7	Anhang.....	71

Akronyme

TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
BVS	Bundesverhütungsstelle
VVÖ	Versicherungsverband Österreich
SIZ	Sicherheitsinformationszentrum
CITF	Internationale Vereinigung des Feuerwehr- und Rettungswesens
ALV	Automatisierte Löschvorrichtung
NFPA	National Fire Protection Association

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Branddreieck (4).....	5
Abbildung 2: Brandklassen nach DIN EN 2 und NFPA 10 und Löschmittel (8) (13).....	7
Abbildung 3: Brandverlauf (4).....	8
Abbildung 4: Löschtetraeder nach Wackerhahn und de Vries (8).....	11
Abbildung 5: Aufbau der automatisierten Laborlöschvorrichtung (24).....	13
Abbildung 6: Schematischer Versuchsaufbau von Blakely zur Löschung von brennenden Kiefer -Nadelbeeten (26).....	15
Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Versuche von Rappsilber et al. (28).....	16
Abbildung 8: Schematischer Versuchsaufbau mit Löschvorrichtung, nach Noaki et al. (29).....	17
Abbildung 9: 5A-Holzkippenaufbau, links schematische Skizze (15), rechts: fotografische Abbildung der Brandlast für die Versuche.....	19
Abbildung 10: links: Abbildung der Holzpaletten Brandlast, rechts: Prüfobjekt für die Holzpaletten	20
Abbildung 11: Utensilien für Zündungsversuche für die Normkrippe	22
Abbildung 12: Sprühvorrichtung; links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht.....	26
Abbildung 13: Sprühversuch zur Abstandsermittlung zwischen Düse und Brandlast auf Asphalt	28

Abbildung 14: Skizze des Sprühversuches zur Abstandsfindung x (Maße in mm)	29
Abbildung 15: Bildliche Darstellung der verwendete Waage Thermoelemente.....	30
Abbildung 16: Links: Thermoelement Typ K mit Steckverbindung, rechts: Bildschirmoberfläche mit Temperaturwerten.....	31
Abbildung 17: Links: Aufgebaute IR-Kamera; Rechts: Thermobild eines 5A-Krippenbrandes	32
Abbildung 18: Messgefäße aus Glas (2L)	33
Abbildung 19: Videokamera	33
Abbildung 20: Windmessstation	34
Abbildung 21: Schematischer Versuchsaufbau mit Messtechnik.....	35
Abbildung 22: Schematischer Versuchsaufbau der 5A-Holzkrippe mit Thermoelementpositionen.....	37
Abbildung 23: Schematischer Versuchsaufbau der Holzpaletten mit Thermoelementpositionen.....	38
Abbildung 24: Gegenüberstellung der Vorbrennphase (links) mit der Hauptbrennphase (rechts)	41
Abbildung 25: Schematischer Aufbau des Löschangriffs für 5A-Holzkrippe	42
Abbildung 26: Löschangriff bei Holzpaletten Versuchen.....	44
Abbildung 27: Abbrand und Wärmefreisetzungsrate für V1 über die Zeit	48
Abbildung 28: Abbrand und Wärmefreisetzungsrate für Versuch V13P über die Zeit	50
Abbildung 29: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die 5A- Holzkrippe nach Löschtaktik 1	52
Abbildung 30: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für 5A- Holzkrippen nach Löschtaktik 2	53
Abbildung 31: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die 5A- Holzkrippe nach Löschtaktik 3	54
Abbildung 32: Balkendiagramm der Abkühlraten basierend auf den Thermoelement- Messergebnissen	56
Abbildung 33: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die Holzpaletten nach der „händischen“ Löschmethode.....	57

Abbildung 34: Gemittelte Ergebnisse der händischen Löschversuche, Thermoelemente .	58
Abbildung 35: Balkendiagramm der Abkühlraten mit Standartabweichungen für die Holzpaletten-Versuche	59
Abbildung 36: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkippe nach Löschtaktik 1	61
Abbildung 37: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkippe nach Löschtaktik 2	62
Abbildung 38: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkippe nach Löschtaktik 3	63
Abbildung 39: Thermografie Aufnahme des Paletten-Brandes V7P mit Messbereich, Stirnseiten C-D	64
Abbildung 40: Gemittelte zeitliche Temperaturverläufe der Thermografie-Kamera für die Holzpaletten je Löschmittel	64
Abbildung 41: Vergleich Thermoelement 6 -Temperaturwert 6 (IR-Kamera), V3.....	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zündtemperaturen für eine Auswahl an Brennstoffen (10) (11)	6
Tabelle 2: Löscheffekte (8)	10
Tabelle 3: Löschmittel und deren Löscheffekte	10
Tabelle 4: n-Heptan Reinheitswerte nach EN 3-7:2004 I.3.2	20
Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche der Zündwanne für die Normkrippe.....	23
Tabelle 6: Heptan Brennzeiten für Paletten Versuche	24
Tabelle 7: Ergebnisse der Sprühversuche mit einer 5 l Wasserfüllung	26
Tabelle 8: Daten der verwendeten Thermoelemente der Type K (31)	30
Tabelle 9: Daten zur verwendeten Infrarot-Kamera	31
Tabelle 10: Hauptbrennzeiten	41
Tabelle 11: Abbrandmassen der 5A-Holzkippen-Versuche	47
Tabelle 12: Abbrandmassen der Holzpaletten-Versuche	49
Tabelle 13: Löschzeit und Löschmittelverbrauch bei Versuchen nach Löschtaktik 2	53
Tabelle 14: Löschzeit und Löschmittelverbrauch bei Versuchen nach Löschtaktik 3	54
Tabelle 15: Abkühlraten der 5A-Holzkippe basierend auf den Thermoelement-Messergebnissen	55
Tabelle 16: Abkühlraten der Holzpaletten-Versuche basierend auf die Thermoelement-Messergebnisse	59

1 Einleitung

In Österreich werden jährlich rund 25.000 Brände mit einer mittleren Gesamtsachschadenssumme von 260 Millionen Euro registriert (1). Wird diese Anzahl durch die Minuten pro Jahr dividiert, bedeutet dies, dass es in Österreich rund alle 20 Minuten brennt. Tatsächlich entstehen 51% der Brandereignisse in der Tageszeit zwischen 6:00 und 22:00 Uhr und 40% während den Nachtstunden. Bei den restlichen 9% bleibt der Zeitpunkt des Brandausbruchs unbekannt. (1) Dabei wird in die Bereiche Landwirtschaft, Industrie, Gewerbe, Privater Bereich und Sonstiges unterteilt, wobei rund die Hälfte, Kleinbrände mit Schadensverlusten unter 100 Euro sind. In den Jahren 1990 bis 2012 sind im Durchschnitt jährlich 53 Personen¹ auf Grund von Bränden zu Tode gekommen, wobei 80% davon Rauchgastote und die Restlichen 20% durch Flammeneinwirkung sowie andere Ursachen umgekommen sind. Zusätzlich werden Österreichweit rund 300 Personen jährlich durch Brände schwer verletzt (2). Für die Jahre 2001 bis 2016 verringerte sich die Brandtotenzahl auf durchschnittlich 36 Personen pro Jahr. (3)

Der Brandschutz stellt dabei den Erhalt von Menschenleben an oberste Stelle, gefolgt vom Schutz von Betriebsstätten und die Aufrechterhaltung der Produktion. (4) Anders als bei den Totenzahlen „explodierte“ die Geldsumme der durchschnittliche Sachschadenverlust förmlich, denn im Vergleich zu vor 50 Jahren ist dieser heutzutage 6- bis 7- mal so hoch. Ursachen dafür gibt es mehrere, z.B. kann eine steigende Wertdichte (EUR/m²), zunehmende Verwendung von Stoffen mit hohem Heizwert und vor allem, Folgeschäden genannt werden. Einen wesentlichen Teil der Kosten entstehen durch Abbrucharbeiten,

¹ Eine Ausnahme ist das Jahr 2000 durch das Unglück in Kaprun, mit 153 Toten.

Geruchsneutralisierung, Löschwasserbeseitigung und Entfeuchtung, da Brände zumeist konventionell mittels Flüssigkeiten gelöscht werden.

Leider gibt es österreichweit keine einheitliche Statistik, jedoch werden jährlich Zahlen von den Bundesverhütungsstellen der einzelnen Bundesländer (BVS) und durch den Versicherungsverband Österreich (VVÖ) veröffentlicht. Zusätzlich können Informationen aus dem Sicherheitsinformationszentrum (SIZ) bezüglich Brände bezogen werden. Eine weitere wertvolle Basis ist die jährliche Statistikauswertung der Internationalen Vereinigung des Feuerwehr- und Rettungswesens (CTIF), da hier viele Daten aus unterschiedlichen Ländern dargestellt und verglichen werden. (5)

Wie erwähnt sind zwar die Totenzahlen rückläufig, jedoch ist die Alpenrepublik im internationalen Vergleich mit 2,6 auf Platz 1, bezogen auf die mittlere Anzahl an Gebäude- und Transportbrände je 1.000 Einwohner. (5) Insofern ist ein positiver Trend in Sachen Personensicherheit gegeben, dennoch ist das Thema Brandschutz in Österreich präsenter denn je.

1.1 Problemstellung

Die Zahlungsleistungen amerikanischer Versicherungen haben ergeben, dass die Geldsumme auf Grund von Wasserschäden etwa viermal so hoch, als die eigentlichen Brandschäden sind. (7) Damit ist klar, dass die mit der Brandlöschung verbundenen Mehrschäden und negative Umweltauswirkungen einen wesentlichen Aspekt darstellen. Womit Löschmittelzusätze, welche die Wirksamkeit von Wasser verbessern sollen, zunehmend an Bedeutung gewinnen. (6)

Feuerwehren stehen dabei eine Vielzahl von Zusätzen zur Verfügung. Bei tragbaren Feuerlöschern sind Zusätze bereits länger im Einsatz, wodurch eine Weiterentwicklung in Richtung Anwendungsbereich mit Großbrandszenario, durchaus Sinn macht, z.B. bei Industrie- oder Waldbränden, sowie bei Bränden in Abfallbehandlungsanlagen. (8)

Nun ist es aber schwierig die tatsächlichen Löschleistungen objektiv gegenüberzustellen, um sinnvolle Aussagen bzw. Bewertungen zu geben. Zwar sind die Zusammensetzungen auf chemischer und ihr Verhalten auf physikalischer Basis bekannt, jedoch gibt dies wenig Aufschluss über die Effizienz im Einsatz.

Holger de Vries stellt dazu fest: „Es gibt in Deutschland keine Prüfnorm für Schaummittel, in der ihre Löschfähigkeit für Brände fester, glutbildender Stoffe definiert ist und anhand der sie überprüft werden können.“ (8)

Die Feststellung von de Vries gilt nicht nur für Schaummittel, sondern auch für additive Stoffe, welche dem Wasser beigemischt werden. Tenside oder hinzugefügte Salze können die Löschleistung verbessern, jedoch fehlen dazu einheitliche Klassifizierungen. Unter Feuerwehren ist eine positive Wirkung mit Zusätzen im Realbrandfall bekannt, jedoch gibt es keine objektiv, wissenschaftliche Bewertung dessen. Die Ergebnisse beruhen dabei auf Gefühl und Erfahrung der brandbekämpfenden Person. Betriebsfeuerwehrmann, Mario Papst der Sappi Papier Holding GmbH, beschreibt den Einsatz von Löschmitteln als effektiv mit großer Praxisrelevanz, welche die Brandbekämpfung erheblich erleichtern. Wie einleitend beschrieben, ist das Thema Brandbekämpfung zu wichtig, um ein Klassifizierungsschema auf Erfahrungsberichte zu stützen. Unterschiedliche Auffassungen der Effizienz, bzw. verschieden gut angewendete Angriffstaktiken führen zu großen Diskrepanzen der Ergebnisse.

1.2 Zielsetzung

Mit dem Ziel die Effektivität von Löschmitteln reproduzierbar beurteilen zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit eine geeignete Durchführungsmethodik für Brand- und Löschversuche im Technikums-Maßstab entwickelt. Der Schwerpunkt wird neben der Auswahl von geeigneten Versuchsaufbauten und Messtechniken auf die Löschtechnik gelegt. Dabei soll der Löschangriff, im Gegensatz zu bisher bekannten Norm-Versuchen, möglichst reproduzierbar und unabhängig von der löschenden Person gestaltet werden. Die mittels Messaufzeichnungen gewonnenen Ergebnisse werden auf die Möglichkeit einer quantitativen Beurteilung überprüft, um so eine Aussage über die Löscheffizienz der Löschmitteln zu erhalten.

2 Theoretische Grundlagen

Bevor eine detaillierte Planung, bzw. Versuchsdurchführung erarbeitet wird, ist es sinnvoll sich mit dem bestehenden Wissensstand auseinanderzusetzen. Die folgenden Punkte sollen einen Einstieg in die Thematik bringen, um Schlussfolgerungen besser verstehen zu können und um weitere Herangehensweisen strukturiert zu gestalten. Dabei soll ein Überblick an Grundlagen erklärt werden, welche sich in Kategorien wie Entstehung eines Feuers, Verlauf von Bränden und deren Bekämpfung unterteilen lassen. Zusätzlich sollen Ergebnisse von verschiedenen Forschungsinstituten und bestehendes Knowhow am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Montanuniversität Leoben (TPT) zusammengetragen werden, um daraus zu lernen.

Allgemein kann der integrale Brandschutz in zwei wesentliche Bereiche unterteilt werden. Als agierende Aufgabe soll der vorbeugende Brandschutz kurz beschrieben werden, welcher sich hauptsächlich mit den baulichen, technischen und organisatorischen Themen auseinandersetzt. Dabei werden z.B. Pläne für die Evakuierung, Verhütung und Alarmierung erstellt, um nur einige Aufgabenbereiche kurz zu erwähnen. Weitere Sicherheitsmaßnahmen wie die Einführung von Brandabschnitten, oder Löschanlagen können diesem Gebiet ebenso untergeordnet werden.

Der zweite wesentliche Bereich stellt der abwehrende Brandschutz dar, wo Feuerwehren eine wichtige Rolle spielen. Retten, Bergen und vor allem das Löschen sind Kernkompetenz und Schlüsselaufgaben in dieser Sparte des integralen Brandschutzes. (4) Tatsächlich verbringen Betriebsfeuerwehren jedoch verhältnismäßig wenig Zeit mit der aktiven Brandbekämpfung, da es im Regelfall nicht zu einem Ausbruch eines größeren Brandes kommen soll. Trotzdem ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung für den Ernstfall notwendig. Als zusätzliche Aufgabe zählt das Verringern von Begleitschäden, welche oft ein Vielfaches

des primären Brandschadens ausmacht. Darunter versteht sich unzureichende Statik und Wasserschäden bei Gebäuden, negative Umweltauswirkungen auf Grund des Löschmittels, oder Rauchschäden.

2.1 Brand

Um Brände möglichst sinnvoll und effektiv bekämpfen zu können, ist es notwendig die grundlegenden Mechanismen eines Feuers zu kennen. In einem weiteren Schritt, kann überlegt werden, wie diese Kenntnisse für einen guten Löschangriff nützlich sind. Als Basis dafür, wird das Branddreieck (auch Verbrennungsdreieck, siehe Abbildung 1) für illustrative Zwecke verwendet.

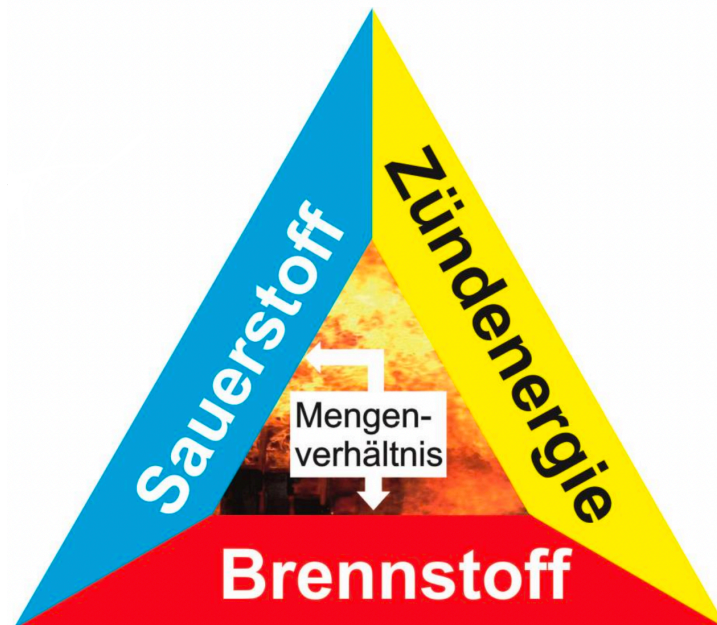


Abbildung 1: Branddreieck (4)

Allgemein müssen brennbarere Stoffe mit einem Oxidationsmittel im richtigen Mengenverhältnis vorliegen. Bei klassischen Haus- oder Industriebränden ist Luftsauerstoff das häufigste Oxidationsmittel. Zusätzlich muss eine Wärmequelle (intrinsisch, oder extern) genügend thermische Energie liefern, um entweder lokal den Flammpunkt (für Flüssigkeiten mit Dampfdruck) oder die Zündtemperatur zu erreichen. Unter dem Flammpunkt ist nach DIN V 14011, per Definition die niedrigste Temperatur, bei der sich über einer Flüssigkeit ein zündfähiges Dampf-Luft-Gemisch unter vorgeschriebenen Bedingungen bildet. (9) Anders bei der Zündtemperatur, wo eine Substanz jene Temperatur erreicht, ab welcher eine

Entflammung ohne externer Zündquelle, wie z.B. eines Funkens, möglich ist. Die Zündtemperaturen für relevante Substanzen dieser Arbeit, werden unter Tabelle 1 zusammengefasst

Tabelle 1: Zündtemperaturen für eine Auswahl an Brennstoffen (10) (11)

<i>Substanz</i>	<i>Zündtemperatur</i>
<i>Fichtenholz</i>	280 °C
<i>Kiefernholz</i>	280 °C – 340 °C
<i>n-Heptan</i>	220 °C

Als eine weitere wichtige Kenngröße, vor allem bei Löscheinsätzen, zählt die Mindestverbrennungstemperatur. Dies ist jener Temperaturzustand, bei welchem nach Abgabe der thermischen Verluste, durch Strahlung, Konvektion, und Wärmeleitung gerade noch genügend Energie für die Aufrechterhaltung eines selbständigen Brandes zur Verfügung steht. (12)

2.1.1 Brandstoffklassen

Wie bereits kurz angesprochen gibt es verschiedene Arten von Bränden, welche nach der deutsch-europäischen Norm DIN EN 2 mittels Großbuchstaben von A bis D und F eingeteilt werden. Diese Ausweisung, unter Abbildung 2 ersichtlich, wird z.B. verwendet, um den Einsatzbereich von tragbaren Feuerlöschern kenntlich zu machen. Generell jedoch, dient es allgemein dazu, das richtige Löschmittel für einen Brand zu wählen, um einen möglichst erfolgreichen Löschangriff zu gewährleisten. Das US-amerikanische Pendant zur deutsch-europäischen Normung wird durch die National Fire Protection Association (NFPA) nach NFPA 10 dargestellt. Abbildung 2 zeigt die Ähnlichkeiten, bzw. Unterschiede der beiden Systeme mit den dazugehörigen Löschmitteln. Für die Klassifizierung in Österreich ist die ÖNORM EN 2-Brandklassen in Anlehnung an die EN-Norm zuständig. (13) (14) (15)











Brandklassen nach DIN EN 2	Brandklassen nach NFPA 10	Bevorzugte Löschmittel
Feste, glutbildende Stoffe 	 Feste, brennbare Stoffe	Wasser, Schaum, ABC-Pulver, Retarder
Brennbare Flüssigkeiten 	 Brennbare Flüssigkeiten und Gase („Fluide“)	Schaum, ABC-Pulver, BC-Pulver
Brennbare Gase 		ABC-Pulver, BC-Pulver
Brennbare Metalle 	 Brennbare Metalle	Metallbrandpulver, Sand, Graugußspäne
(früher nach DIN: Brandklasse E) -	 Elektrische Geräte und Anlagen	Entsprechend der Brandklasse des jeweiligen Brandgutes
Speiseöle/-fette (pflanzliche oder tierische Öle und Fette) in Fritier- und Fettbackgeräten und anderen Kücheneinrichtungen und -geräten 	 Inhaltlich wie EN	Wie Brandklasse B; die Brandklasse F hat für die Feuerwehr keine praktische Bedeutung

Abbildung 2: Brandklassen nach DIN EN 2 und NFPA 10 und Löschmittel (8) (13)

Bei Metall-, oder Öl- und Fettbränden ist Vorsicht geboten, da hier kein Wasser für einen Löschangriff verwendet werden darf. Auf Grund der hohen Temperaturen bei einem Metallbrand kann es zur Aufspaltung der Wassermoleküle kommen, wodurch ein explosionsfähiges Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch (Knallgasreaktion) entstehen kann. Ab Ölbränden über 100 °C kommt es zur schlagartigen Verdampfung des flüssigen Wassers. Diese Verdampfung kann große Mengen an Wasserdampf freisetzen, wodurch das heiße/brennbare Öl mitgerissen wird. Durch die zusätzliche Oberfläche der Öl-Tröpfchen entstehen gefährliche Stichflammen.

In weiterer Folge werden ausschließlich Brände der Brandstoffklasse A behandelt, also feste, glutbildende Stoffe wie Kiefern- oder Fichtenholz. Die ausgewiesenen bevorzugten Löschmittel sind lediglich eine Hilfestellung für Einsatzkräfte, wobei die tatsächlich verwendeten Mittel vom Vorschlag, auf Grund örtlicher Gegebenheiten, abweichen können.

2.1.2 Brandverlauf

Abbildung 3 zeigt einen klassischen, zeitlich abhängigen Temperaturverlauf eines Zimmerbrandes. Zwar beschreibt dies einen Brandvorgang in einem geschlossenen Raum, jedoch ist diese Grafik anschaulich, um einen Krippenbrand zu beschreiben. Es ist dabei zu erwähnen, wie unter Punkt 2.1.1 beschrieben, dass es verschiedene Arten von Bränden gibt,

welche unterschiedliche Wärmefreisetzungsraten haben und damit verbunden, verschiedene Temperaturdiagramme aufweisen. Es soll also lediglich für die Schaffung eines Überblickes dienen, da der Brandverlauf während der Hauptversuche dieser Arbeit zu Beginn eine Kombination aus einem Lachen- und Feststoffbrand ist.

Charakteristisch für Brände der Klasse A ist, nach einer Entwicklungsphase, ein ausgeprägter Feuersprung (Englisch: Flashover, kurz: F/O) mit starker Flammenbildung. Ohne aktivem Löscheinsatz beginnt die dritte Phase, wobei die Temperatur auf einem hohen Niveau bleibt. Der vorhandene Brennstoff oxidiert dabei in einer exothermen Reaktion, wodurch eine Gewichtsabnahme bemerkbar wird. Abhängig von Größe, Temperatur, Oxidationsmittel, Durchmischungsrate und der Reaktionskinetik, kann die dargestellte Kurve variieren.

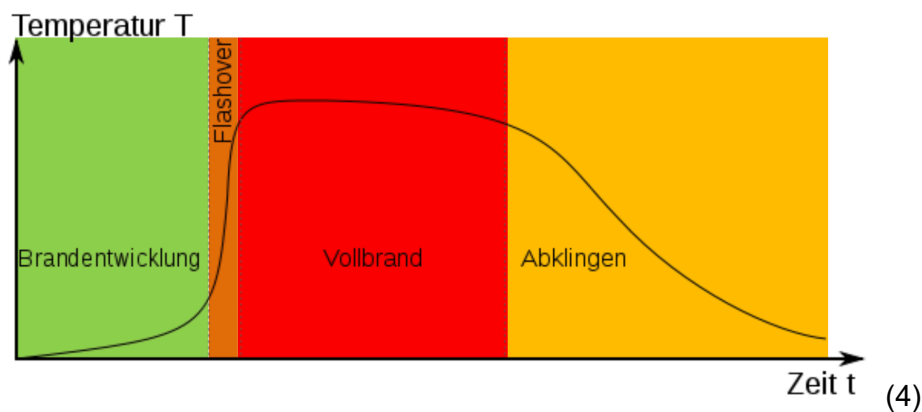


Abbildung 3: Brandverlauf (4)

2.1.3 Brandkenngrößen

Zusätzlich zu den im Punkt **Error! Reference source not found.** beschriebenen Temperaturpunkten (Zündpunkt, Flammpunkt, etc.) gibt es noch weitere wichtige Brandkenngrößen, die besprochen werden. Zweifellos eine der wichtigsten Parameter in der Wärmetechnik, stellt der Heizwert da. Dabei wird jene thermisch nutzbare Energiemenge beschrieben, welche bei einer Verbrennungsreaktion vorliegt, wenn es nicht zu einer Kondensation der Abgase und des Wasserdampfes kommt. Der Heizwert H_i (inferior) wurde früher auch als unterer Heizwert benannt. Der Brennwert H_o , oder oberer Heizwert, stellt im Wesentlichen ähnliches dar, nur dass die Verdampfungsenthalpie und eine Temperaturabnahme bis 25 °C noch dazugerechnet werden. Es ist also genau der absolute Betrag der Standardverbrennungsenthalpie $\Delta_v H^\circ$ der allgemeinen Thermodynamik. Beide Werte können aus Brennstoffanalysen bezogen werden und sind wichtige Kenngrößen hinsichtlich des Brandschutzes. (16)

Der Abbrand (m) kann durch Subtrahieren der anfänglichen Gesamtmasse mit dem Rückstand nach einem Brand, errechnet werden. Es ist also jene Holzmenge, welche auf Grund der exothermen Verbrennungsreaktion bei vollständiger Verbrennung in die Gasphase übergeht, oder als Staub und Ruß entfernt wird. Die Abbrandrate (\dot{m}) ist weiter jene Masse an Brennstoff, welche in einer gewissen Zeit verbrennt. (17)

Eine weitere wichtige Kenngröße, vor allem im Brandschutz, ist die Wärmefreisetzungsrate (\dot{Q} , Englisch: Heat Release Rate, HRR), wobei es zur Feststellung verschiedene Möglichkeiten gibt (18):

- **Feststellung über den Massenverlust (Gewichtsmessung)**
- Konvektive Kalorimetrie (Temperaturmessung, Energiebilanz)
- Spezies basierte Kalorimetrie (Gewichtsmessung, Massenbilanz)
- Verbrennungswärme und Energiekonstante (Bombenkalorimeter)
- Sauerstoffverbrauchskalorimetrie (O_2/CO_2 -Messung)

Auf Grund der einfachen Messbarkeit der Masse und der Möglichkeit eine Brennstoffanalyse durchführen zu können, werden die Wärmefreisetzung (Q) und die Wärmefreisetzungsrate (\dot{Q}) wie folgt berechnet:

$$Q = H_i * m \quad (2-1)$$

$$\dot{Q} = H_i * \dot{m} \quad (2-2)$$

Hierzu wird die Abbrandrate über den Massenverlust gemessen, welcher an einer Waage unterhalb der Brandkonstruktion aufgezeichnet wird. Durch die Multiplikation mit dem Heizwert kann so die Wärmefreisetzungsrate bei vollständiger Verbrennung bestimmt werden. Laut Bibeau ergibt eine Unsicherheitsanalyse dieses Verfahrens einen Fehler kleiner 10%, da natürlich Brandrückstände auf der Waage verbleiben. (18)

2.2 Löschung

Um einen Brand erfolgreich zu löschen, können verschiedene Methoden angewandt werden, diese lassen sich in vier grundlegende Effekte gliedern. Tabelle 2 gibt einen Überblick darüber, zusätzlich sind Kombinationen der verschiedenen Verfahren möglich und oft sinnvoll.

Tabelle 2: Löscheffekte (8)

Trennen	Trennung des Brandgutes mit Luftsauerstoff, oder von anderen Atmosphären, welche die Verbrennung fördern
Kühlen	Abkühlen des Brennstoffes unter die Mindestverbrennungs-Temperatur
Inhibition	Hemmung, Störung, oder Unterbrechung der Verbrennungs-Kettenreaktion
Erstickung	Verringerung der Sauerstoffkonzentration unter den für die Verbrennung erforderlichen Grenzwert

Die Inhibition, auch Störung der chemischen Reaktion, ist ein antikatalytischer Vorgang, bei welchem die Verbrennung behindert oder unterbrochen wird. Dabei werden z.B. Brandzwischenprodukte (Radikale) gebunden.

In Tabelle 3 sollen nun übliche Löschmittel zu den oben beschriebenen Effekten zugeteilt werden. Prinzipiell gibt es Mittel in allen 3 Aggregatzustände, wobei Netzmittel, Schaum und Retardants jeweils mit Wasser vermischt werden müssen, um ihre volle Wirksamkeit zu zeigen. Generell gibt es eine Hauptlöschwirkung und zusätzlich meist noch eine Nebenlöschwirkung.

Tabelle 3: Löschmittel und deren Löscheffekte

Löschmittel	Löscheffekt
Wasser	Kühlen, also Hochdrucknebel: Inhibition
Netzmittel	Kühlen
Schaum	Trennen, Kühlen, Ersticken
Löschgase	Ersticken, Inhibition
Trockenlöschmittel	Trennen, Inhibition
Retardants	Kühlen, Inhibition

Auf Grund der günstigen Beschaffung, pH-Neutralität, Umweltverträglichkeit und äußerst geeigneten Löscheigenschaften ist Wasser das häufigste verwendete Löschmittel. Laut einer

Studie aus dem Jahr 1978 (19) wurden bei 93,8 % aller Einsätze des Geltungsbereiches mit reinem Wasser gelöscht, der Rest teil sich auf 3,7 % Wasser und Pulver, bzw. 2,5 % Wasser und Schaum auf. Die hohe Wirksamkeit des reinen Löschmittels Wasser, kann auf die hohe spezifische Wärmekapazität von 4,19 kJ/kgK und die Verdampfungsenthalpie von 2,26 MJ/kg (unter isobaren Verhältnissen, bei 100 °C und 1013 mbar) zurückgeführt werden. Wasser weist dadurch eine hervorragende, kühlende Wirkung als Hauptlöscheffekt auf, da es einem Brand viel Wärme entziehen kann.

Unabhängig von einem geeigneten Löschmittel ist es essenziell gut ausgebildetes Personal mit passender Löschtaktik einzusetzen, um zu einem Löscherfolg zu kommen. Wie diese Arbeit mit unter zeigen wird, ist vor allem das richtige Löschen maßgeblich dafür, ob ein Brand gelöscht werden kann. Abbildung 4 fasst die wesentlichen Parameter für einen gelungen Löscherfolg zusammen.

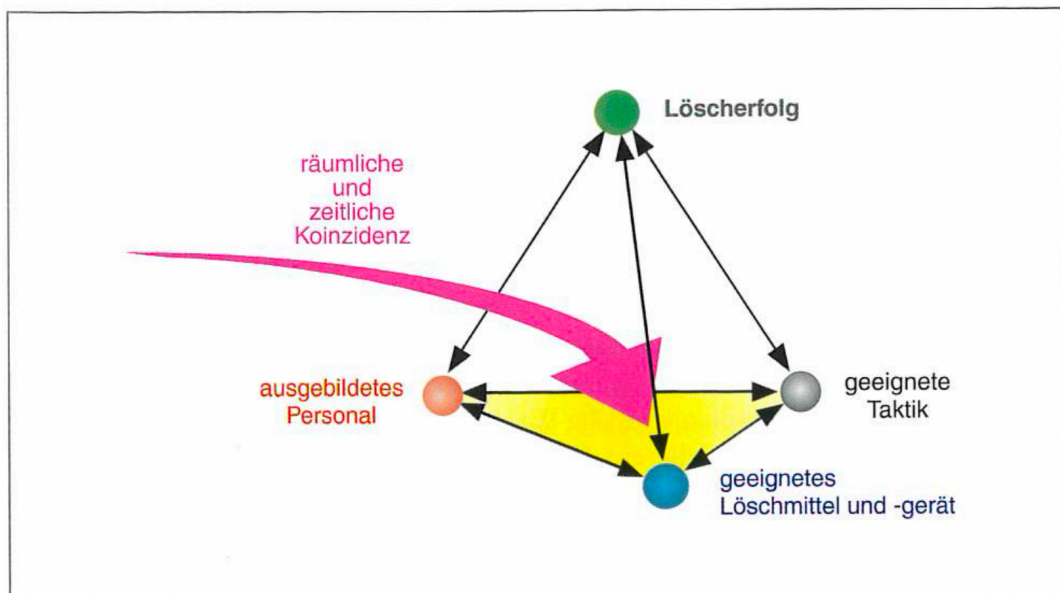


Abbildung 4: Löschtetraeder nach Wackerhahn und de Vries (8)

2.2.1 Löschmittel

Um die Löschwirkung von Wasser zu erhöhen, kommen häufig wässrige Lösungen, welche zum Großteil ($\geq 80\%$) aus Wasser bestehen, zum Einsatz. In der Literatur werden diese auch oft als „wässrige Löschmittel“ bezeichnet. Dabei können Wasser und Mittel entweder vorab in Tanks, oder anderen Löschbehältern vermischt werden, oder direkte in Mehrzweck-Strahlrohren. Die angegebene Menge wird durch die sogenannte Zumischrate festgelegt (20). Weiter kann eine Unterteilung nach chemischem und physikalischem Zustand durchgeführt

werden, um die Wirksamkeit der Zusätze besser zu verstehen. Folgende Zusätze finden in der heutigen Löschtechnik immer öfter ihren Einsatz:

- Schaummittel-Zumischung als Netzmittel/Netzwasser

Tenside oder Tensid-Gemische sorgen für eine Verringerung der Oberflächenspannung. Ein guter Wärmeübertragungskoeffizient (abhängig von Dichte, dyn. Zähigkeit, spez. Wärmekapazität, Druck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Oberflächengeometrie) zwischen Löschmittel und Brandgut ist essenziell für einen schnelle und effizienten Löschangriff. (21) Wasser mit einer hohen Oberflächenspannung im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten, neigt dazu sich zu größeren Tropfen zu verbinden, was die Löschleistung erheblich hemmen kann. In geringen Mengen sorgen also Schaummittel dafür, dass das Brandgut besser mit Löschmittel benetzt wird, um kühlend zu wirken. (8)

- Gelbildner

Diese werden vor allem bei Einsätzen wo eine hohe Viskosität des Löschmittels erforderlich ist und eine damit verbundene gute Haftfähigkeit, eingesetzt. In Emulsion vorliegende Superabsorber wirken ähnlich Brand erstickend wie Schäume, nur dass diese deutlich stabiler und langanhaltender als Schaumteppiche sind. Solange Wasser in großen Mengen vorliegt, ist es nicht sinnvoll Gele zu verwenden, da der Kostenfaktor eine Rolle spielt. Der geringere Wasserverbrauch unter Zuhilfenahme von Gelbildnern kann jedoch bei gewissen Anwendungen sehr hilfreich sein. (8)

- Retardants

Dieser Löschmittelzusatz vereint verschiedene Vorteile, vor allem bei der Brandbekämpfung von Vegetationsbränden (großflächige Waldbrände). Eine rote Färbung des Mittels aus Eisenoxid hilft, beim Einsatz mit Flugzeugen oder Hubschraubern, die bereits gelöschten Regionen leichter zu erkennen. Es dient in gewisser Weise als Kontrastmittel gegenüber den umliegenden Grünflächen. Diverse Bestandteile wie Ammoniumsalze, Harnstoff, Phosphate und Sulfate ergeben eine verdunstungshemmende Eigenschaft, welche den Siedepunkt des Wassers erhöht. Somit entsteht einerseits weniger Wasserdampf, was vorteilhaft für die Brandbekämpfung aus der Luft ist und andererseits können so größere Wärmemengen gebunden werden. Zusätzlich wirken die Salze als Inhibitoren und binden bei der Verbrennung entstehende Radikale. Dadurch kann die Verbrennungskettenreaktion unterbrochen werden. (8)

2.3 Automatisierte Laborlöschvorrichtung

Als Ausgangspunkt weiterer Recherche- und Entwicklungsarbeiten, dienen am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik gewonnene Erkenntnisse für Brände im Labormaßstab. Gregor Ohrenberger forschte in seiner Masterarbeit: „Erarbeitung einer Versuchsmethodik zur Bewertung der Löschwirkung von Löschmittelzusätzen“, bereits 2017 zu diesem Teilgebiet des Brandschutzes. (22) Darauf aufbauend, konnte eine automatisierte Löschvorrichtung für Brandversuche im Labor entwickelt und gebaut werden. Eine detaillierte Beschreibung kann meiner Bachelorarbeit: „Entwicklung einer automatisierten Löschvorrichtung für Brandversuche im Labormaßstab“ entnommen werden (23). Matthias Grimm führte in seiner Bachelorarbeit weitere Versuche, mit der unter Abbildung 5 ersichtlichen Anlage, durch (24). Mit dieser Anlage ist es möglich Experimente von der Zündung bis zur erfolgreichen Löschung, ohne menschliches Einwirken, durchzuführen.



Abbildung 5: Aufbau der automatisierten Laborlöschvorrichtung (24)

Es wurden wertvolle Erfahrung zu Themen wie Brandlast, Entzündung der Holzkrappe und den Löschverfahren gewonnen, welche maßgeblich für die Planung dieser Versuche im Technikums-Maßstab waren.

2.4 Brände im Technikums-Maßstab

Im Jahr 1929 wurden im US-Bundesstaat Ohio bereits systematische Brandversuche zur Evaluierung der Löscheffizienz, bei Zugabe von Kaliumcarbonat zu Wasser, durchgeführt. Ursprünglich war das Hauptproblem der Transport der gelösten Chemikalien zu den Brandherden. Durch die Entwicklung von fortgeschrittenen Transportmöglichkeiten (Tanklastwagen, Motoren und Rucksackpumpen) war der nächste, logische Schritt die Feuerunterdrückungsmöglichkeit des Löschmittels zu erhöhen. Insgesamt 12 Löschversuche wurden durchgeführt, wobei eine nicht bewirtschaftete Agrarfläche aus Gras und hohem Unkraut in flächengleiche Parzellen aufgeteilt wurde. Nach der Entzündung wurden die Brandflächen systematisch sechsmal mit Wasser, bzw. sechsmal mit den chemischen Substanzen gelöscht. Als Bewertungskriterien sind, einerseits die benötigte Löschdauer und andererseits das Gewicht des verbrauchten Löschmittels angegeben. Zusätzlich sind bei jedem Versuch die gemessenen Windgeschwindigkeiten angeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Zugabe von Salzen nicht nur die Löschzeit, sondern auch die eingesetzte Löschmittelmenge reduziert werden können. (25)

Das US-amerikanische Institut für Agrikultur, durchgeführt von der Intermountain Research Station der Universität von Minnesota veranstaltete in den 90-jahren Brandversuche zur Feststellung der Löscheffektivität bei Zugabe von geringen Mengen an Mono-Ammonium Phosphaten. Als Brandlast würden dabei Ponderosa-Kiefernadeln als Bett, in einem Windtunnel mit einem Wind von 5 Meilen pro Stunde, entzündet. Die angewandte Löschtaktik soll dabei einen Löschangriff aus der Luft (Löschflugzeug) nahekommen. Analysiert wurde die Wirksamkeit der Retardents anhand der Brandgewichtsabnahme und der Wiederentflammungsrate. Abbildung 6 zeigt schematisch den verwendeten Aufbau mit Löschmittelapplizierung von Oben. (26)

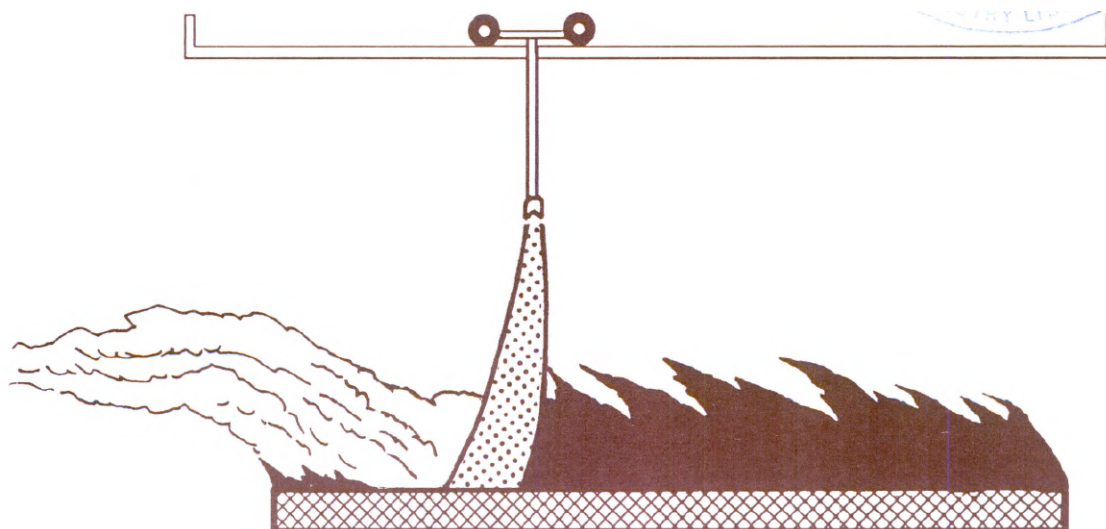


Abbildung 6: Schematischer Versuchsaufbau von Blakely zur Löschung von brennenden Kiefer - Nadelbeeten (26)

Einen wesentlichen Teil zur Entwicklung eines geeigneten Testverfahrens zur Feststellung von Löscheffekten mittels Schaummitteln und verschiedenen Löschangriffen, hat Rappsilber et al. in den Arbeiten aus den Jahren 2018 und 2019 beigetragen. Zwar beschäftigt sich sein Team hauptsächlich mit Klasse A-Schäumen, jedoch kann wertvolle Erfahrung aus seinen Veröffentlichungen genommen werden. (27) (28)

Abbildung 7 zeigt eine Skizze um eine Holzkrippe von allen Seiten kontrolliert zu löschen. Als Brandlast der Klasse A wurde diese mit diversen Kunststoff-Bestandteilen versehen, um einen Zimmerbrand zu imitieren. Beim systematischen Löschantritt wird dem Löschpersonal kein Freiraum für die Löschwasserapplizierung gelassen. Die Bewegungen der Düse müssen versuchsübergreifend möglichst konstant gehalten werden. Es ist nachvollziehbar, dass ein geübter Löschantritt wesentlich schneller zum sogenannten „Brand Aus“ führt als ein Löschantritt einer ungeübten Person. Bei diesen Versuchen soll jedoch nicht die Löschfertigkeit der versuchsdurchführenden Person, sondern die Effektivität der eingesetzten Löschmittel, getestet werden.

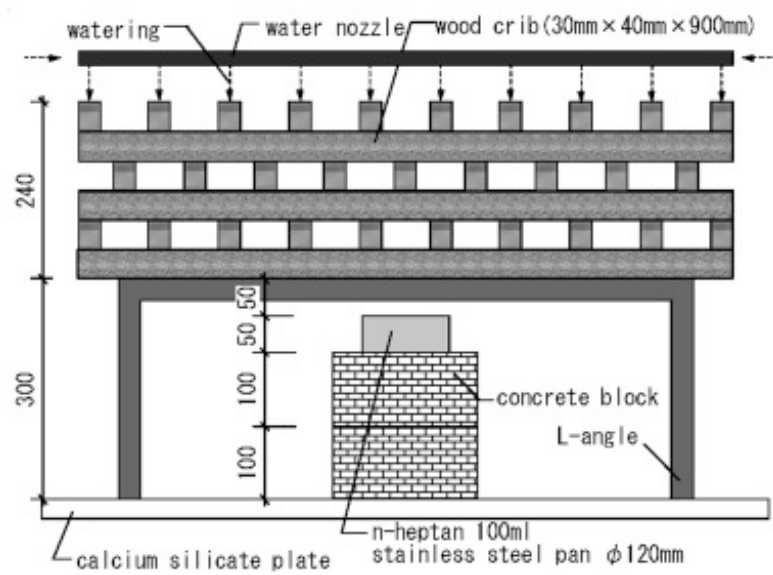


Abbildung 8: Schematischer Versuchsaufbau mit Löschvorrichtung, nach Noaki et al. (29)

3 Versuchsplanung

Folgend wird die Entwicklung eines Brandversuches im Technikums-Maßstab für Brände der Klasse A beschrieben. Überlegungen umfassen die verwendete Brandlast und die eingesetzte Löschtaktik. Einerseits soll ein modifizierter, normgerechter Brandversuch mit einer Brandlast nach DIN EN 3-7 (20) in Erwägung gezogen werden und andererseits eine kostengünstigere Variante entwickelt werden. Eine detaillierte Planung soll Fehler vermeiden und gleichzeitig Kosten sparen. Weiter soll der Einsatz von unterschiedliche Löschmittel zur Feuerbekämpfung geplant werden.

3.1 Brandlast

Die Entscheidung Holz als Brandlast zu verwenden, ergibt sich auf Grund der flammen- und glutbildenden Eigenschaften dieses Materiales. Holzbrände spielen im abwehrenden Brandschutz weiterhin eine große Rolle, zudem beruhen viele Brandversuche auf einer Holz-Brandlast, z.B. in Form einer Krippe, wie unter Punkt 2.4 näher beschrieben. Da die Verfügbarkeit bei Neuware und Gebrauchtgüter gegeben ist, wurde die Wahl der Brandlast mit Holz begründet. Ein wesentlicher Nachteil dieses Naturproduktes ist, die Inhomogenität und die damit verbundenen unterschiedlichen Brandverhalten, vor allem bei der Flammenbildung. (20) (27)

Um eine Vergleichbarkeit zwischen normgerechten Holzkrippen und handelsüblichen Gebrauchsgütern schaffen zu können, wurden zwei unterschiedliche Brandlasten und Aufbauten verwendet. Sollten Holzpaletten von der Qualität ähnliche Ergebnisse liefern, ist mit

einer wesentlichen Kosteneinsparung zu rechnen. Zudem können auch unterschiedliche Brandlastgrößen realisiert werden.

- **5A-Holzkippe**

Laut Norm wird dabei ein Holzstapel, wie unter Abbildung 9 gezeigt, auf einem Metallgestell positioniert. Für einen Brand mit dem Kurzzeichen 5A, ist eine Holzstablänge von 500 mm vorgesehen. Längs- und Querstäbe weisen dieselben Maße auf, wodurch sich ein quadratischer Aufbau ergibt. Die Holzstäbe müssen aus Pinus silverstris (Kiefer) gefertigt sein und einen Feuchtegehalt von 10 bis 15 Ma.-% aufweisen. Die Stäbe müssen gesägt sein und einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 39 ± 2 mm haben. Zusätzlich muss die Dichte des Holzes $0,40 \text{ kg/dm}^3$ bis $0,65 \text{ kg/dm}^3$ betragen. Für das in den 5A-Holzkippen-Versuchen verwendete Holz wurden diese Parameter eingehalten.

EN 3-7:2004+A1:2007 (D)

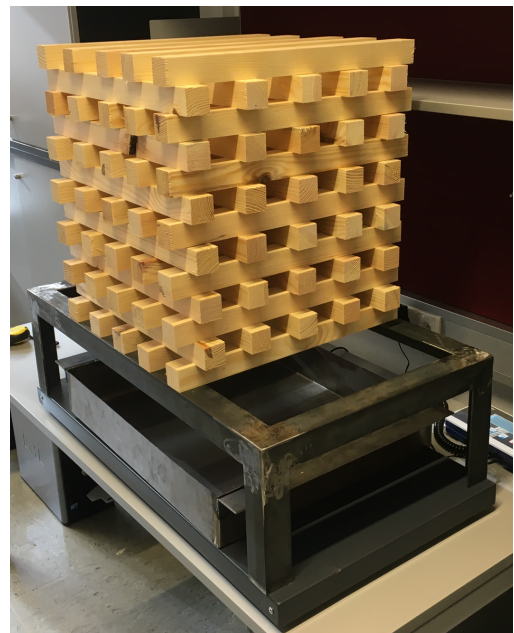
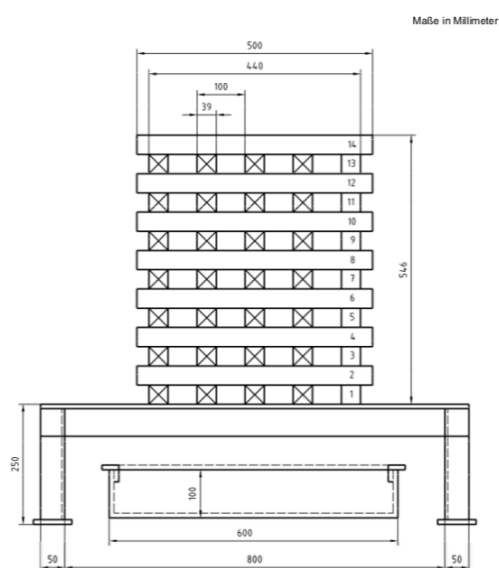


Abbildung 9: 5A-Holzkippenaufbau, links schematische Skizze (15), rechts: fotografische Abbildung der Brandlast für die Versuche

- **Holzpaletten**

Die in Abbildung 10 gezeigten Fichtenholzpaletten (handelsübliche Holzpaletten) wurden nicht weiter konditioniert, jedoch vor der Entzündung trocken gelagert (Hallenlagerung

unbeheizt). Ein wesentlicher Unterschied ist die Größe, bzw. das Gewicht der Brandlast im Vergleich zum Holzkrippenaufbau. Die Längen- und Breitenmaße betragen jeweils 110 cm, wodurch auch bei diesen Versuchen ein quadratischer Aufbau entsteht. Insgesamt wurden 5 Paletten jeweils um 90° verdreht aufeinandergestapelt.

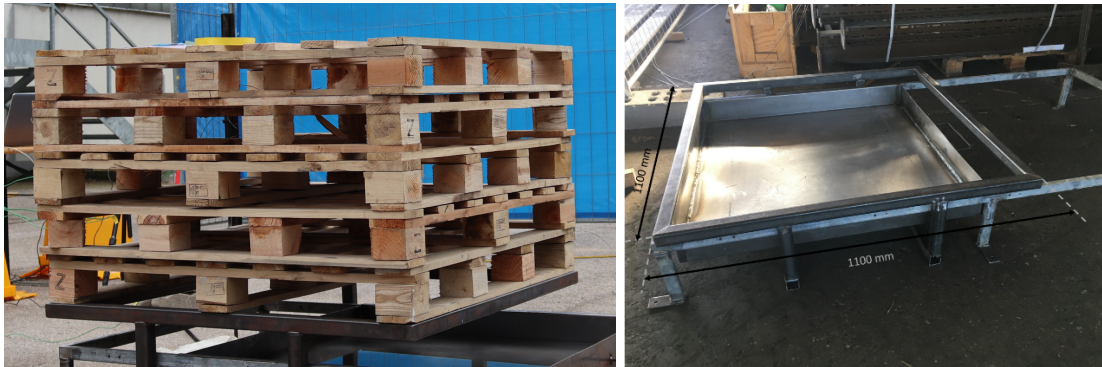


Abbildung 10: links: Abbildung der Holzpaletten Brandlast, rechts: Prüfobjekt für die Holzpaletten

3.1.1 Entzündung

Abgesehen von einem normgerechten Aufbau, standen mehrere Entzündungsmöglichkeiten zur Auswahl. So z.B. werden Laborversuche am TPT, mit einem Gasbrenner und einer rotierenden Scheibe entzündet. Dies hat wesentliche Vorteile hinsichtlich eines automatisierten Versuchsablaufes, jedoch ist diese Art der Entzündung schwer skalierbar. (23) Sowohl in der Literatur, also auch in der Norm werden Holzkrippen mit einem flüssigen Brennstoff in einer Zündwanne entzündet. Für beide Varianten wird daher ein Film aus n-Heptan auf einem 30 mm hohem Wasserbecken für die Entzündung verwendet. Da Heptan eine geringere Dichte als Wasser aufweist, schwimmt der Flüssigbrennstoff auf. Das Wasser dient für eine gleichmäßigen Verteilung in der Wanne. Tabelle 4 fasst die wichtigsten Eigenschaften des Entzündungsmediums laut Norm zusammen. Das für die Versuche verwendete Heptan weist Werte auf, welche den Vorgaben entsprechen, im Rahmen dieser Arbeit aber nicht geprüft wurden.

Tabelle 4: n-Heptan Reinheitswerte nach EN 3-7:2004 I.3.2

Destillationskurve	84°C bis 105°C
Differenz zwischen Anfangs- und Endpunkt	≤ 10°C
Aromaten Anteil	≤ 1%
Dichte bei einer Temperatur von 15°C	0,68 bis 0,72 kg/dm ³

3.1.2 Prüfobjekt

Das Prüfobjekt setzt sich im Wesentlichen aus zwei Teilen zusammen. Ein Metallgestell bildet die Unterkonstruktionen und stützt die Brandlast. Wie bereits erwähnt, dient eine Wanne als Behälter für das Heptan. Zusätzlich werden jeweils eine Blechplatte, mit den gleichen Maßen wie die Zündwannen hergestellt, um den Heptan-Brand zu definierten Zeitpunkten ersticken zu können. Dabei werden diese auf den Zündwannen positioniert, um die Sauerstoffzufuhr zu unterbinden und so die Vorbrennzeit zu steuern, damit die eingebrachte Zündenergie gleichbleibt.

- **5A-Holzkrippe**

Für diese Versuchsreihe wurde eine Zündwanne mit 600 x 500 mm (Länge x Breite) und einer Tiefe von 100 mm aus Stahl geschweißt. Um die Seitenflächen der Holzkrippe gut entzünden zu können, ist die Wanne 100 mm breiter als die Holzkrippe. Zusätzlich wurde ein Prüfobjekt aus einem Winkelstahl (Länge x Breite, 50 x 50 mm) nach ISO 657-1 verwendet, um das Gestell zu realisieren.

- **Holzpaletten**

Da die Palette eine wesentlich größere Grundfläche aufweist, ist es notwendig eine passende Unterkonstruktion zu erstellen. Im Wesentlichen weist das Prüfobjekt der handelsüblichen Holzpaletten, dieselben Merkmale wie das Prüfobjekt der 5A-Holzkrippen auf. Die Maße können dem Bild entnommen werden, wobei die Tiefe der Blechwanne wieder mit 100 mm beschaffen ist.

3.2 Wannensbrandversuche

Zur Eruiierung der notwendigen Menge an Heptan wurden am 22.2.2021 Zündversuche am Übungsgelände der Freiwilligen Feuerwehr St. Peter – Freienstein, in der Steiermark, durchgeführt. Dabei soll laut Norm der flüssige Brennstoff für mindestens 2 Minuten in Vollbrand stehen, bevor die Zündwanne entfernt wird. Abbildung 11 zeigt die verwendetet Gerätschaft. Die Überlegung dabei ist, dass zuerst ein Kochtopf mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet wird, um so die notwendige Menge an Heptan für die Zündwannen

errechnen zu können. Dabei soll das Flächenverhältnis zwischen den beiden Objekten herangezogen werden.



Abbildung 11: Utensilien für Zündungsversuche für die Normkrippe

- **Erster Versuch mit Kochtopf**

Der Kochtopf wurde mit 500 ml Wasser aus einem Gartenschlauch gefüllt und anschließend 100 ml Heptan hinzugefügt. Nach Zündung der Lache mittels Gasflamme, konnte eine Brennzeit von exakt 2:00 Minuten festgestellt werden. Ein Abklingen des Brandes konnte auf Grund der geringen Menge an Heptan nicht erkannt werden. Da die Brennzeit mit der Berechnung nach dem Yellow Book: Methods for the calculation of physical effects due to release of hazardous materials von Seite 614 ff. nicht übereinstimmt, wurde nach der Trail & Error-Methode die Mengenbestimmung durchgeführt. Die Berechnungen sind für Lachenbrände größerer Dimensionen ausgelegt.

- **Versuche mit Zündwanne 1**

Für alle weiteren Versuche mit der Zündwanne 1 wurde die Wanne vorab 30 mm hoch mit Wasser gefüllt. Damit erreicht man eine optimale Nivellierung und schafft gleichzeitig eine gute Verteilung des Heptans.

Bei einem linearen Zusammenhang zwischen Lachenfläche, zu Brennzeit, würde, um dieselbe Brennzeit zu erreichen, bei einer 10-fachen Fläche auch die 10-fache Menge an Heptan benötigt werden. Dies bedeutet also, dass 2000 ml Heptan in die Zündwanne 1 eingefüllt werden müsste, um einen 120-sekündigen Brand herzustellen, da die Kochtopffläche

0,0314 m² im Vergleich zu 0,3 m² des Prüfobjektes 1 beträgt. Allerdings konnte bereits bei 1270 ml eine Brennzeit von 116 s erreicht werden, wodurch ein linearer Zusammenhang somit nicht gegeben ist. Um die Vorgaben der Norm zu erfüllen und mit Sicherheit einen vollständigen Brand für 120 s aufrecht zu erhalten, wurden Heptanmengen mit 1700 ml gewählt. Durch Abdecken nach 120 s wurde der Brand zeitgerecht erstickt.

Tabelle 5 soll einen Überblick der durchgeführten Versuche geben. Für alle weiteren Holzkrippenbrände wird daher eine Heptan Menge von 1700 ml genommen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche der Zündwanne für die Normkrippe

<i>Versuch</i>	<i>Lachen Fläche</i>	<i>Heptan Menge</i>	<i>Brennzeit</i>
[-]	[m ²]	[ml]	[s]
1. Kochtopf	0,0314	100	120
2. Zündwanne 1	0,3	500	60
3. Zündwanne 1	0,3	1270	116
4. Zündwanne 1	0,3	1700	120

- Versuche mit Zündwanne 2

Die Versuche mit der Zündwanne 2 für die Holzpaletten-Brände wurden am Versuchstag am Standort durchgeführt, da die zweite Zündwanne erst zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stand. In einem ersten Vorversuch (V1P) wurden 3000 ml Heptan zur Entzündung verwendet und nach 120 s abgedeckt. Da der nachfolgende Brand von insgesamt 6 Minuten zu einer instabilen Brandlast führte wurde das Heptanvolumen auf 2500 ml beschränkt. Dabei wurde die Flamme nicht gelöscht, sondern der Zeitpunkt der selbständigen Löschung notiert. Tabelle 6 zeigt für alle Paletten Brände die Dauer des Lachen Brandes. Beim Versuch ID V14P kam es aufgrund eines menschlichen Fehlers zu einer nicht korrekten Ablesung der Zeit. Mit Ausnahme dieses Versuches kann ein Mittelwert von 83,6 s und einer Standardabweichung von 2,8 s berechnet werden. Die Nummerierung der Versuche wird in Kapitel 5 näher beschrieben.

Tabelle 6: Heptan Brennzeiten für Paletten Versuche

<i>Versuchs ID</i>	<i>Heptan Volumen</i>	<i>Heptan Brennzeit</i>
<i>[-]</i>	<i>[l]</i>	<i>[s]</i>
V2P	2,5	80
V3P	2,5	82
V4P	2,5	81
V5P	2,5	87
V6P	2,5	87
V7P	2,5	84
V8P	2,5	82
V9P	2,5	79
V10P	2,5	86
V11P	2,5	85
V12P	2,5	84
V13P	2,5	87
V14P	2,5	91
<i>Durchschnitt</i>	2,5	84,2

3.3 Löschvorrichtung

Die Norm zur Klassifizierung von tragbaren Feuerlöschern beschreibt den Löschvorgang unter Punkt 1.3.2 (20) , nach Entzündung der Holzkrippe, folgendermaßen: „In diesem Moment betätigt die Bedienperson den Feuerlöscher und richtet den Strahl auf das Prüfobjekt, wobei sie sich **nach eigenem Ermessen** um das Prüfobjekt herumbewegen darf, um das beste Ergebnis zu erzielen.“

Es ist aus der Literatur und Lehrunterlagen von Feuerwehrverbänden bekannt, dass der Löschangriff essenziell für den Löscherfolg ist. Insofern ist ein willkürliches Vorgehen für einen reproduzierbaren Versuchsaufbau nicht zielführend, wie auch unter Punkt 2.4 beschrieben wird. Daraus entstand die Idee, den Löschvorgang noch weiter zu standardisieren, um den Faktor Mensch so gering als möglich zu halten. Wobei nun von einer Laborversuchseinrichtung, bei welcher dieser Vorgang bereits teilweise gelungen ist, in den realen Fall über zu gehen.

3.3.1 Aufbau der Löschvorrichtung

Abbildung 12 zeigt dabei die am Lehrstuhl entwickelte Löschvorrichtung. Dafür wurde ein 6 Liter ABF Dauerdruck-Schaum Feuerlöscher, aus Aluminium der Firma ANAF Group, modifiziert. Das Manometer wurde entfernt und mit einem Kugelhahn ersetzt. Dadurch bestand die Möglichkeit diesen mit verschiedenen Drücken zu beaufschlagen, umso den Volumenstrom des Löschmittels zu variieren. Die Möglichkeit den Feuerlöscher wieder zu befüllen, ist ideal zur Durchführung größerer Versuchsreihen geeignet. Löschmittelzusätze und Wasser können ohne aufwendige Zumischvorrichtung miteinander vermischt werden, da das Gemisch bereits vor dem Löschangriff im Behälter in fertiger Form vorlag. Zusätzlich wurde eine Drehscheibe, mit einem Rohr an einer L-Verbindung angebracht, um die Düse zu stabilisieren. Zwei Längsbohrungen mit verstellbaren Schrauben sorgten für den oberen, bzw. den unteren Anschlag. Damit konnte ein genauer Winkelbereich für den Löscheintritt definiert werden, um möglichst hohe Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Das L-Verbindungseisen wurde an einem Rohr angeschweißt, welches um die Stange eines Dreibeines passt. Zwei Flügelmuttern ermöglichten die Höhe der Aufhängung einfach zu variieren, um diese so auf die entsprechende Brandlast einzustellen. Eine weitere Flügelmutter, am vorderen Ende der Düsenhalterung, diente dafür, den Sprühkopf in Position zu halten. Das Gegentorsionsmoment der Schraube sorgte für die Fixierung der in Blau ersichtlichen Düse.



Abbildung 12: Sprühvorrichtung; links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Zur Befüllung mit Druck wurde für die Probeversuche zuerst Druckluft verwendet, da es einfach und schnell zugänglich war. Für die Realversuche wurde Stickstoff aus einer Flasche nach ISO 14175-N1 als Treibgas verwendet und mittels Druckminderer der Firma Messer (EN ISO 2503 konform) exakt eingestellt.

3.3.2 Sprühversuche

Um ein Gefühl für den Druck und den damit verbundenen Volumenstrom zu erhalten, wurden Sprühversuche durchgeführt. Dabei wurde der Feuerlöscher mit verschiedenen Wassermengen und Druckluft gefüllt. Anschließend wurde das Ventil vollständig geöffnet und die Zeit bis zum vollständigen Entleeren gemessen. Dieser Ausblasvorgang kann in zwei Teile unterteilt werden. Bei ersterem besteht der Löschstrahl ausschließlich aus Wasser, da keine Druckluft durch die Düse befördert wird. Zu diesem Zeitpunkt ist also noch genügend Wasser im Behälter vorhanden. Der zweite Teil beginnt, sobald ein Minimum an Füllhöhe erreicht wird, wodurch Wasser und Luft ausgeblasen werden. Dies war durch ein charakteristisches Geräusch (klassisches „Lehrblasen“ eines Wasserschlauches) hörbar. Tabelle 7 zeigt eine Versuchsreihe, wobei die Zeit ab Beginn des Geräusches abgestoppt wurde.

Tabelle 7: Ergebnisse der Sprühversuche mit einer 5 l Wasserfüllung

<i>Füllmenge</i>	<i>Druck</i>	<i>Löschzeit</i>	<i>Volumenstrom²</i>
[L]	[bar]	[s]	[L/min]
5	6	53	5,66
5	8	47	6,38
5	9	46	6,52

Es ist zu erwähnen, dass bei einem Feuerlöscher im täglichen Gebrauch die volle Kapazität von 6 l ausgenutzt wird. Die graduelle Abnahme des Volumenstromes mit der Zeit ist jedoch für die Durchführung von Brandversuchen ungeeignet. Mit einer 5 l – Füllung wurde ein geeignetes Verhältnis zwischen Löschmittel und Luftvolumen gefunden.

Nach den ersten Entleerungsversuchen wurde der Sprühstrahl und dessen Geometrie in Hinblick auf den Brand und den geeigneten Abstand untersucht. Die 5A-Holzkrippe weist zur Erinnerung eine maximale Breite von 500 mm auf, die Holzpaletten hingegen 1100 mm. Es soll möglichst der gesamte Stahl auf die Krippe gerichtet werden, ohne unnötig Löschmittel seitlich vorbeizuspritzen. Ein zu geringer Abstand zwischen Düse und Krippe, wäre ebenso kontraproduktiv, da so Regionen entstehen könnten, welche nie gelöscht werden.

Hierfür wurde die Düse in einer Höhe von 600 mm über dem Boden starr fixiert und das Ventil für 3 Sekunden geöffnet. Das Wasser hinterließ auf der trockenen Asphaltstraße einen sichtbaren Fleck, welcher für Abmessungen herangezogen werden kann. Abbildung 13 zeigt die Wassermarkierung am Boden in der Draufsicht.

² Genaugenommen ist der Volumenstrom eine Funktion der Zeit, welche mit fortschreitender Löschfähigkeit kontinuierlich abnimmt.

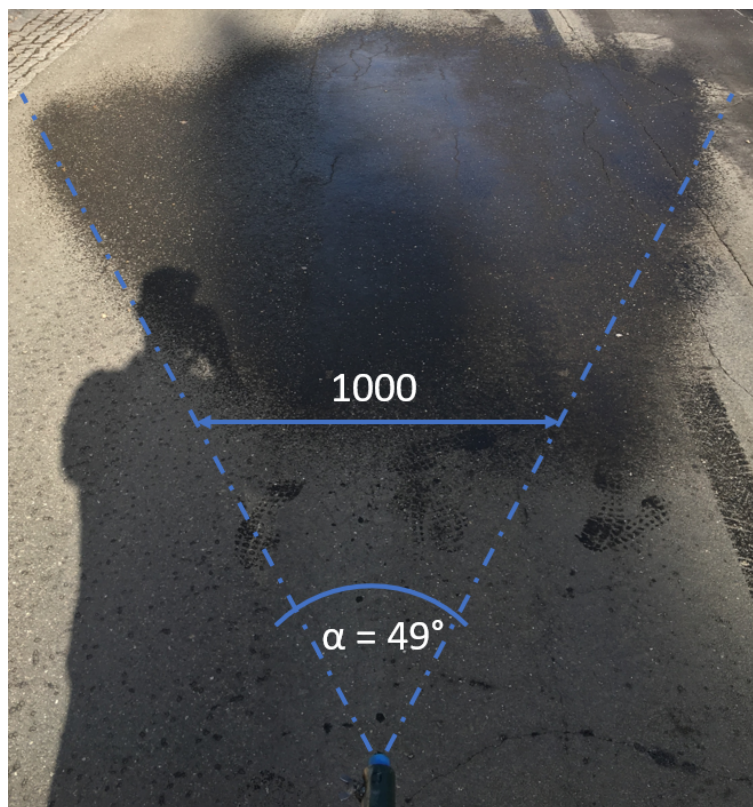


Abbildung 13: Sprühversuch zur Abstandsermittlung zwischen Düse und Brandlast auf Asphalt

Mit den dargestellten Daten aus Abbildung 14 und unter Zuhilfenahme von Winkelfunktionen, wurde der Sprühwinkel berechnet und ergab dabei 49° , welche auch in weiterer Folge verwendet werden. Vermutlich ist die Düse für einen Winkel von 50° ausgelegt. Für die 5A-Holzkippen konnte ein Abstand x von 550 mm und für die Holzpaletten von 1100 mm berechnet werden.

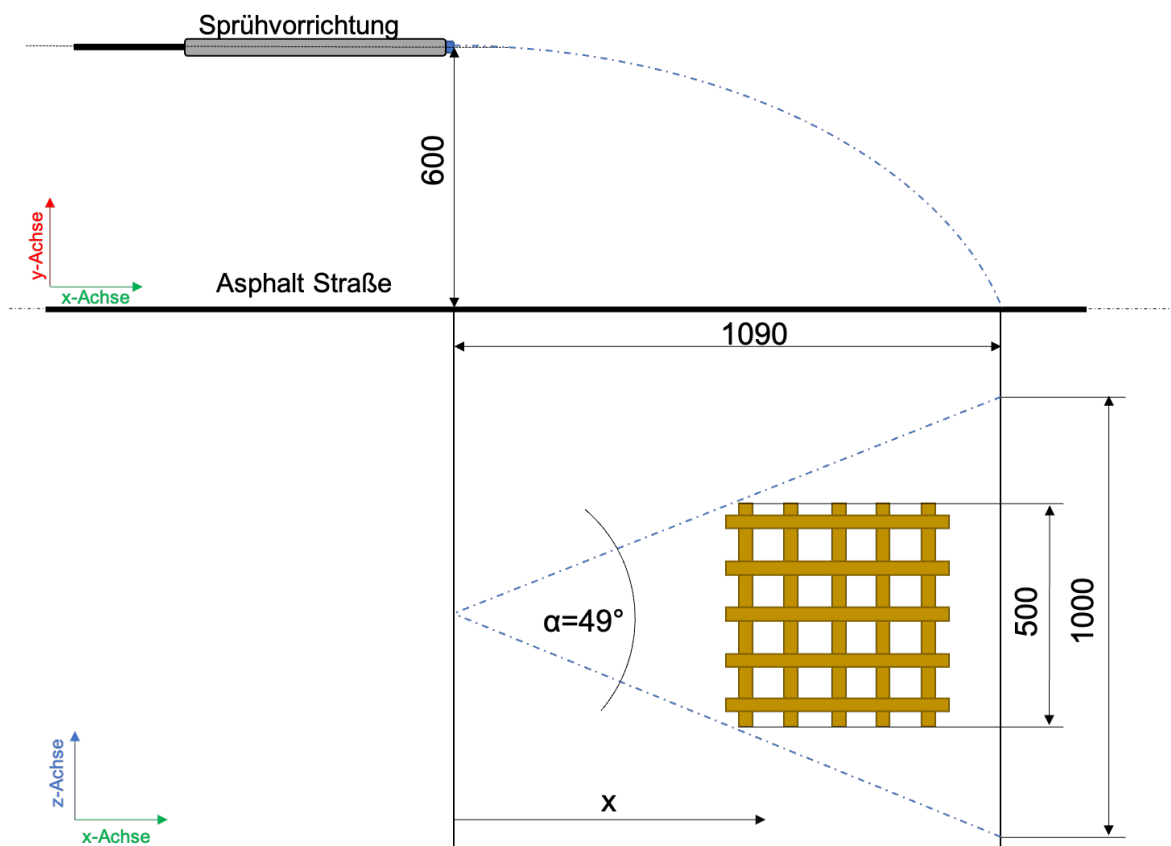


Abbildung 14: Skizze des Sprühversuches zur Abstandsfindung x (Maße in mm)

3.4 Messeinheit und Sensorik

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Messeinheiten und Sensoren besprochen. Es soll dabei auch die Sinnhaftigkeit, bzw. Notwendigkeit der einzelnen Bauteile eingegangen werden. Zusatzinformationen zu den einzelnen Bauteilen können dem Anhang entnommen werden.

- Waage

Mit Hilfe der Massenabnahme ist es bei bekanntem Brennwert möglich, die Wärmefreisetzungsrate zu ermitteln (siehe 2.1.3). Zudem ermöglicht die Messung der Massenabnahme eine Kontrolle des Brandvorganges. Sollte die Massenabnahme eines Versuches auffallend von denen der anderen Versuche abweichen, so können Rückschlüsse auf eventuelle veränderte Brandbedingungen gezogen werden. Abbildung 15 zeigt die verwendete Waage der Firma Kern mit der Herstellernummer: EOE 300K100XL. Das Modell ist auf bis zu 300 g beschränkt und weist dabei einen ablesbaren Messbereich von 100 g auf.



Abbildung 15: Bildliche Darstellung der verwendete Waage Thermoelemente

- Thermoelemente

Die Temperaturmessung an möglichst vielen Positionen innerhalb des Brandes wurde mittels sechs Stück Thermoelementen der Type K, mit dem Sensortyp: Nickel Chromium / Nickel Aluminium, erreicht. Bei dieser Messtechnik werden zwei Drähte aus unterschiedlichen Metallen, welche den thermoelektrischen Effekt – eine bei Temperaturunterschieden auftretende Thermospannung - zur Temperaturmessung ausnutzen, verbunden. Diese beiden elektrischen Leiter sind an einer Stelle zusammengeführt (Spitze des Thermofühlers) und an einer anderen Stelle an ein Messgerät angeschlossen (30). Tabelle 8 fasst die wesentlichen Spezifikationen der Thermoelemente zusammen.

Tabelle 8: Daten der verwendeten Thermoelemente der Type K (31)

<i>Sensor Type</i>	<i>Type ,K'</i>
<i>Verarbeitung</i>	nach Norm BS EN 60584
<i>Länge</i>	1,5 m
<i>Durchmesser</i>	1,5 mm
<i>Temperatur Messbereich</i>	-40°C bis +1100°C
<i>Standardfehlertoleranz</i>	0,75%, mindestens jedoch 2,2°C

Abbildung 16 (rechts) zeigt das Anzeigedisplay der bildgebenden Oberfläche. Das Programm generierte dabei asc-Dateien, in welche alle 0,1 Sekunden die Temperaturwerte

gespeichert werden. Zusätzlich wurden noch 1 m lange Kabel, mittels Stecker-Verbindungen installiert, um die Rechen- und Speichereinheit weiter entfernt vom Brand positionieren zu können, um sie somit vor der Hitze zu schützen.

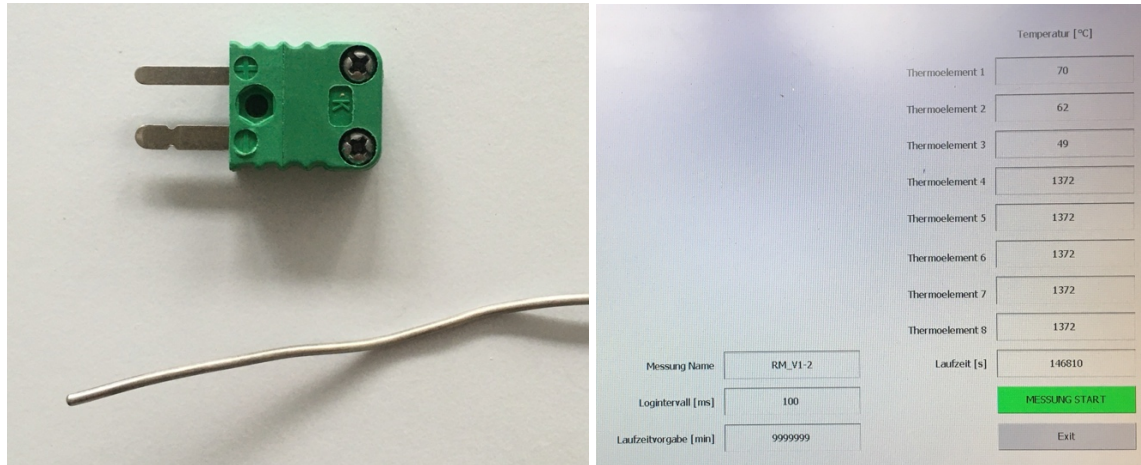


Abbildung 16: Links: Thermoelement Typ K mit Steckverbindung, rechts: Bildschirmoberfläche mit Temperaturwerten

- Infrarot-Thermografie-Kamera (IR)

Als zweite Temperaturmesseinheit diente eine Wärmebildkamera, welche die Oberflächentemperatur der Holzaufbauten maß. Dabei wird die Infrarotstrahlung von Objekten durch die Kamera aufgenommen und als Bild ausgegeben, je nach Emissionsgrad kann die Strahlung in Temperaturen dargestellt werden. Vorteilhaft ist, dass eine Messung der gesamten aufgenommenen Fläche erfolgt.

Als Gerät wurde eine Kamera der Type VarioCAM® head HiRes 640 mit der Seriennummer: 5039 14 der Firma InfraTEc GmbH aus Deutschland verwendet. Tabelle 9 weist relevante Daten zum verwendeten Equipment aus.

Tabelle 9: Daten zur verwendeten Infrarot-Kamera

Type	HiRes 640
Auflösung	640x480 Pixel
Optik	Normalobjektiv
Brennweite	30 mm
Field of View (FOV)	30° x 23°
Spektralbereich	7,5 – 14 µm

<i>Temperaturmessbereich</i>	-400 bis +2000 °C
<i>Emissionsgrad</i>	einstellbar
<i>Detektor</i>	ungekühltes Mikrobolometer Focal Plane Array
<i>Bildfrequenz</i>	50/60 Hz (gewählt 1 Hz)

Für die Position wurde eine schräge Draufsicht auf die Stirnseiten C und D der Holzkrippe gewählt. Der Abstand von der Linse zur Kante der Krippe betrug dabei 3,11 m und für die Paletten 2,51 m. Bei der Auswertung der Daten wurden für die Emissionskoeffizienten 0,88 für die 5A-Holzkippe (geschnitten und gehobelt), bzw. 0,90 für den Aufbau mit Holzpaletten (nur geschnitten) verwendet (32).

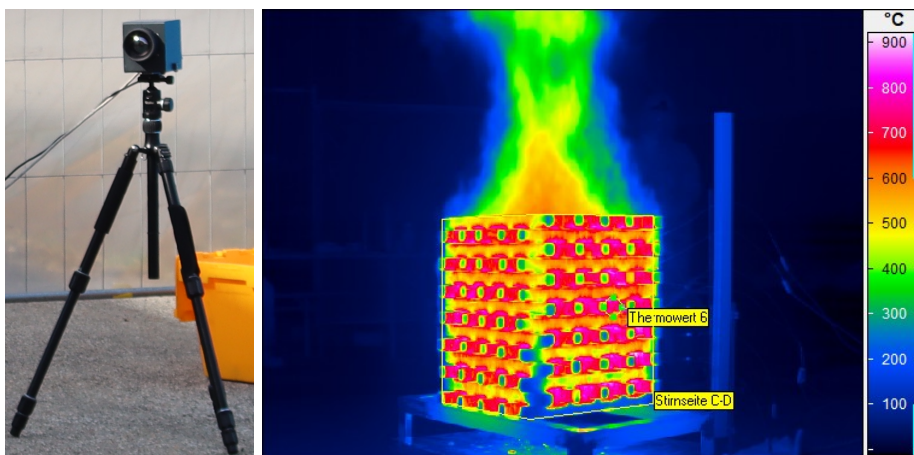


Abbildung 17: Links: Aufgebaute IR-Kamera; Rechts: Thermobild eines 5A-Krippenbrandes

- Volumenmesser

Sowohl für die Befüllung der Sprühvorrichtung, also auch zum Abmessen der Heptanmenge, wurden die unter Abbildung 18 abgebildete Messgeräte verwendet. Zur Befüllung vom 5 l - Tank, wurde auf Etappen gemessen, um die notwendige Löschmittelmenge zu erreichen. Es wurde dabei jeweils ein eigenes Gefäß für die jeweilige Flüssigkeit verwendet, damit keine Heptan Rückstände in den Feuerlöscher gelangen, bzw. umgekehrt Wasser die Heptan Menge verfälscht.

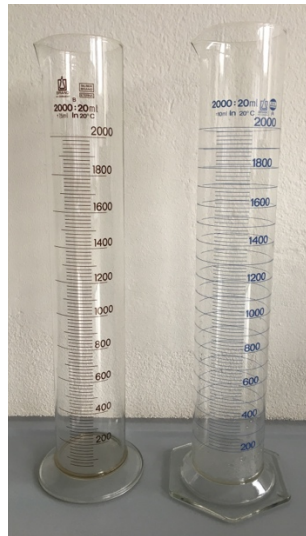


Abbildung 18: Messgefäße aus Glas (2L)

- Videokamera

Eine Videokamera der Firma Sony wurde einerseits zur nachträglichen Feststellung der Abbrandrate, aber auch zur videotechnischen Festhaltung der Versuchsergebnisse, verwendet. So konnten Details im Nachhinein besser analysiert werden, da vor allem der Löschvorgang schnell und unter großem Hitzeeinfluss durchgeführt wurde. Der zeitliche Verlauf der Gewichtsanzeige musste händisch ausgewertet werden. Auf der Kamera wurden zusätzlich die Windrichtungs- und Windstärkenmesser aufgenommen. Die Kamera musste also so positioniert werden, dass ein gutes Gesamtbild des Brandvorganges und die Detailaufnahmen der Messinstrumente erkennbar war.



Abbildung 19: Videokamera

- Windmessung

Als Windmessstation wurde eine einfach konstruierte Windfahne, bestehend aus einem 3D-Druck als Basis, mit Gewindestange und Absperrband, bzw. ein Windstärkenmesser verwendet. Die Fahne sollte dabei die Windrichtung erkennbar machen, wobei davon ausgegangen wurde, dass sich das Windverhalten auf Grund von Windschutzaufbauten turbulent verhielt. Der Windstärkenmesser konnte sowohl den Momentanwert, also auch den maximal gemessenen Wind in einem gegebene Betrachtungszeitraum angeben. Als Anzeigeeinheit wurde Meter pro Sekunde gewählt.



Abbildung 20: Windmessstation

3.5 Versuchsaufbau

Das folgende Kapitel unterteilt sich in den Aufbau des Prüfstandes, welcher unverändert für die Durchführung einer Versuchsreihe blieb und in den Aufbau der Krippe, welcher nach jedem Brand erneut errichtet werden musste.

3.5.1 Aufbau des Prüfstandes

Abbildung 21 stellt einen Gesamtüberblick aus der Vogelperspektive des Prüfstandes dar. Der Aufbau begann mit einer waagrechten Positionierung der Waage, auf einer möglichst ebenen Fläche. Diese Stellung sollte mit Hilfe eines wasserfesten Sprays markiert werden, da die Waage den Ausgangspunkt für alle weiteren Abmessungen darstellte. Die Heptan-Wanne und das Prüfobjekt wurden zentral über die Waage gestellt, wobei ein symmetrischer Aufbau

eingehalten werden musste. Die Bodenmarkierungen, von A bis D gekennzeichnet, stellen den genauen Abstand zwischen Sprühhvorrichtung und Brand dar. Damit sollte gewährleistet werden, dass die versuchsdurchführende Person die Feuerlöscher-Vorrichtung immer an derselben, vorher definierten Stelle abstellt (Maß von 550 mm ist repräsentativ für den Normversuch). Ein Laborständer, neben der Waage positioniert, wurde als Halterung für die Thermoelemente vorgesehen. Dabei wurden die Drähte der Thermoelemente mit einer Unterlegscheibe und einer Schraube an dem Ständer befestigt. Die genauen Positionen der Thermoelementspitzen in der Holzkrippe waren entscheidend. Die Infrarotkamera befand sich für beide Versuchsaufbauten in einem Abstand vom 3,51 m im 45°-Winkel schräg zur Stirnseite C, bzw. D. Die Seiten der Holzkrippe wurden im weiteren Verlauf nach den Bezeichnungen der Bodenmarkierungen und deren Ausrichtung genannt. Die Videokamera, frontal auf Stirnseite A gerichtet, filmte wie im Punkt 3.4 unter Videokamera beschrieben, sowohl das Brandgeschehen also auch die Windmessstation und die Massenanzeige.

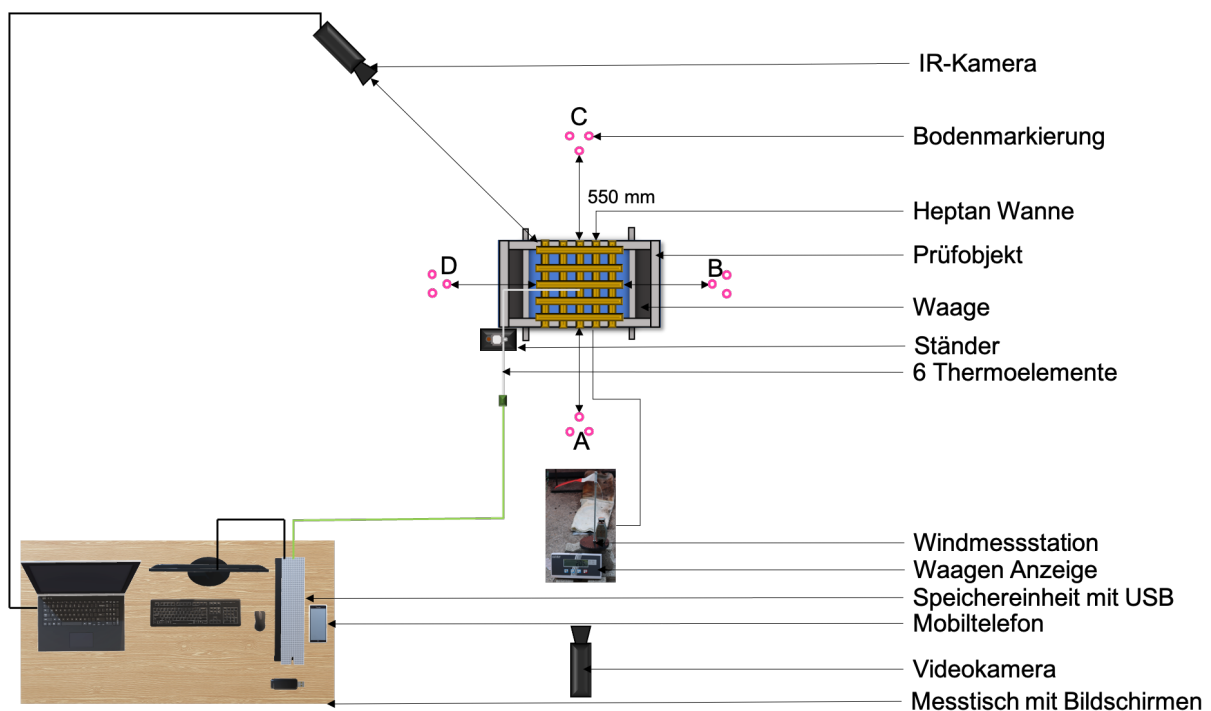


Abbildung 21: Schematischer Versuchsaufbau mit Messtechnik

Ein Tisch, mit Sicherheitsabstand zum Brandgeschehen, sorgt für die Unterstützung der Auswerteeinheiten. Dabei erfasste und speicherte ein Laptop die Daten der Infrarotkamera und die Messergebnisse der Thermoelemente wurden direkt auf einen USB-Stick gespeichert. Ein Bildschirm sorgte für die Bildgebung, um sicherzustellen, dass alle Thermofühler funktionieren. Zusätzlich wurde ein Mobiltelefon als Stoppuhr verwendet, um den Ablauf zeitlich koordinieren zu können. Die Stromversorgung für die Waage und die

Verbindungsleitung zum Anzeigedisplay, waren hohen Temperaturen ausgesetzt. Eine isolierende, mit einer Wasser-befeuchteten Löschdecke sorgte für den notwendigen, thermischen Schutz.

Ein weiterer separater Labortisch (nicht in Abbildung 21 ersichtlich), diente zur Hilfestellung bei der Befüllung und Unterdrucksetzung der Sprühvorrichtung. Auch das Abmessen der richtigen Heptan-Menge wurde hier durchgeführt. So konnte mit Flüssigkeiten und Elektrogeräte getrennt voneinander hantiert werden.

3.5.2 Aufbau der Brandlast

Im Wesentlichen bestand der Aufbau der Brandlast aus der richtigen Positionierung der Holzstäbe, bzw. der Paletten und aus der Installation der Thermoelemente. Dabei mussten die Thermoelemente für jeden Versuch auf derselben Stelle liegen. Eine genaue Beschreibung der Holzstapelung kann aus dem Punkt 3.1, entnommen werden. Abbildung 22 zeigt die genaue Anordnung, wobei die nummerierten roten Quadrate die Spitzen der Thermofühler darstellen, also jener Bereich wo die Temperatur gemessen wurde. Die in schwarz gehaltenen Zahlen dienen der Nummerierung der einzelnen Lagen. Somit erfolgt die Temperaturerfassung sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung.

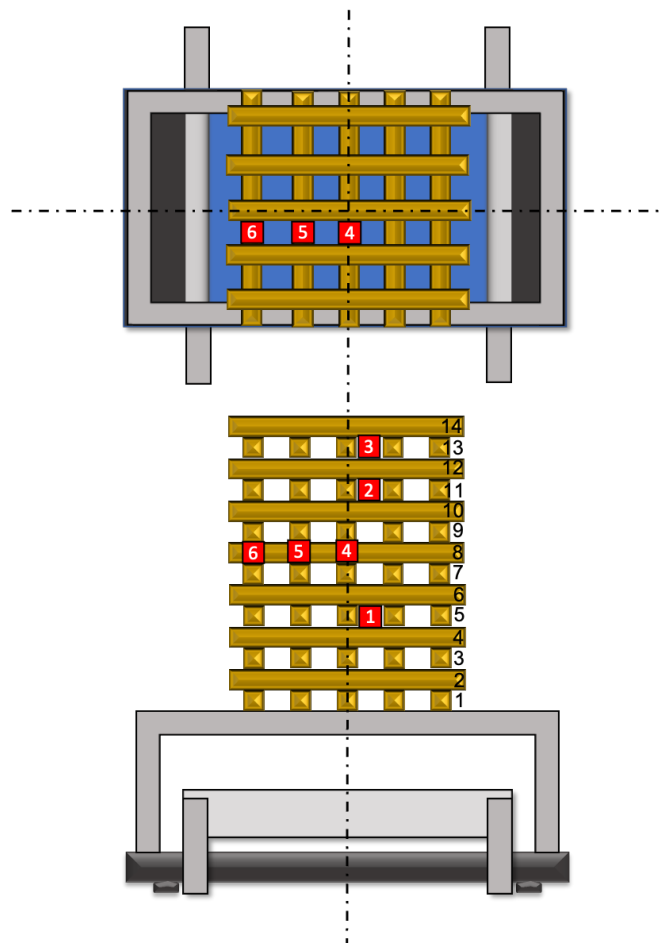


Abbildung 22: Schematischer Versuchsaufbau der 5A-Holzkippe mit Thermoelementpositionen

Der Versuchsaufbau für die Holzpaletten stellte keine großen Änderungen in Bezug auf den 5A-Holzkippenaufbau dar. Das adaptierte Prüfobjekt, als Unterkonstruktion war passgenau für die Abmessungen der Paletten. Es war darauf zu achten, dass die zweite und vierte Palette (schwarze Nummerierung in Abbildung 23 nummeriert) jeweils um 90° verdreht zu den anderen Paletten aufgelegt wurden. Da Länge und Breite der Paletten den gleichen Wert betragen, entstanden ebenso ein quadratischer Aufbau. Abbildung 23 zeigt zusätzlich die Positionen der einzelnen Thermoelemente, dargestellt als rote Quadrate.

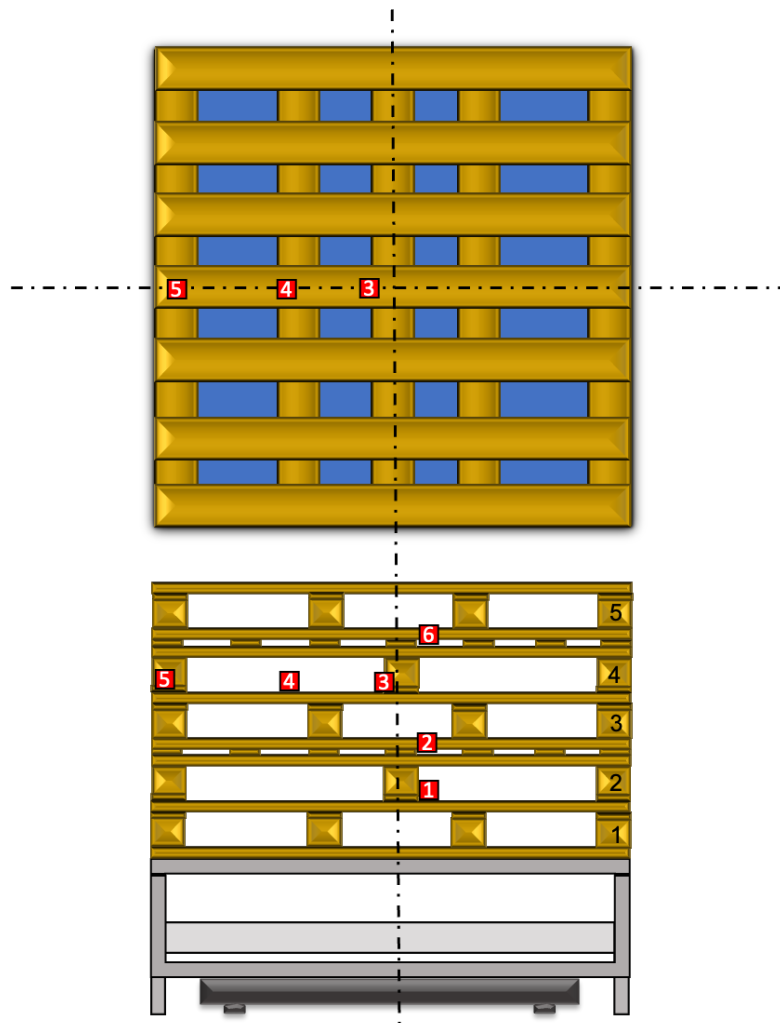


Abbildung 23: Schematischer Versuchsaufbau der Holzpaletten mit Thermoelementpositionen

4 Versuchsdurchführung

Als Durchführungsort wurde eine freistehende Fläche bei der Firma Sappi Papier Holding GmbH gewählt. Die Beeinflussung der Brandes ist in einer geschlossenen Halle geringer. Da allerdings in der näheren Umgebung keine diesbezügliche Infrastruktur zur Verfügung steht, musste dieser Kompromiss eingegangen werden. Zudem wurden die Brandeinflüsse bestmöglich überwacht. Um den Versuch bestmöglich vor Windeinflüssen zu schützen, wurden 8 Baugitter mit Plastikfolien bespannt und um den Aufbau aufgestellt. Ein Feuerwehrfahrzeug sorgte für die notwendige Sicherheit im Notfall.

Tätigkeit vor Versuchsbeginn:

- Sprühvorrichtung mit dem ausgewählten Löschmittel befüllen und vermischen
- Sprühvorrichtung mit Stickstoff auf einen Druck von 9 bar einstellen
- Abmessung der ausgewählten Heptanmenge 1,7 bzw. 2,5 l
- Waage mit darauf platziertem Prüfobjekt tarieren
- Brandlastherstellung: Aufbau der Krippen (5A, bzw. Holzpaletten) auf das Prüfobjekt
- Installation der Thermoelemente, siehe Punkt 3.5.2

Anschließend wurden die Versuchsmessungen gestartet und das Heptan gezündet. Jeweils eine Versuchsperson war zuständig für einen der folgenden Bereiche:

- Überwachung der aufzeichnenden Messinstrumente; Dokumentation der Ereignisse
- Zeitliche Überwachung und Kommandierung des durchführenden Personals
- Allgemeine Hilfstätigkeiten

Insgesamt zehn 5A-Holzkippen-Brandversuche wurden am 3.März 2021 beginnend um 08:30 Uhr durchgeführt. Das benötigte Holz wurde 4 Wochen in einer Lagerhalle bei der Firma Geppetto Holz GmbH – Holzmarkt Oberaich gelagert, bevor es 4 Tage vor der Durchführung nach Gratkorn transportiert wurde. Bis zum Tag der Brandversuch wurde das Holz immer überdacht und bei Umgebungstemperatur gelagert.

4.1 Vorbrennphase

Die Vorbrennphase ist jene Zeitspanne, zwischen der Zündung der Heptan Lache, bis hin zum Erstickten des Flüssigkeitsbrandes. Dies entsprach für den 5A-Holzkippenaufbau 120 s bei 1,7 l Heptan und im Mittel ca. 84 s bei 2,5 l Heptan für den Holzpalettenaufbau.

Für die Durchführung wurde das Heptan zügig in die Zündwanne unter der Brandlast geleert. Dabei verteilte sich der Brennstoff als Film gleichmäßig über dem Wasser. Eine weitere Person entzündete, mit einer externen Gasflamme, die Lache. Um dem Heptan, mit geringem Dampfdruck, wenig Zeit zur Verdampfung zu geben, sollte dieser Prozess möglichst rasch ablaufen. Ab dem Zeitpunkt der Zündung, welcher visuell durch die spontane Flammenentwicklung sichtbar ist, beginnt die Zeitnahme. Nach Ablauf der entsprechenden Zeit, wurde auf Kommando, die Stahlplatte untergeschoben, um die Flammen zu ersticken.

Im Laufe der 5A-Holzkippen-Versuche, hat sich die Platte durch die Hitze verformt und eine schließende Abdeckung war nicht mehr möglich. Dadurch kam es an den Öffnungen der Ränder zu Entflammungen. Deshalb wurde in weiterer Folge, anstelle der Stahlplatte die gesamte Wanne unter dem Brand entfernt. Für die Paletten Versuche war dies nicht notwendig, da das gesamte Heptan verbrennen konnte.

4.2 Hauptbrennphase

Sobald der Heptanbrand unter der Brandlast entfernt wurde, begann die Hauptbrennphase. Abbildung 24 stellt die Brandstadien gegenüber, wobei im rechten Bild bereits die Stahlplatte zum Erstickten des Heptanbrandes positioniert wurde.

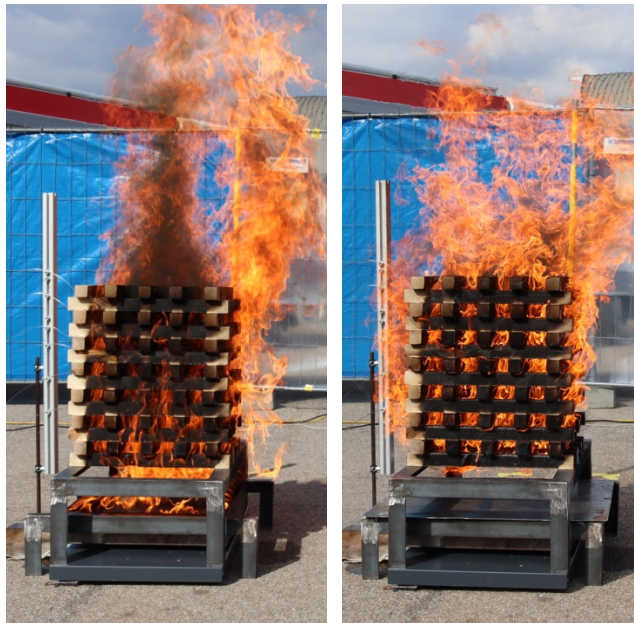


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Vorbrennphase (links) mit der Hauptbrennphase (rechts)

Die Hauptbrennphase ist also jene Zeit, ab welcher die Brandlast selbständig brennt, ohne zusätzlicher Energie von außen, bis zum Beginn der Löschtätigkeit. Es soll dabei ein möglichst gleichmäßiger Brand entstehen, welcher auf allen Seiten eine ausgeprägtes Glut-Flammenbild erzeugt. Tabelle 10 zeigt die eingehaltenen Zeiten für den selbständigen Brand. Dabei ist zu erkennen, dass die Paletten Versuche nur etwas mehr als halb so lange Zeit gelassen wurden.

Tabelle 10: Hauptbrennzeiten

<i>Versuch</i>	<i>Hauptbrennzeit</i>
<i>5A-Holzkrippe</i>	360 s
<i>Paletten</i>	210 s

4.3 Löschtätigkeit

Nach der Hauptbrennzeit begann direkt der Löschangriff. Dieser musste im Laufe der Versuche angepasst werden. Für die 5A-Holzkrippe entstanden so drei Taktiken und für die Holzpaletten wieder eine eigene.

4.3.1 Löschangriff für 5A-Holzkippe

Abbildung 25 zeigt übersichtlich einen generellen Plan des Löschangriffes. Bei allen Versuchen mit der 5A-Holzkippe, begann der Löschangriff auf Position A. Dabei wurde die Löschvorrichtung, auf den am Boden markierten Kreisen gestellt. Die Verlängerungsachse der Düse muss horizontal ausgerichtet, im 90°-Winkel zu den jeweiligen Stirnseiten stehen. Sobald der Befehl „Wasser marsch!“ gegeben wurde, betätigte eine Prüfperson den Feuerlöscher-Hebel. Dabei wurde das Ventil vollkommen geöffnet und das Wasser strömte aus der Düse. Während der Löschtätigkeit wurde die Drehscheibe, zur Auf- und Abbewegung der Düse, für eine definierte Zeit händisch gleichmäßig bewegt. Als Hilfestellung wurde laut mitgezählt, um so ein richtiges Timing zu erreichen. Sobald die Löschezit auf der Stirnseite A abgelaufen war, wurde die Sprühvorrichtung auf Position B gehoben. Eine zweite Versuchsperson leistete dabei unterstützende Hilfe, da die vollgefüllte Löschvorrichtung schwer war und die kurze Taktung keinen Spielraum ließ. Die Rotation um die Holzkippe erfolgte dabei gegen den Uhrzeigersinn und ist in Abbildung 25 mit schwarzen Viertelrundpfeilen eingezeichnet. Derselbe Vorgang wiederholte sich nun auf Seite B, bis schlussendlich die vierte Seite D erreicht wurde, oder der Brand vorzeitig gelöscht war.

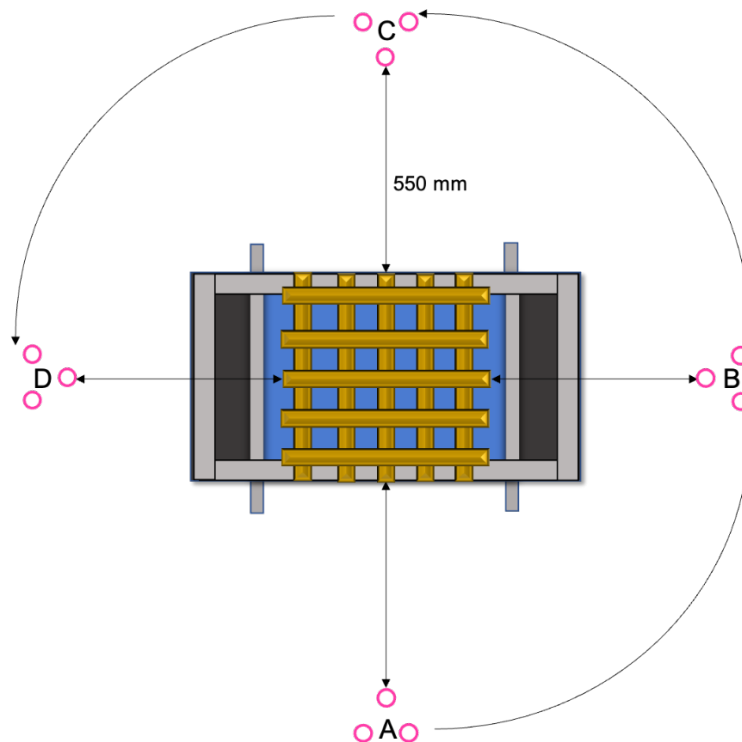


Abbildung 25: Schematischer Aufbau des Löschangriffs für 5A-Holzkippe

Insgesamt wurden drei verschiedene Löschangriffe angewendet, wobei jeweils alle Löschmittel einmal pro Versuchsreihe verwendet wurden. Aufgrund des Erfahrungszuwachses wurden Anpassungen, bzw. Veränderungen im Laufe der Versuche durchgeführt, wobei pro Versuchsserie die Taktik beibehalten wurde und so jedes Löschmittel zur Anwendung kam. Folgende Auflistung gibt einen Einblick über die genauen Löschtaktiken:

- **Löschtaktik 1:** 5 Sekunden Angriff – 5 Sekunden Pause, von Oben nach Unten

Bei den ersten drei Versuchen wurde die Löschung pro Seite für 5 s durchgeführt. Die Düse wurde dabei von Oben nach Unten bewegt und für den Wechsel zwischen den Seiten für 5 s Pause gemacht, ehe die Löschung der nächsten Seite begann.

- **Löschtaktik 2:** 8 Sekunden Angriff – 5 Sekunden Pause, von Unten nach Oben

Auf Grund der Erkenntnisse und Ergebnisse der ersten 3 Versuche, wurden zwei Änderung bei der Löschtaktik vorgenommen. Die genaue Ursache dafür, soll unter Punkt 5 in der Ergebnisauswertung besprochen werden. Einerseits wurde der Sprüheinsatz auf 8 s verlängert und andererseits wurde von Unten nach Oben gelöscht. Die Zeit für die Umstellung wurde auf 5 s belassen. Der Löschangriff endete, sobald keine Flammen mehr sichtbar waren.

- **Löschtaktik 3:** 5 Sekunden Angriff – 5 Sekunden Pause, von Unten nach Oben

Da die Löschung von Unten beginnend äußerst effektiv war, war die längere Löschdauer nicht notwendig. Aufgrund dessen wurde sie wieder auf 5 s reduziert. Neu bei dieser Versuchsreihe war, dass die Löschezit stur eingehalten wurde, also trotz eventuellen Löscherfolg weitergelöscht wurde. Grund dafür war die Vergleichbarkeit der verwendeten Löschmittelmengen hinsichtlich der gemessenen Temperaturen.

4.3.2 Löschangriff für Holzpaletten – händisch

Um nun mit den vorhandenen Apparaten größere Brandlasten zu löschen, wurde für die Holzpaletten nach dem bekannten Prinzip vorgegangen und Anpassungen durchgeführt. Da für die ersten vier Versuche keine Löscherfolge mit der vorher beschriebenen Löschtaktik 3 erreicht werden konnte. Als sinnvoll erwies sich eine Kombination aus dieser Löschung und der Methodik nach der Norm zur Klassifizierung von tragbaren Feuerlöschern (20), wo die Versuchsperson frei entscheiden soll.

Die Durchführung der Löschung sah wie folgt aus:

Die Versuchsperson begann, auf Kommando, mit der Löschtätigkeit im unteren, linken Bereich der Stirnseite A (Bezeichnung gleich wie unter Punkt 4.3.1). Mit einer kontinuierlichen

Bewegung der Düse folgte der zentrale Strahl des Sprühkegels den blauen Pfeilen in Abbildung 26. Bei einem Abstand von ca. 0,5 m konnte somit jeweils eine Halbseite mit Löschmittel besprüht werden. Nach Vollendung der ersten Stirnseite, erfolgte der Standortwechsel auf die zweite Seite (Stirnseite B). Nun wiederholte sich der Vorgang so lange, bis alle Seiten gelöscht waren. Sofern nach Beendigung der Sprühtätigkeit weiter Flammen erkennbar waren, konnte lokal nachgelöscht werden, bis kein Löschmittel mehr verfügbar war, oder das Feuer zum Erliegen kam. Zur Sichtkontrolle, ob tatsächlich „Brand Aus“ gegeben werden konnte, standen die übrigen Versuchsteilnehmer zur Verfügung. Auf Grund der Rauch-/Dampfentwicklung und durch die Geometrie des Aufbaues, war es oft nicht einfach vereinzelte Brandherde auszumachen.

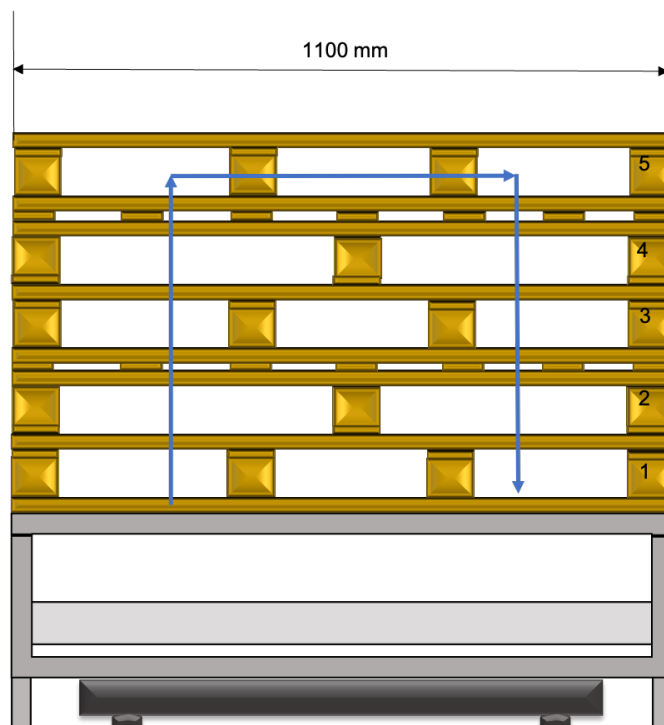


Abbildung 26: Löschangriff bei Holzpaletten Versuchen

4.4 Nachbereitung

Nachdem ein Versuch als abgeschlossen bewertet wurde, diente Wasser aus einem separaten Feuerwehrschauch zur weiteren Temperaturreduktion. Sofern die Löschvorrichtung und der standardisierte Löschangriff nicht erfolgreich waren, wurde dies notiert und ebenso mit Wasserüberschuss gelöscht. Die Daten der Messinstrumente wurden abgespeichert und für den nächsten Versuch vorbereitet. Die Thermolemente wurden vorsichtig aus der Krippe entfernt, sodass sie nicht beschädigt, oder geknickt werden konnten.

Im Falle der 5A-Holzkrrippe mussten die verkohlten Stäbe händisch abgetragen werden. Bei den Holzpaletten konnte ein Stapler diese abtransportieren. Rund um den Versuchsaufbau waren, sofern notwendig, Säuberungsarbeiten durchzuführen. Das erwärmte Wasser in der Zündwanne musste für jeden Versuch erneuert und das restliche Heptan verbrannt werden. Höhere Wassertemperaturen würden die Verdunstung des Flüssigbrennstoffes beschleunigen, zudem war das Wasserbecken durch abgebrannte Holzteile verschmutzt.

4.5 Löschmittel

Insgesamt wurden drei Löschmittel verwendet. Damit konnte einerseits der Versuchsaufbau und die Durchführungsmethodik für unterschiedliche Mittel getestet werden und andererseits ein Vergleich der Mittel untereinander stattfinden. Für die Durchführung ist es unerheblich, welches Löschmittel verwendet wurde. Idealerweise hat die durchführende Person keine Kenntnisse über das Einsatzmittel. Folgende drei Substanzen wurden mit den zugehörigen Konzentrationen eingesetzt:

- Wasser

Als Basis aller Mischungen und als erstes Versuchsmittel diente Leitungswasser der Firma Sappi Papier Holding GmbH aus Gratkorn.

- MPST-Löschmittelzusatz

Ein neu entwickelter Löschmittelzusatz der Firma MPST GmbH, basierend auf Harnstoff, Ammonium- und anderen Salzen, diente als zweites Versuchsmittel. Zusätzlich bestand die Mischung aus Schaummittelkonzentrat. Für die Realbrandversuche war eine Konzentration von 3 Vol.-% Löschmittel zu Wasser vorgesehen, wodurch 155 ml zusätzlich in den Feuerlöscher mit 5 l Wasser eingefüllt wurden. Wichtig dabei ist eine gute Durchmischung, damit sich der Zusatz homogen verteilt.

- F-500-Löschmittelzusatz (F-500 EA)

Die genaue chemische Zusammensetzung ist nicht öffentlich zugänglich, jedoch verspricht der Hersteller eine gute Kühlwirkung, verbunden mit einem hervorragendem Haftungs- und Eindringverhalten. (33) Die Zumischraten können je nach Brand von 0,1 Vol.-% bis 3 Vol.-% liegen, wobei bei den durchgeführten Brandversuchen eine Konzentration von 0,5 Vol.-% gewählt wurde. Dies bedeutet, dass 25 ml F-500 zu 5 l Wasser hinzugefügt werden müssen. Zu beachten war dabei, dass die gesamte Menge an F-500 eingefüllt wird, da es im ungemischten Zustand zähflüssiger als andere Löschmittelzusätze ist. (33)

5 Ergebnisse

Das folgende Kapitel beschreibt die erhaltenen Ergebnisse der Brandversuche. Zusätzlich soll anhand von grafischen Auswertungen eine Interpretation der Daten erfolgen. Dabei wird, wie bekannt, in 5A-Holzkippen- und die Holzpaletten-Versuche unterteilt. Die Nomenklatur der Einzelversuch ist am Namen ersichtlich. Zusätzlich wird in die verschiedenen Löschtaktiken unterteilt, um die Ergebnisse gut vergleichen zu können. Die Beschreibung V, mit der dazugehörigen Laufnummer, wird für die 5A-Holzkippen verwendet. Mit der Erweiterung durch den Buchstaben P nach der Zahl werden die Holzpaletten-Versuche gekennzeichnet (z.B. V1P, steht für: Erster Versuch der Paletten-Serie).

Allgemein unterteilt sich die Ergebnisse in folgende Bereiche:

- Abbrand und Abbrandraten, bzw. Wärmefreisetzungsraten
- Temperaturen, wobei zwischen den Messungen von Thermoelementen und Infrarot-Kamera unterschieden wird
- Soweit vorhanden: Menge an verbrauchtem Löschmittel

5.1 Umgebungsbedingungen

Der Standort, Gratkorn, liegt auf 386m über dem Meeresspiegel nördlich der Stadt Graz in der Steiermark. Die Versuche wurden am Betriebsgelände der Sappi Papier Holding GmbH durchgeführt.

5A-Holzkippenversuche (3.März 2021):

- Tages Höchstwert der Umgebungstemperatur: 16°C

- Über den Tag gemittelte relative Luftfeuchte: 37% ± 5%

Holzpalettenversuche (4.März 2021):

- Tages Höchstwert der Umgebungstemperatur: 15°C
- Über den Tag gemittelte relative Luftfeuchte: 64% ± 5%

5.2 Abbrand/Wärmefreisetzungsrate

5A-Holzkrippe

Tabelle 11 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse des Abbrandes der 5A-Holzkruppenversuche, wobei sich im Durchschnitt eine anfängliche Holzmasse von 30,2 kg ergab. Zur Berechnung der Abbrandrate wurde der jeweilige Massenverlust durch die gesamte Brennzeit vor dem Löschangriff von 480 s dividiert. Beim zweiten Versuch (V2) ist die Auswertung auf Grund eines Fehlers ausgefallen. Versuch 10 sollte, als reiner Abbrand Versuch Aufschluss über das Brandverhalten ohne Löschtätigkeit liefern. Dafür wurde das Holz bis zur Asche verbrannt. Auf Grund der hohen Temperaturen ist die Funktion der Waage jedoch ausgefallen, weshalb der Versuch nach 900 s abgebrochen wurde.

Tabelle 11: Abbrandmassen der 5A-Holzkruppen-Versuche

<i>Versuch</i>	<i>Masse Anfang</i>	<i>Masse Ende</i>	<i>Massenverlust</i>	<i>Abbrandrate gemittelt</i>
<i>[-]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg/s]</i>
V1	29,0	14,6	14,4	0,030
V2	xx	xx	xx	xx
V3	29,2	15,5	13,7	0,029
V4	31,8	19,4	12,4	0,026
V5	30,7	17,3	13,4	0,028
V6	30,5	17,5	13,0	0,027
V7	31,1	18,0	13,1	0,027
V8	29,2	16,2	13,0	0,027
V9	30,7	17,0	13,7	0,029
V10	30,2	xx	xx	xx
<i>Durchschnitt</i>	33,3	16,9	13,3	0,028

Abbildung 27 zeigt sowohl den Massenverlauf, also auch die dazugehörige Wärmefreisetzungsrate für den Versuch V1. Für die Berechnung wurde, wie unter Punkt 2.1.3 beschrieben, die Abbrandrate pro Zeitschritt mit dem Heizwert von 16.208 kJ/kg multipliziert. Eine durchgeführte Brennstoffanalyse am TPT hat diesen Wert ergeben (vollständiger Prüfbericht im Anhang). Für eine bessere Darstellung der Wärmefreisetzungsrate, wurde eine exponentielle Glättung in Microsoft Excel mit einem Dämpfungsfaktor von 0,95 verwendet. Die Grafik zeigt den Zeitraum von der Entzündung bis zum Beginn der Löschfähigkeit, da in weiterer Folge das Gewicht des auftreffenden Löschmittels den Anzeigewert der Waage beeinflusst. Nach der Entwicklungsphase von ca. 200 s befand sich die Krippe im Vollbrand, auch ohne Zusatzenergie des Flüssigbrennstoffes, welcher nach 120 s erlischt. Die Löschung begann also in einem quasi-stationären Zustand, da sich der Brand weder in einer Entwicklungs- noch einer Abklingphase befand. Dies ist gut an der linearen Massenabnahme in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraumes zu erkennen.

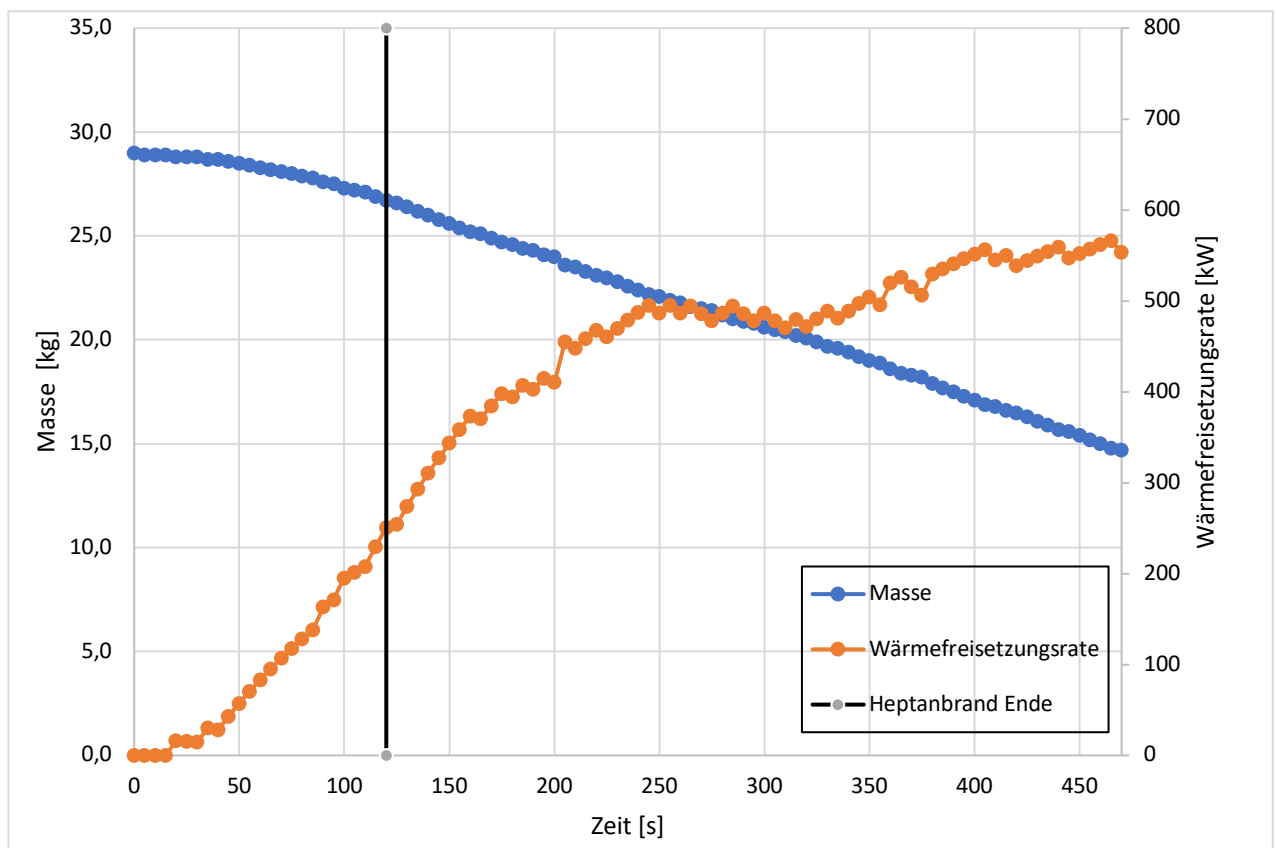


Abbildung 27: Abbrand und Wärmefreisetzungsrate für V1 über die Zeit

Holzpaletten

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Abbrände von den 14 Holzpaletten-Versuchen, welche im statistischen Mittel einen Startwert von 81,5 kg ergaben. Ausgehend von der Grundgesamtheit, mit Ausnahme der Werte von V1P, errechnet sich für den Massenverlust ein Mittelwert von 24,9 kg mit einer Varianz von 1,7 kg. Für die Abbrandrate wurde für V1P eine Zeit von 300 s und bei allen anderen Versuchen von 210 s für die Berechnung herangezogen. Wider der anfänglichen Annahme, dass die Paletten-Versuche hinsichtlich des Abbrandes weniger gut reproduzierbar sind, ergaben sich jedoch brauchbare Werte für eine sinnvolle Versuchsreihe. Jedoch ergeben sich für die 5A-Holzkippenversuche eine prozentuelle Abweichung der Standardabweichung vom Mittelwert von 2,4 %, im Vergleich zu 6,9 % bei den Paletten-Versuchen.

Tabelle 12: Abbrandmassen der Holzpaletten-Versuche

<i>Versuch</i>	<i>Masse Anfang</i>	<i>Masse Ende</i>	<i>Massenverlust</i>	<i>Abbrandrate</i>
<i>[-]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg]</i>	<i>[kg/s]</i>
V1P	84,4	45,4	39,0	0,130
V2P	82,4	58,1	24,3	0,116
V3P	81,0	56,2	24,8	0,118
V4P	82,0	56,9	25,1	0,120
V5P	82,3	59,7	22,6	0,108
V6P	78,8	57,4	21,4	0,102
V7P	80,8	55,8	25,0	0,119
V8P	82,8	58,3	24,5	0,117
V9P	80,8	55,6	25,2	0,120
V10P	82,6	58,3	24,3	0,116
V11P	78,8	55,4	23,4	0,111
V12P	84,1	63,1	21,0	0,100
V13P	82,5	58,4	24,1	0,115
V14P	77,4	53,3	24,1	0,115
<i>Durchschnitt</i>	81,5	56,6	24,9	0,113

Auf Grund der schwereren Holzmasse und der größeren Oberfläche der Paletten entstanden höhere Abbrandraten. Dies war auch vor Ort, während der Durchführung, durch eine intensivere Wärmeentwicklung spürbar. Abbildung 28 zeigt stellvertretend für die Versuchsreihe die Abbrandrate und der Wärmefreisetzungsrate, wobei Maximalwerte um 1700 kW erreicht wurden. Im Vergleich dazu ist das annähernd dreimal so viel wie bei den 5A-Holzkippen, welche ca. 600 kW ergaben. Für die Berechnung wurde ein leicht abweichender

Heizwert verwendet. Da aus Kostengründen keine Brennstoffanalyse durchgeführt wurde, wurde der Feuchtegehalt mit 15% angenommen. Aus Tabellen für Fichtenholz ergab sich ein Heizwert von 15.552 kJ/kg. (34)

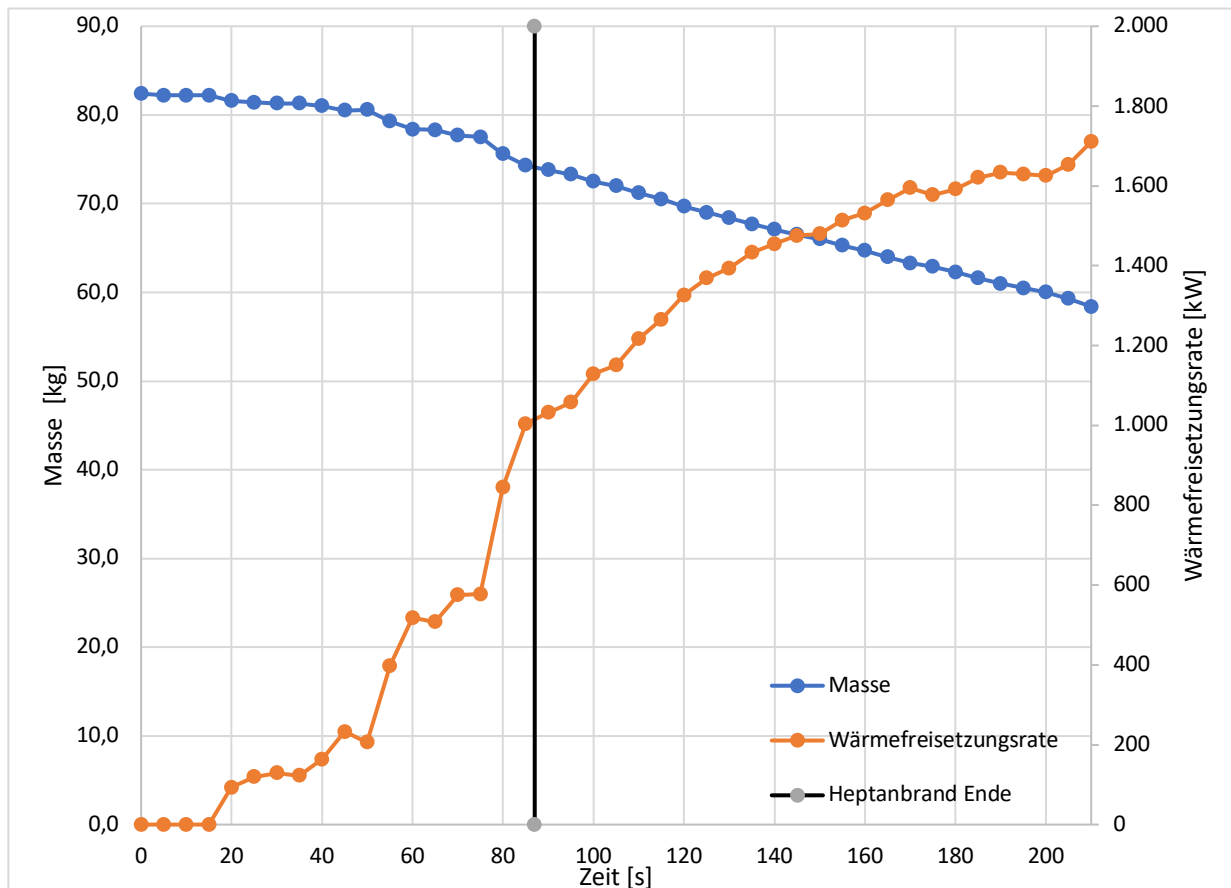


Abbildung 28: Abbrand und Wärmefreisetzungsrate für Versuch V13P über die Zeit

Diskussion

Grundsätzlich weist die Brandlast der 5A-Holzkrippe eine hohe Reproduzierbarkeit, hinsichtlich des Zündvorganges und der Abbrandraten, auf. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Maximaltemperatur der durchgeführten Versuche zwischen 709°C und 872°C lagen. Diese Werte wurden jeweils kurz vor Beginn der Löschfähigkeit gemessen, da zu diesem Zeitpunkt die Krippentemperatur am höchsten war. Für eine noch bessere Vergleichbarkeit der Löschmittel, wäre es vorteilhafter, wenn diese Temperaturen keine große Spreizung aufweisen würden. Gründe hierfür sind unter anderem die natürliche Inhomogenität im Material, natürliche Schwankungen der Umgebung, wie Wind, und die Positionierung der Thermoelemente.

Ursprünglich war der Gedanke einen zweiten, günstigeren Versuchsaufbau zu entwickeln. Der Hauptkostentreiber ist meist das verwendete, genormt Brennholz, wodurch eine

Alternative gelegen kommt. Vergleicht man die Abbrandrate der 5A-Holzkippen-Versuche von 0,028 kg/s mit jenen der Holzpalettenversuche mit einem Mittelwert von 0,113 kg/s, so ist ein deutlicher Unterschied erkennbar.

Das Augenmerk soll erneut auf den V12P gerichtet werden, da bei diesem Versuch der Wind für ein einseitiges Brandbild verantwortlich war. Es wurde während der Vorbrennzeit nur ca. die Hälfte der Brandlast vollständig entzündet. Im Laufe der Hauptbrennzeit breitete sich das Feuer annähernd über alle Paletten gleichmäßig aus. Erkennbar ist diese Anomalie gut am geringen Abbrand mit 21,0 kg, im Vergleich zum Mittelwert aller Versuche von 24,9 kg. Diese ergibt eine prozentuelle Abweichung von 15,6 %. Die geringere Brandlast hat wahrscheinlich zum Löscherfolg beigetragen, da es der einzige Versuch mit Wasser war, welcher vollständig gelöscht werden konnte.

Zusammengefasst waren beide Brandaufbauten, hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit für eine Versuchsserie verwendbar. Vergleicht man die prozentuelle Abweichung der Standardabweichungen von den Mittelwerten, so kann die Aussage getroffen werden, dass die 5A-Holzkippenbrände konstanter sind. So ergeben die Massenverluste der 5A-Holzkippen im Mittel einen Wert von 13,3 kg mit einer Standardabweichung von 0,57 kg, verglichen mit dem Mittelwert von 24,9 kg und einer Abweichung von 4,11 kg bei den Holzpaletten-Bränden. In Prozent ergibt sich daraus ein Unterschied von 4,2% zu 16,5%. Bezogen auf die Abbrandraten der zwei Versuchsserien ergeben die prozentuellen Abweichungen 4,2% und 6,4%.

5.3 Temperaturmessung

Die Ergebnisse werden, wie eingangs dieses Kapitels erwähnt, in die Ergebnisse der Thermoelemente und jener der Infrarotkamera unterteilt. Die Zusammenfügung der 5A-Holzkippenenergebnisse mit den Platenergebnissen wird auch hier praktiziert.

5.3.1 Thermoelemente

5A-Holzkippe

Die folgenden drei Graphen (Abbildung 29 - Abbildung 31) zeigen, aufgeteilt nach Löschtaktik, die gemittelten Werte aller sechs Thermoelement über einen Zeitraum bis 60 s nach Beginn der Löschfähigkeit. Dabei soll die Temperaturabnahme der Holzkippe bei Applizierung verschiedener Löschmittel dargestellt werden.

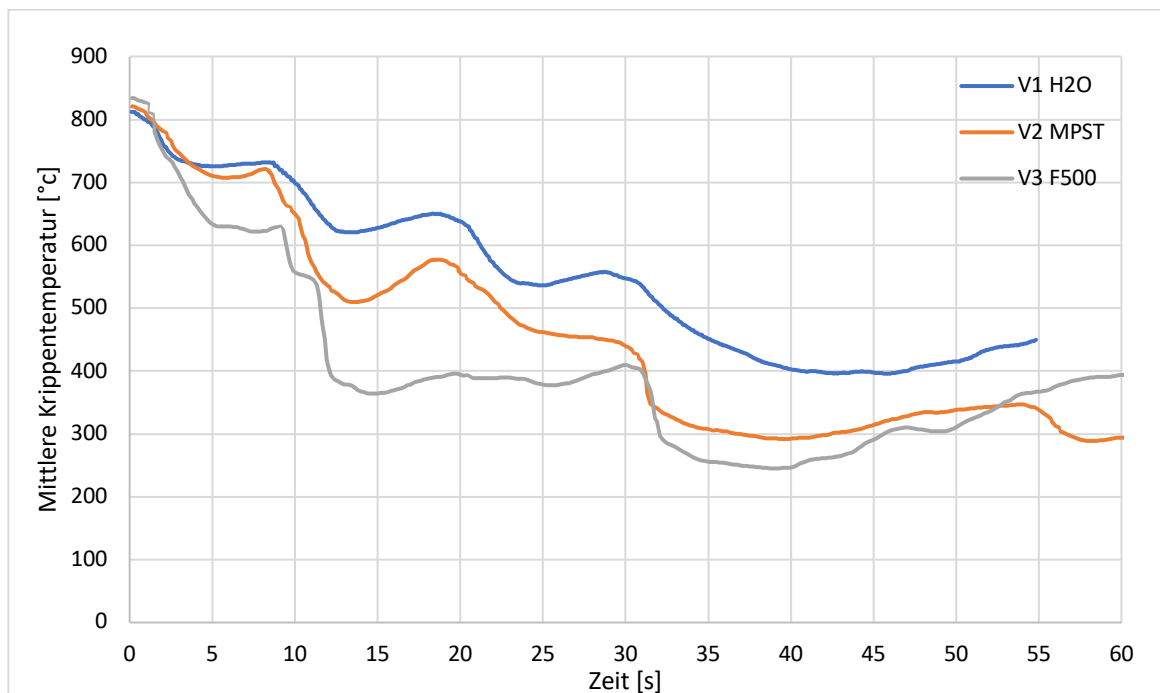


Abbildung 29: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die 5A-Holzkrippe nach Löschtaktik 1

Unter Verwendung der Löschtaktik 1 konnte keines der Löschmittel ein vollständiges ‚Brand aus!‘ erreichen. Es wurde bei allen Versuchen eine Wiederentflammung festgestellt. Bei V1 wurde die Aufzeichnung frühzeitig gestoppt, wodurch die letzten 5 s an Datenmaterial fehlen. Es ist erkennbar, dass der Einsatz von MPST Löschmittelzusatz die durchschnittliche Krippentemperatur nach 12 s um 100°C - 150°C im Gegensatz zu Wasser verringerte. F500 verringerte die Temperatur, verglichen mit Wasser, sogar um über 200°C nach 15s. Die ausgeprägte Wellenform (gut an V1: Löschmittel Wasser erkennbar) der einzelnen Graphen kommt durch die diskontinuierlichen Löschtätigkeit zustande. Die vier Flanken der Kurven können dem Löschangriff selbst zugeordnet werden, da die 5 Sekunden Löschung – 5 Sekunden Pause - Taktik deutlich erkennbar ist. Nach 40 s kann bei allen Linien ein Temperaturanstieg festgestellt werden. Da, nach dieser Zeit eine Runde um den Brand komplettiert ist und somit der Löschangriff endet. V2 zeigt zwar bei Sekunde 55 eine Abnahme der Temperatur, jedoch ist dies die Folge des externen Löschwassers, um die Flammen zu kontrollieren und darf nicht dem Löschmittel zugerechnet werden.

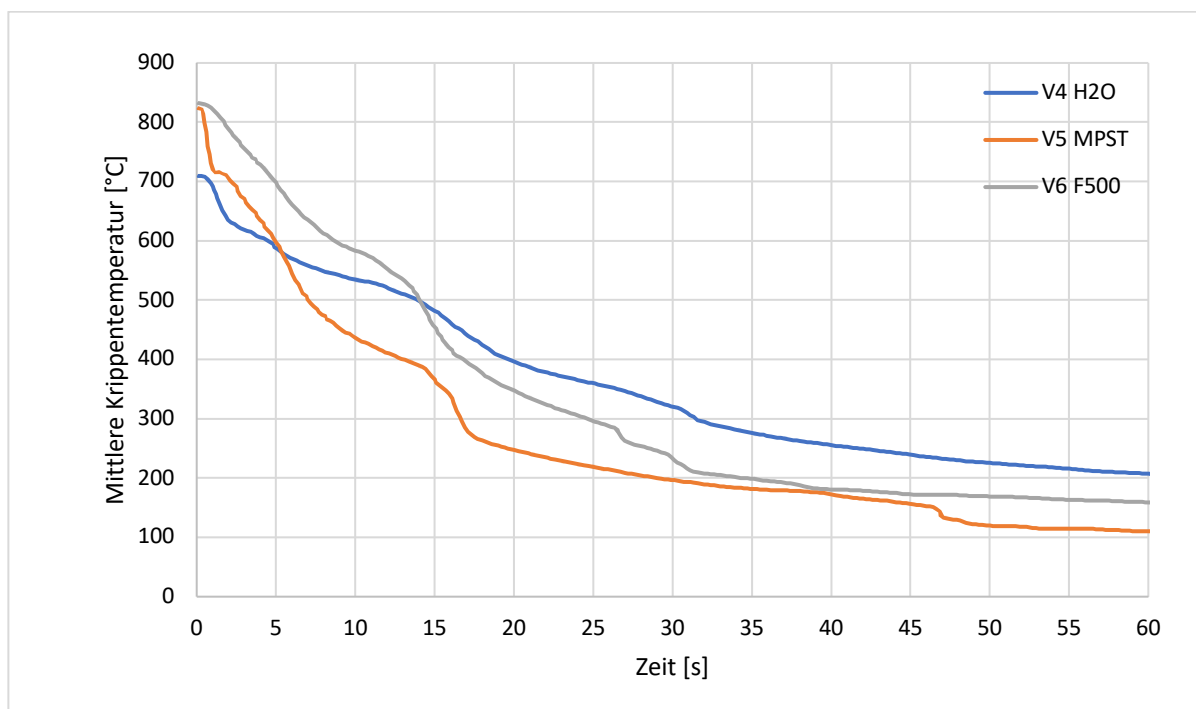


Abbildung 30: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für 5A-Holzkruppen nach Löschtaktik 2

Tabelle 13: Löschzeit und Löschmittelverbrauch bei Versuchen nach Löschtaktik 2

<i>Versuchs ID</i>	<i>Löschzeit</i>	<i>Löschmittelverbrauch</i>
<i>[-]</i>	<i>[s]</i>	<i>[L]</i>
V4	24,0	3,28
V5	24,0	3,30
V6	24,5	3,53

Für beide Versuche V5 und V6 wurde mäßiger Wind während der Brandentwicklungsphase festgestellt. Bei keinem der Versuche war eine immediate Löschtätigkeit auf Stirnseite D notwendig. Bei V4 und V6 war der Brand schon nach der Bekämpfung auf Stirnseite C gelöscht und bei V5 sogar schon auf Stirnseite B, jedoch wurde ein Wiederaufflammen festgestellt. Ein kurzes „Nachlöschen“ ist z.B. bei 47 s unter V5 erkennbar. Dadurch ergab sich dieselbe Löschzeit von 47 s für alle drei Versuche, womit auch der nach dem Versuch bestimmte Löschmittelverbrauch hier lediglich ein Maß für die Toleranz des Feuerlöschers ist, wie in Tabelle 13 dargestellt. Es ist zu erwähnen, dass V4 bei dieser Versuchsserie die geringste maximale Krippentemperatur aller Versuche aufwies.

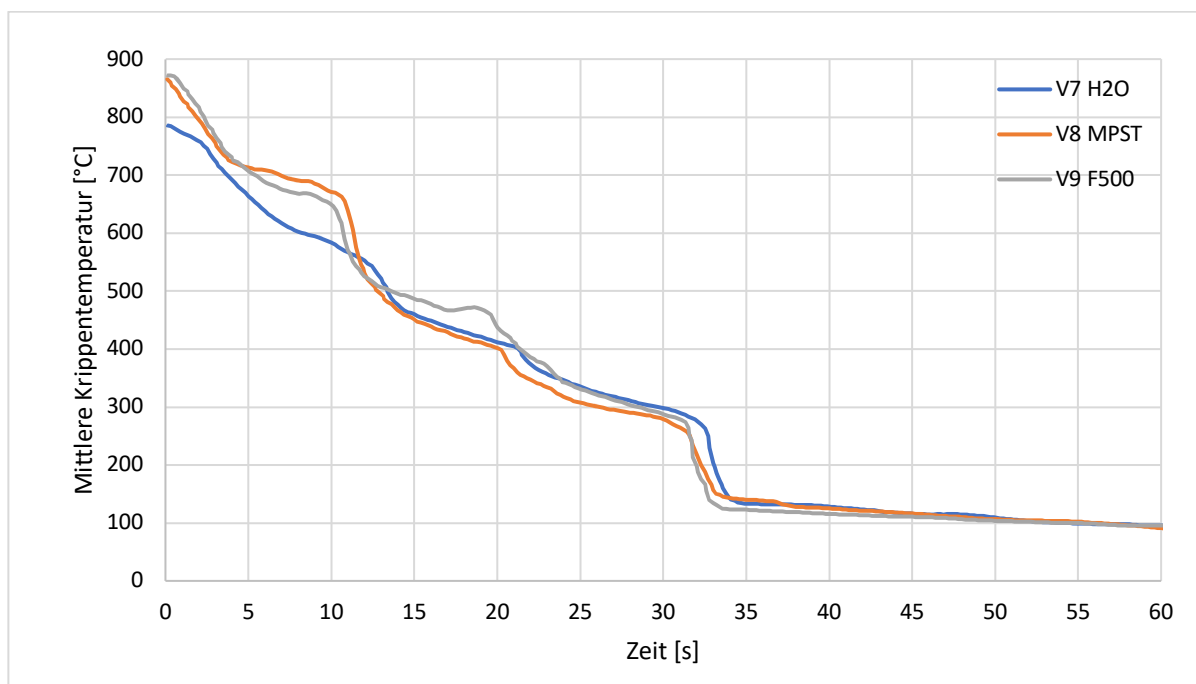


Abbildung 31: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die 5A-Holzkrippe nach Löschtaktik 3

Tabelle 14: Löschzeit und Löschmittelverbrauch bei Versuchen nach Löschtaktik 3

<i>Versuchs ID</i>	<i>Löschzeit</i>	<i>Löschmittelverbrauch</i>
<i>[-]</i>	<i>[s]</i>	<i>[L]</i>
V7	20	3,09
V8	20	3,16
V9	20	3,07

Für die letzte Versuchsserie der 5A-Krippenbrände, wurde die Löschtaktik ein weiteres Mal angepasst. Auch hier ist zu erkennen, dass die Löschmittel im Vergleich zu Wasser eine bessere Kühlwirkung aufweisen, siehe Abbildung 31. Nach 33 s konnten alle Brände erfolgreich gelöscht werden und es wurde auch keine Wiederenflammung festgestellt. Da auf allen Seiten 5 s lang gelöscht wurde, ergab sich eine Löschzeit von 20 s bei jedem Versuch. Die tatsächlichen Löschmittelverbräuche, wie in Tabelle 14 ersichtlich, weichen ein wenig voneinander ab und zeigen dementsprechend wieder die Abweichungen der Löschapparatur.

Tabelle 15 zeigt die errechneten Abkühlraten, wobei jeweils die Temperaturabnahme der ersten 40 s herangezogen und durch die Zeit dividiert wird. So kann die Maximaltemperatur des Brandes aus der Betrachtung genommen werden, um rein die Löschmittelwirkung zu analysieren.

Tabelle 15: Abkühlraten der 5A-Holzkruppe basierend auf den Thermoelement-Messergebnissen

Versuchs ID	Abkühlrate
[-]	[°C/s]
V1	10,24
V2	13,24
V3	14,69
V4	11,37
V5	16,31
V6	16,31
V7	16,46
V8	18,53
V9	18,92

Die unterschiedlichen Löschtaktiken müssen getrennt betrachtet werden, jedoch ist deutlich zu erkennen, dass Wasser jeweils den geringsten Wert aufweist. Sehr interessant sind die unterschiedlichen Ergebnisse in Bezug auf den angewandten Löschangriff. Beim Vergleich zwischen V1 mit V7, wo in beiden Fällen Wasser verwendet wurde, ist eine um rund 60 % höhere Abkühlrate erkenntlich. Ähnliches gilt auch für die beiden anderen Löschmittel. Insofern ist es nicht nachvollziehbar, warum die Norm zur Klassifizierung von tragbaren Feuerlöschern (20), hinsichtlich der Löschtätigkeit so viel Spielraum zulässt. Es ist klar, dass eine geübte Person bessere Löschergebnisse erzielt, jedoch sollte eine Norm nicht auf dem Können von Einzelpersonen basieren. Gleiches gilt für die Klassifizierung von Löschmittelzusätzen.

Abbildung 32 stellt, unter Zuhilfenahme eines Balkendiagrammes, die Abkühlraten nach Löschmitteln gruppiert, dar. Der Fehler hinsichtlich der Thermoelemente kann, nach der Berechnung der Abkühlraten, mit $\pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ als vernachlässigbar angesehen werden. Bei

gleicher Löschtaktik, ist zu erkennen, dass Wasser stets den geringsten Wert aller Abkühlraten aufweist. Die Löschmittelzusätze MPST und F500 verhalten sich, mit Ausnahme der Löschtaktik 1, sehr ähnlich. Auf Grund der Adaptierungen der Löschangriffe wurde die Abkühlrate kontinuierlich von einer Löschtaktik zur nächsten verbessert. Hinsichtlich einer Klassifizierung muss eine hohe Abkühlrate nicht zwangsläufig zielführend sein. So kann beispielsweise eine größere Diskrepanz zwischen Löschmitteln und Wasser bei der Löschtaktik 2 im Vergleich zur Löschtaktik 3 erkannt werden.

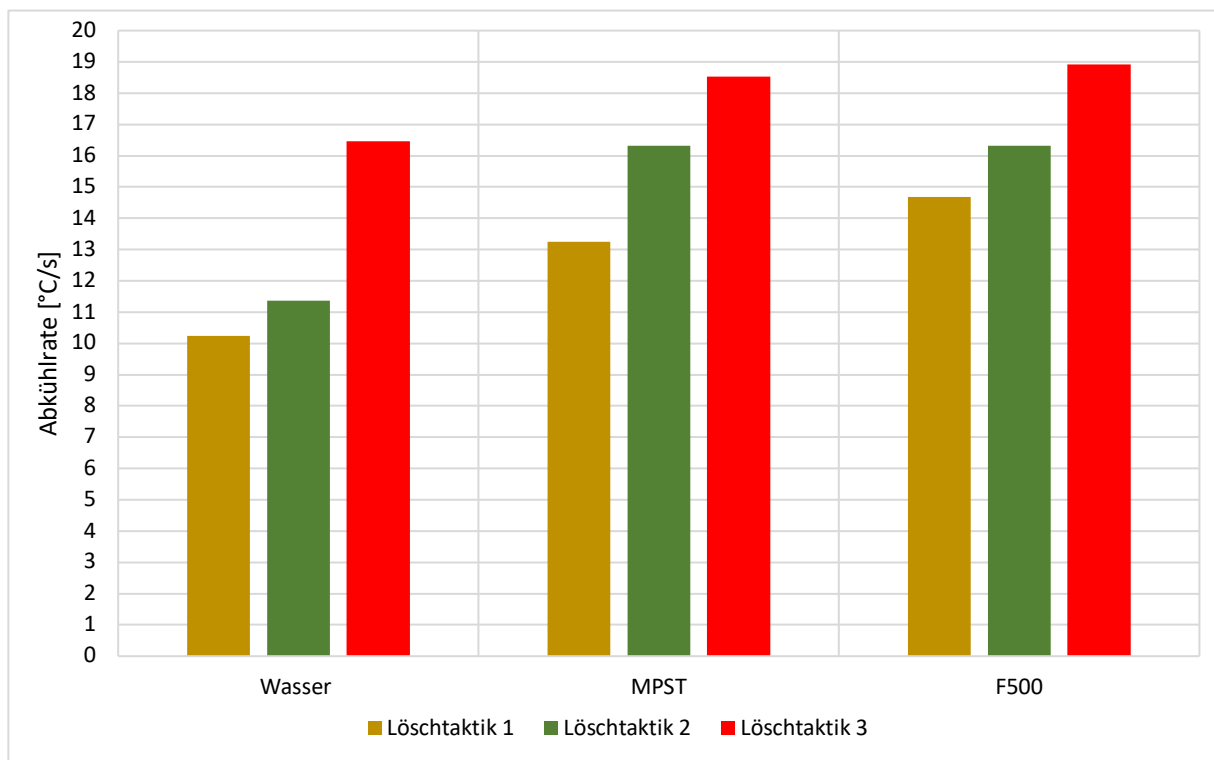


Abbildung 32: Balkendiagramm der Abkühlraten basierend auf den Thermoelement-Messergebnissen

Holzpaletten

Die folgende Abbildung 33 stellt die Ergebnisse für die händisch durchgeführten Löschanversuche, beginnend mit Versuch V5P, an den Holzpaletten dar. Wobei aufgrund der vereinfachten Reinigung der Löschanapparatur die Löschmittel hintereinander eingesetzt wurden. Nach einer anfänglichen Abkühlphase, bis ca. 50 s entwickelte sich bei einigen Versuchen der Brand aufs Neue, wodurch ein nachfolgender Temperaturanstieg zu bemerken war. Dabei waren die Spitzentemperaturen nach Sekunde 100 schwierig für einen Vergleich heranziehbar, da dies davon abhing, wann der externe Wasserstrahl für die Brandbekämpfung eingesetzt wurde.

Für V6P gibt es keine Aufzeichnung der Thermoelemente. Interessanterweise konnten zwei der Versuche mit Löschmittel MPST (V8P und V10P) vollständig mit dem Feuerlöscher gelöscht werden, was für das Löschmittel spricht. Bis zur Referenzzeit von 300 s konnte keine Wiederenflammung dieser beiden Versuche festgestellt werden. Bei V9P hingegen, musste nach 105 s zusätzlich gelöscht werden. Für alle Versuche mit Wasser, mit Ausnahme des V12P, konnte kein vollständiger Löscherfolg erreicht werden. Auf Grund von starkem Wind bei V12P, wurde der Versuch als V13P wiederholt.

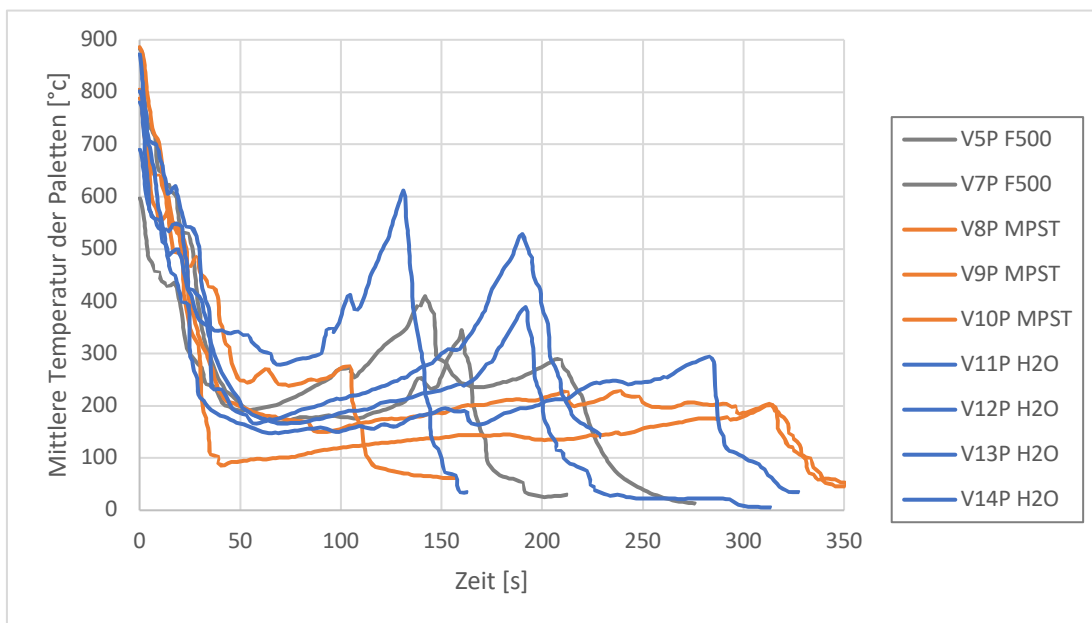


Abbildung 33: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente für die Holzpaletten nach der „händischen“ Löschmethode

In Abbildung 34 ist der Mittelwert der Temperaturverläufe je Löschmittel für die ersten 60 s der Löschung dargestellt. Eine Ausnahme stellt der V12P, auf Grund eines einseitigen und unterdurchschnittlichen Abbrandes (Vergleich Tabelle 12, V12P) dar. Dieses Versuchsergebnis wurde nicht für die Durchschnittsberechnung berücksichtigt. Die Brandendtemperaturen, also jene Werte direkt zu Beginn der Löschfähigkeit, reichten von 741°C bis 827°C und lagen damit in einem ähnlichen Bereich wie für die 5A-Holzkippen.

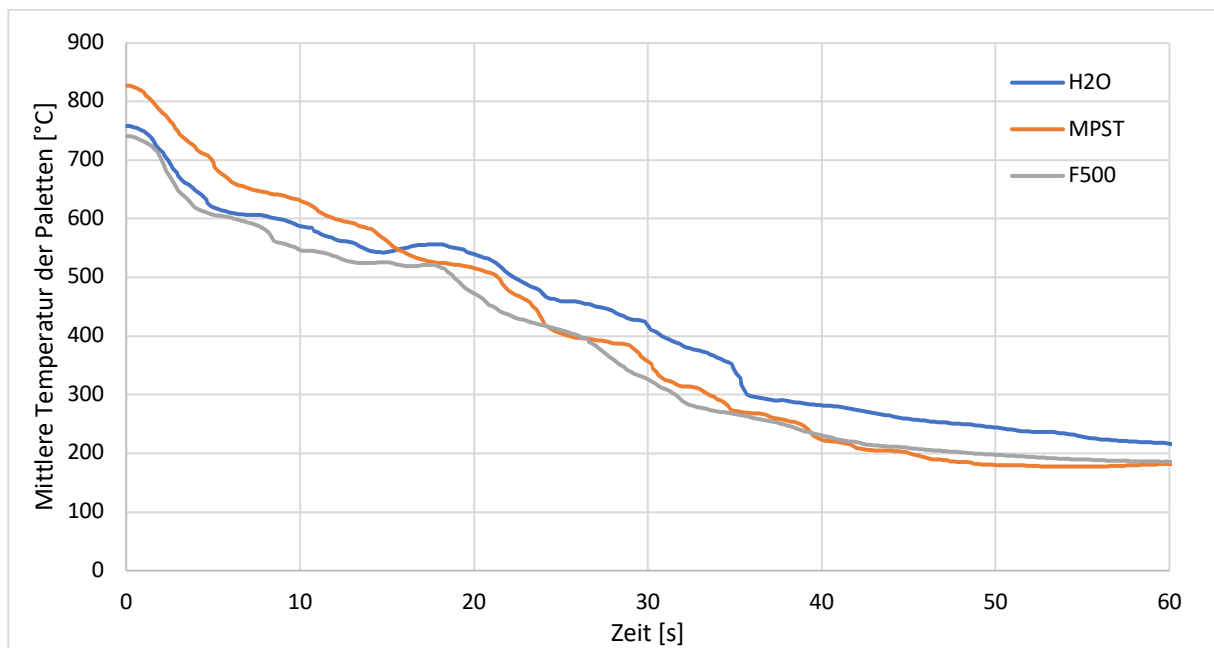


Abbildung 34: Gemittelte Ergebnisse der händischen Löschversuche, Thermoelemente

Durch die Wiederholung der händischen Versuche, stellte sich ein gewisser Lerneffekt ein. Die Versuchsperson erfuhr, bei fortschreitender Versuchsserie, eine gewisse Übung. Dieses Phänomen kann gut in der Masterarbeit von Ohrenberger (22) erkannt werden. Bei einer Vielzahl an händisch durchgeführten Laborversuchen, wurde bei gleicher Brandlast immer weniger Löschmittel verbraucht. Fraglich ist nun, ob sich ein ähnlicher Effekt und in welchem Ausmaß dieser sich auf Großbrände auswirkt. Dies würde bedeuten, dass vor allem die Versuche mit Wasser ein besseres Ergebnis erzielen, da sie am Ende der Versuchsserie durchgeführt wurden, nicht aber auf Grund des Löschmittels, sondern hauptsächlich durch einen effektiveren Löschangriff. In diesem Kapitel wurde bereits diskutiert, dass die angewandte Löschtaktik essenziell ist.

Tabelle 16 stellt die gemittelten Abkühlraten der Versuchsserie dar. Ähnlich wie bei den Holzkrippen, erreichte Wasser mit $11,93 \text{ }^\circ\text{C/s}$ den geringsten Wert. Der Unterschied zu Löschmittelzusätzen ist aber nicht so eklatant wie bei den Versuchen der 5A-Holzkrippen. Eventuell spielt hier der zuvor erwähnte Lerneffekt eine entscheidende Rolle, da mit Wasser effektiver gelöscht werden konnte im Vergleich zu den Versuchen am Vortag.

Tabelle 16: Abkühlraten der Holzpaletten-Versuche basierend auf die Thermoelement-Messergebnisse

Versuchs ID	Abkühlrate
<i>[-]</i>	<i>[°C/s]</i>
<i>Wasser</i>	11,93
<i>MPST</i>	15,11
<i>F500</i>	12,76

Den gemittelten Ergebnissen der Holzpaletten-Versuche darf nicht viel Aussagekraft, für die Bewertung der verwendeten Löschmittel, zugesprochen werden. Die Versuchsreihe war dafür nicht umfangreich genug, um eine statistische Aussage treffen zu können. Die Fehlerindikatoren in Abbildung 35 belegen deutlich, dass die Mittelwert der Abkühlraten innerhalb der Standardabweichung der anderen Versuchsserien liegen.

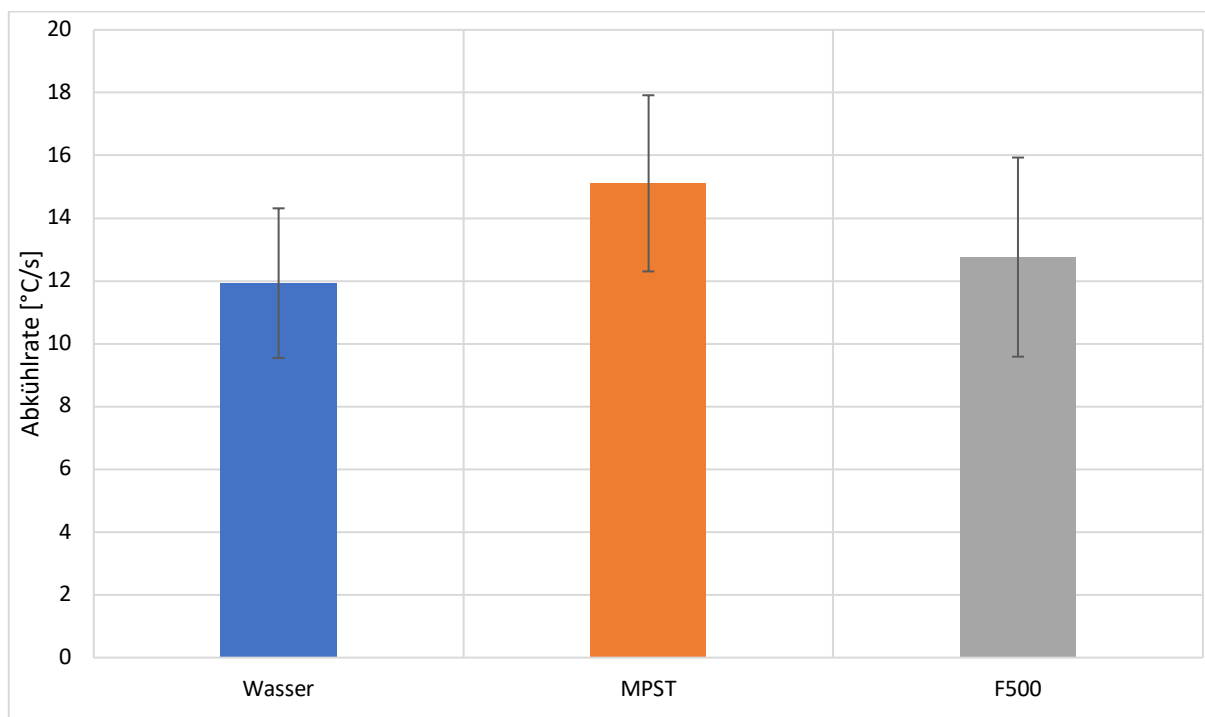


Abbildung 35: Balkendiagramm der Abkühlraten mit Standardabweichungen für die Holzpaletten-Versuche

Als störend und manchmal hindernd bei der Löschfähigkeit soll die Rauch- bzw. Dampfentwicklung erwähnt werden. Vor allem beim Einsatz mit Zusätzen ist eine größere und intensivere Rauchschwade erkennbar. Abhängig von der Windrichtung, kann es bei gewissen Stirnseiten zu Problemen bei der Löschung kommen, da die Paletten für die Versuchsperson kaum ersichtlich sind und somit eine Löschung erschwert wird. Der tatsächliche Einfluss über die komplette Versuchsreihe hinweg, kann jedoch als gering beurteilt werden.

Die entstehende Wärmeentwicklung ist vor allem bei den Paletten Versuchen nicht zu unterschätzen. Entsprechende Schutzkleidung, festes Schuhwerk und ein Helm mit Visier sind absolut notwendig, um sich dem Brand nähern zu können. Die Kunststoff Rückseite eines Monitors, welche in ca. 3 m Abstand aufgestellt war, wurde durch die hohen Temperaturen sogar merklich verformt.

5.3.2 Infrarot-Kamera

5A-Holzkrippe

Die folgenden 3 Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Infrarot-Kamera. Wie unter Punkt 3.4 Infrarot – Kamera beschrieben, werden dafür 2 Stirnseiten für die Auswertung herangezogen (Seiten C und D). Es wird postprozessierend im Softwareprogramm der Kamera eine Fläche definiert, welche bei allen Versuchen Einsatz findet. Abbildung 17 rechts, zeigt diesen Bereich, welcher mit Stirnseite C-D markiert ist. Das Programm errechnet dann eine mittlere Oberflächentemperatur für dieses Gebiet. Da der Brandaufbau immer an derselben Stelle errichtet wird und sich die Kameraposition nicht veränderte, konnte die Aufnahmen übereinandergelegt werden.

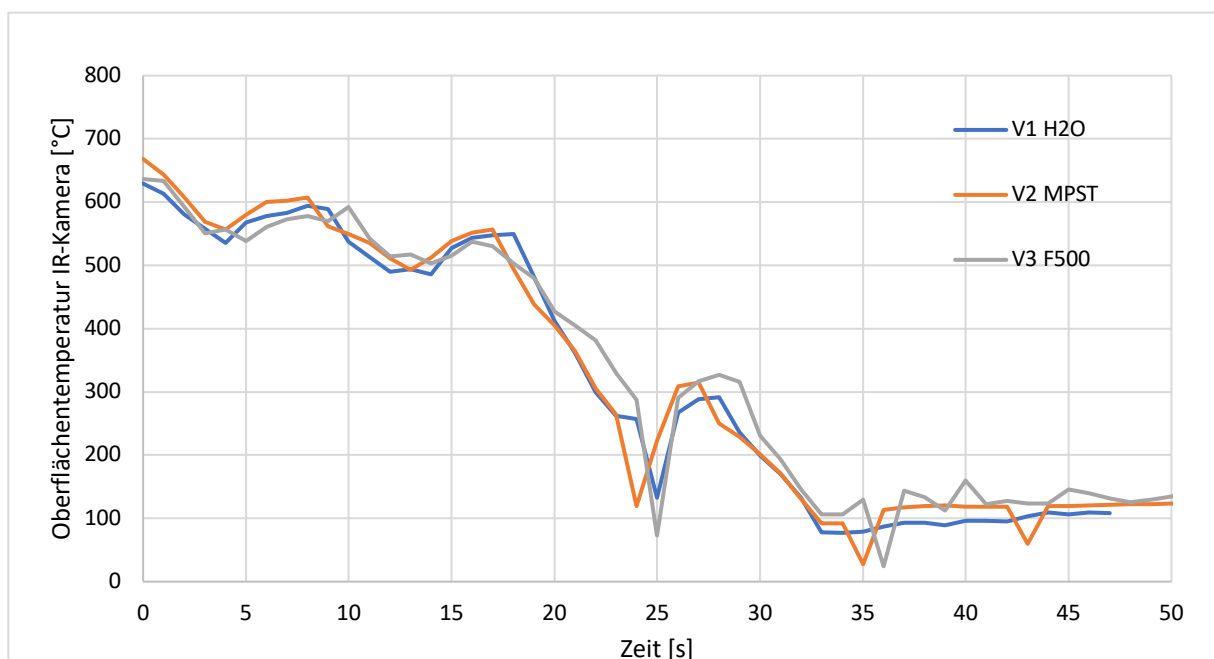


Abbildung 36: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkrippe nach Löschtaktik 1

Markant auffallend sind bei allen Versuchen die vermeintlich, extremen Temperaturabnahme der Oberfläche bei 24-25 s. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich die durchführende Person durch das Sichtfeld der IR-Kamera bewegte. Da die Kamera ein visuelles Verfahren anwendet, wurde daher kurzzeitig die Oberflächentemperatur der Versuchsperson mitgemessen.

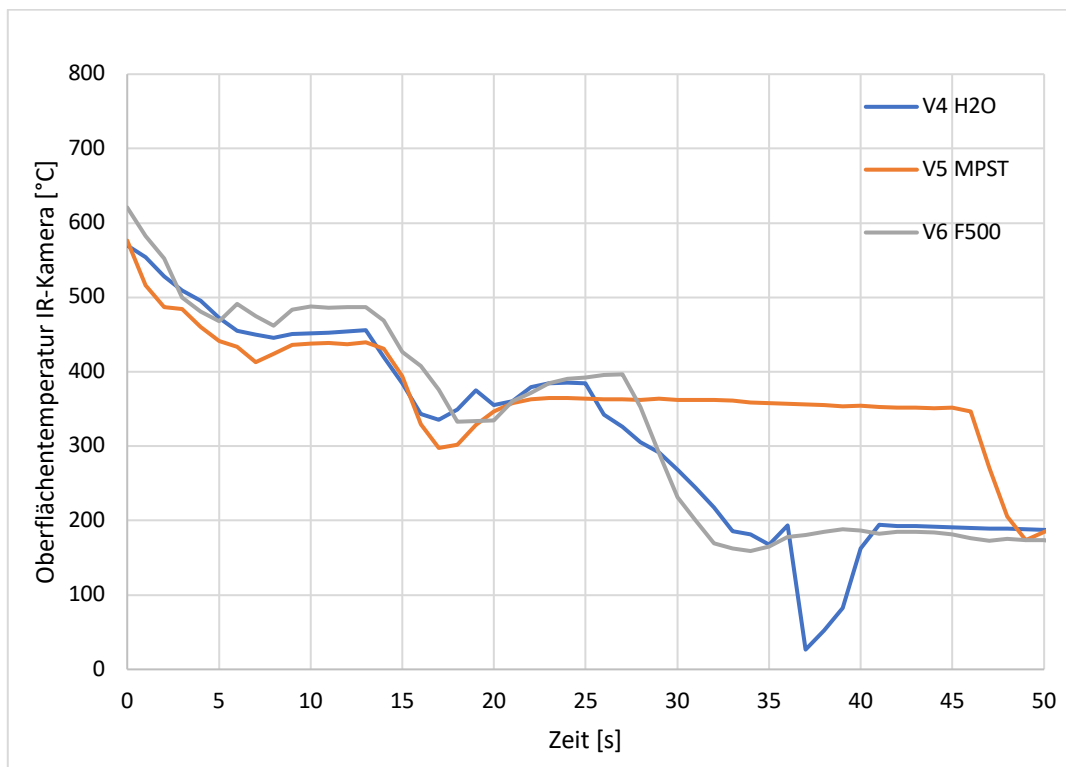


Abbildung 37: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkrippe nach Löschtaktik 2

Sowohl in Abbildung 37, als auch in Abbildung 38 können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Löschmitteln festgestellt werden, da sich die Linien oftmals kreuzen und kein klarer Trend erkennbar ist. Als Ausnahme zählt V5, welcher nach 22 s einen konstanten Wert hält. Dies kann damit begründet werden, dass lediglich die ersten beiden Stirnseiten (A und B) gelöscht wurden, und damit der Brand soweit unterdrückt wurde, dass keine weitere Löschfähigkeit mehr erforderlich war.

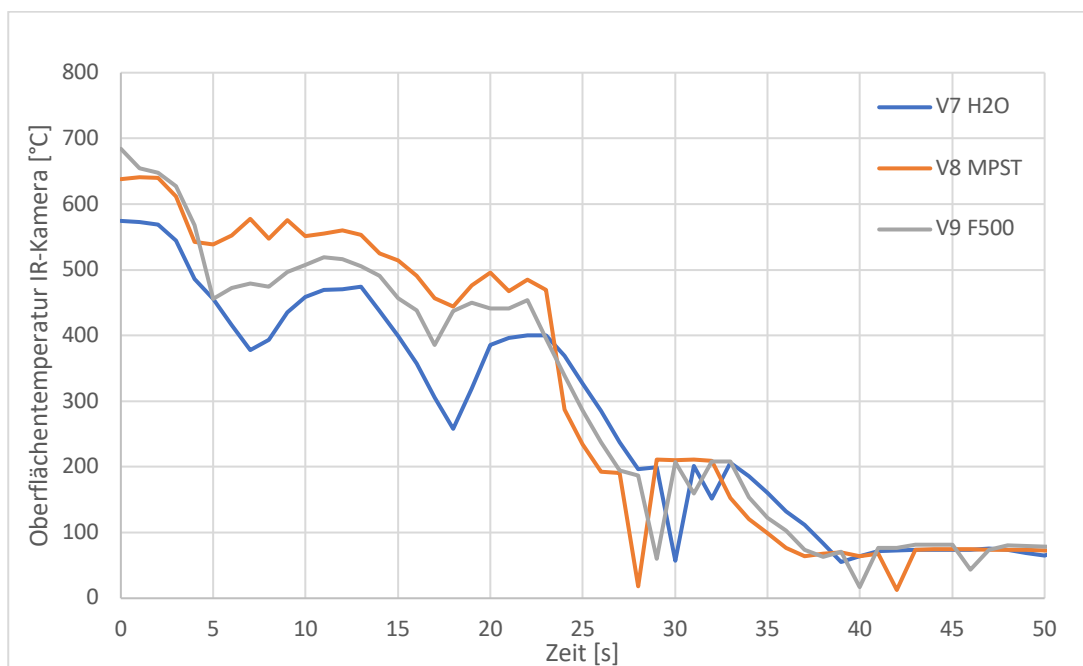


Abbildung 38: Gemittelter zeitlicher Temperaturverlauf der Thermografie-Kamera für die 5A-Holzkrippe nach Löschtaktik 3

Die auffallenden ‚Täler‘ der einzelnen Linien zwischen Sekunde 20 und 30 kann durch Verstellung des Sichtfeldes der IR-Kamera auf den Brand beschrieben werden. Da bei der Löschtaktik 2 nur so lange gelöscht wurde, wie es für notwendig empfunden wurde, trat bei dieser Versuchsreihe nur bei V4 diese Falschmessung auf.

Holzpaletten

Zur Auswertung der IR-Kamera wurde ebenso ein Bezugsfeld definiert, welches in Abbildung 39 mit der Beschriftung ‚Stirnseite C-D‘ erkenntlich ist. Durch den etwas adaptierten Thermoelementen Aufbau, ergab sich für das Element T5 die Nähe zur Stirnseite D. Auffallend ist, dass die unterste Palette wenig bis kaum entzündet war und die größte Wärmestrahlung aus der Mitter der oberen Hälfte abgegeben wurde.

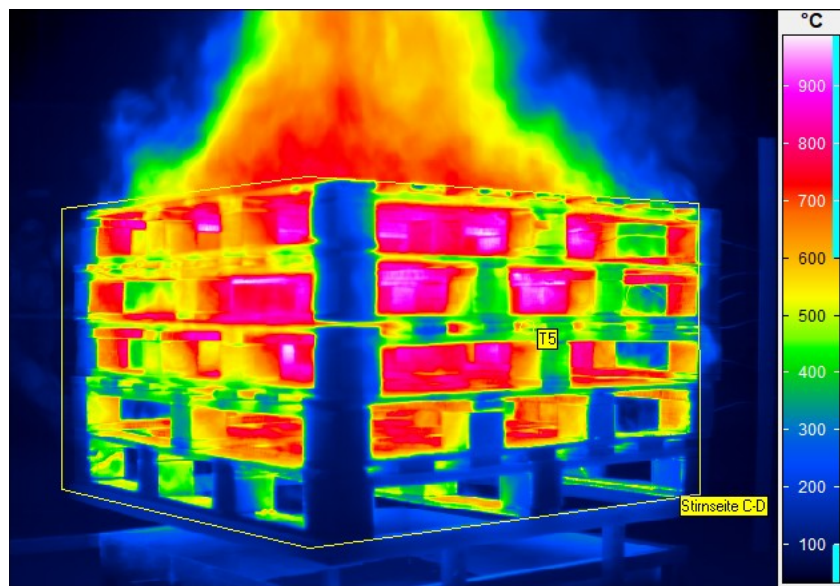


Abbildung 39: Thermografie Aufnahme des Paletten-Brandes V7P mit Messbereich, Stirnseiten C-D

Abschließend zeigt die Grafik in Abbildung 40 die Ergebnisse der händischen Löschkversuche der durchschnittlichen Temperaturverläufe je Löschmittel gemessen mittels Infrarot-Kamera. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den 5A-Holzrippen-Versuchen hinsichtlich der niedrigeren Starttemperatur im Vergleich zu den Verläufen der Thermoelementwerte. Auffallend ist, dass F500 eine etwas abweichende Kühlperformance aufweist, als die beiden Löschmittelzusätze.

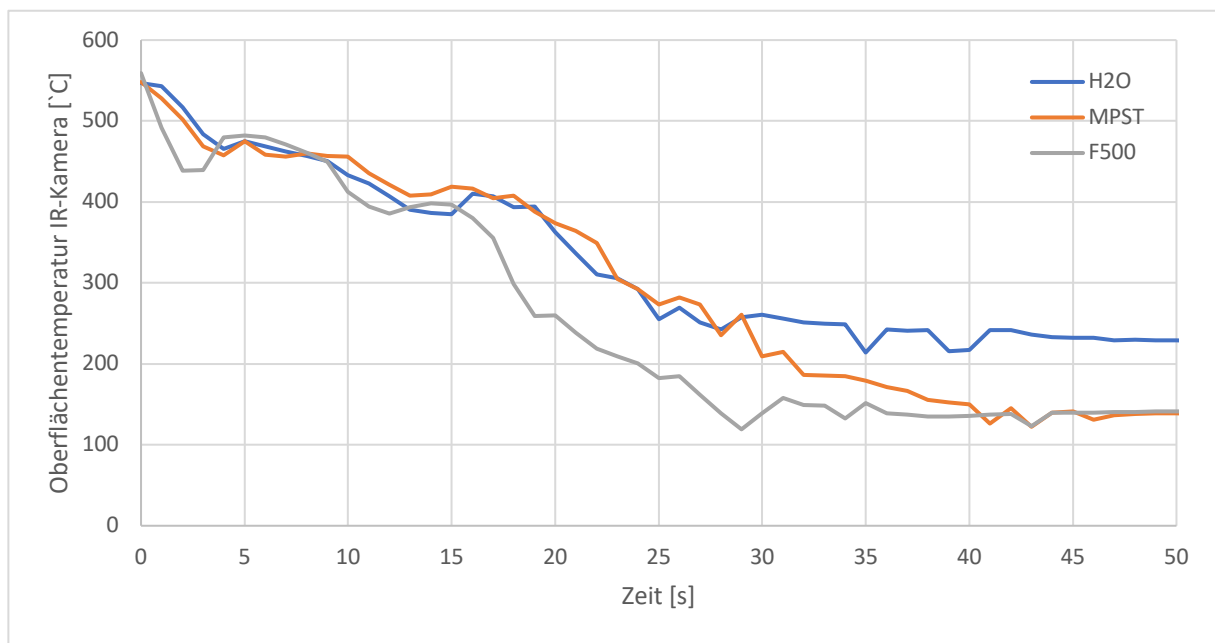


Abbildung 40: Gemittelte zeitliche Temperaturverläufe der Thermografie-Kamera für die Holzpaletten je Löschmittel

Bei einer größeren Versuchsserie sind Unterscheidungen zwischen den einzelnen Löschmitteln möglich, siehe Abbildung 40 im Vergleich zu den Einzelergebnissen der 5A-Holzkippen (Abbildung 36 bis Abbildung 38). Allgemein sind die Schwankungen auf Grund der Strahlungsmessung aber stärker ausgeprägt als bei den Thermoelementmessungen.

Die Ergebnisse der IR-Kamera zeigen geringere Werte als die der gemittelten Thermoelemente. Abbildung 41 zeigt einen Vergleich zwischen dem Thermoelement 6, welches sich am nächsten zur Stirnseite D befindet und dem Ergebnis der IR-Kamera Auswertung. Es ist hinzuzufügen, dass die Abkühlung an den Oberflächen weniger stark feststellbar ist, also mit den Thermoelementen.

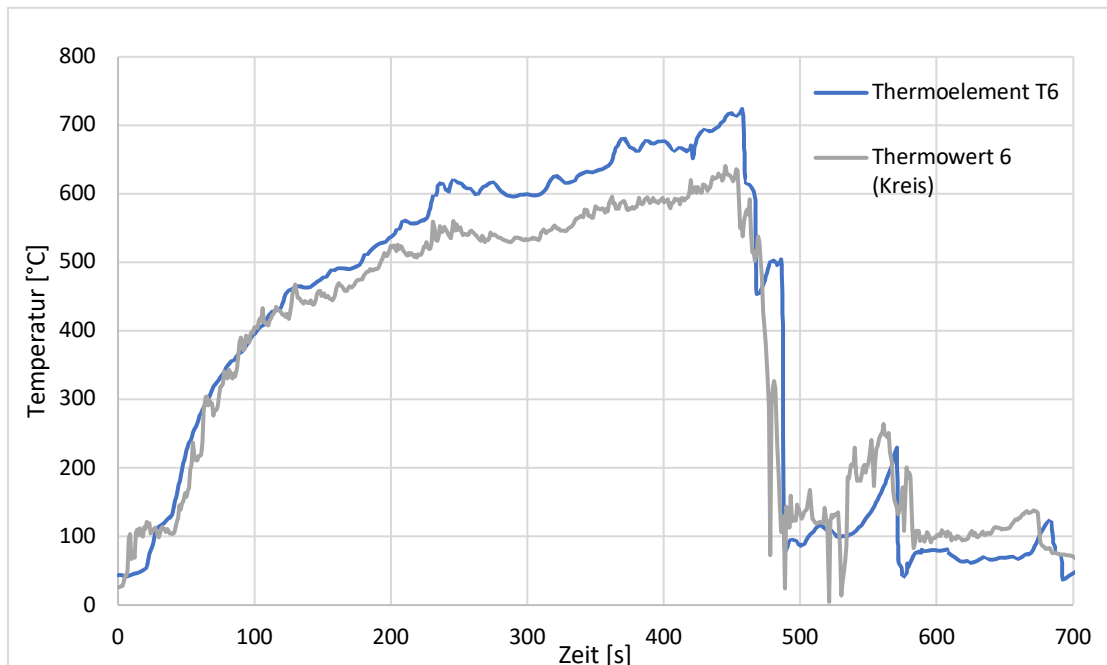


Abbildung 41: Vergleich Thermoelement 6 -Temperaturwert 6 (IR-Kamera), V3

Die Temperaturmessung mittels Thermografie ist, hinsichtlich der optischen Beschränktheit auf lediglich 2 Stirnseiten, wenig zielführend für Brandversuche. Zusätzlich kann das Sichtfeld der Kamera, während der Löschfähigkeit, eingeschränkt werden, wodurch in dieser Zeit keine Aussage über den Temperaturverlauf getroffen werden kann.

6 Schlussfolgerung

Für die Entwicklung einer Durchführungsmethodik zur quantitativen Klassifizierung von Löschmittelzusätzen, wurden zwei verschiedene Brandszenarien durchgeführt. Bei diesen Realversuchen sind insgesamt drei Löschmittel, unter Zuhilfenahme einer 6 l – Sprühvorrichtung, zum Einsatz gekommen. Für die Ermittlung der Temperaturen und der Wärmefreisetzungsraten sind Thermoelemente, eine Infrarot-Kamera und eine Waage verwendet worden.

In Bezug auf das Verhalten der Brände konnten zwei Ergebnisse präsentiert werden. Dabei ergaben sich bei den Holzkrippen reproduzierbarere Versuche als bei den Holzpaletten. Die größere Versuchsanzahl an Paletten-Versuchen kann jedoch ein statistisch aussagekräftigeres Ergebnis erzielen. Es stellt sich diese ökonomische Frage, da der Holzpaletten-Preis einen Bruchteil der normgerechten Hölzer darstellt. In Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse muss der Krippenaufbau jedoch bevorzugt werden. Allgemein ist zur Brandlast noch hinzuzufügen, dass gut ausgelegte Versuche in einer Halle die Wiederholbarkeit um ein Vielfaches erhöhen könnten, da der Wind keinen Einfluss auf das Brandgeschehen hat.

Eine der grundlegenden Erkenntnisse dieser Arbeit ist die große Abhängigkeit des Löscherfolges in Zusammenhang mit der angewandten Löschtaktik. Wenn Löschtaktik 1 mit Löschtaktik 3 verglichen wird, ist ersichtlich, dass die eingesetzten Angriffe größere Unterschiede aufweisen als die Diskrepanz zwischen den Zusätzen. Die Bevorzugung der Löschtechnik „von unten nach oben“ anstelle „von oben nach unten“ zu löschen ist allgemein bekannt. Jedoch soll dieser Faktor bei einem Klassifizierungsvorhaben so gut wie möglich aus dem Einflussbereich gezogen werden. Gleiches gilt für die Holzpaletten-Versuche, wo eine standardisierte Löschung unter Zuhilfenahme einer adaptierten Löschvorrichtung,

zielführender sein kann. Für weitere Untersuchungen wäre es sinnvoll eine größere Sprühvorrichtung zu entwickeln um auch die Holzpaletten, ähnlich wie die Holzkrippen, zu löschen.

Allgemein kann zusammengefasst werden, dass die Versuchsdurchführung einen Lernprozess durchlaufen hat. Da ein Brand ein chaotisches System ist, ist es umso wichtiger, dass viele Versuche durchgeführt werden. Einzelversuche bilden die Wirklichkeit nicht aussagekräftig ab, da oft Unterschiede zwischen den Bränden und Glutnestern auf Grund äußerer und innerer Einwirkungen entstehen.

Zusammengefasst waren die Holzpaletten-Brände, hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit konstant und sind durchaus für Versuchsserien verwendbar. Der verwendete 6 l – Feuerlöscher war für die entstandenen Brandlasten eindeutig zu klein gewählt. Mit der händischen Löschung ist es zwar teilweise gelungen, die Flammen zu löschen, jedoch musste die gesamte Löschmittelmenge eingesetzt werden. Bei einem Wiederaufflammen kann dadurch nie eine sinnvolle Aussage über die verbrauchte Löschmittelmenge getätigt werden, da schlichtweg zu wenig vorhanden war.

Rückblickend kann hinterfragt werden, ob die fix vorgegebene Brenndauer der richtige Ansatz für den Beginn der Löschfähigkeit war. Zum Beispiel könnte der Abbrand (kg) als Startkriterium definiert werden. Es stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt sich die verschiedenen Brände in derselben Entwicklungsphase befinden. Ein mittlerer Temperaturwert könnte ebenso als Auslöser dienen. Das Ziel eine möglichst idente Brandlast zu erzeugen bleibt dasselbe. Es wäre ebenso möglich mehrere Parameter zu definieren, so könnte nach einer gewissen Zeit der Abbrand kontrolliert werden und erst nach Überschreitung eines gewissen Mindestwerts mit der Löschung begonnen werden. V12P stellt ein gutes Beispiel dar, denn bei noch längerem Warten, wäre der Brand stärker entwickelt und würde so vergleichbarer mit den anderen Versuchen sein.

Literaturverzeichnis

- (1) **Giselbrecht K.** Zahlen, Daten, Fakten zu Bränden mit Todesfolgen in Gebäuden in Österreich. Bregenz : Brandverhütungsstelle Vorarlberg.
- (2) **Widetschenk O.** *Heiße Zahlen*. Graz : Brandschutzforum Austria, 2015.
- (3) **Brandverhütungsstellen Österreich.** *Brandstatistik der Österreichischen Brandverhütungsstellen*. Linz : Die österreichischen Brandverhütungsstellen, 2016.
- (4) **Kern H.** *Brandschutz in Industrieanlagen - Vorlesung Anlagensicherheit 1*. Leoben : Montanuniversität Leoben, 2015.
- (5) **Brushlinsy N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P.** *World Fire Statistics*. : Internationale Vereinigung des Feuerwehr- und Rettungswesen, 2018.
- (6) **Feuerwehrverband Österreichischer.** *Die Löschmittel 2. überarbeitete Ausgabe für Österreich*. Bern : Verlag Schweiz. Feuerwehr-Kalender, 1998.
- (7) **Liebson J.** *Making water more efficient 42-44*. 1995.
- (8) **de Vries H.** *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum: Technik und Taktik*. Landsberg am Lech : Ecomed , 2000.
- (9) **Rodewald G.** *Brandlehre*. Nordrhein-Westfalen : W. Kohlhammer Verlag, 2006. ISBN 3-17-019129-2.
- (10) **Bergdoll R., Breitenbach S.** *Die Roten Hefte Heft 1 - Verbrennen und Löschen*. 18. Auflage. Stuttgart : Kohlhammer, 2019. ISBN 978-3-17-026968-2
- (11) **Brandes E., Möller W.** *Sicherheitstechnische Kenngrößen - Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase*. Bremerhaven : Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2003.

- (12) **Staatliche Feuerweherschule Würzburg.** Brennen und Löschen 4.1. S.12.
- (13) **Brandklassen und 2:1992+A1:2004, Deutsche Fassung EN.**
- (14) **NFPA 10.** *Portable Fire Extinguishers.* 2013.
- (15) **ÖNORM EN 2. 2004-12-01.** *Brandklassen.*
- (16) **Raupenstrauch H.** *Brennstoff- und Verbrennungstechnik (Vorlesungsunterlagen).*
Leoben : s.n., 2017.
- (17) **ÖNORM F 1000.** *Feuerwehrtechnik und Brandschutzwesen - Allgemeine Begriffe.*
2007.
- (18) **BITEAU H., STEINHAUS T., SCHEMEL C., SIMEONI A., MARLAIR G., BAL N., TORERO J.L.** *Calculation Methods for the Heat Release Rate of Materials of Unknown Composition.*
- (19) **Wibera Wirtschaftsberatung A.G..** *Grundsatzstudie Feuerwehr - Zusammengefasster Ergebnisbericht S. 48 ff.* Düsseldorf : s.n., 1978.
- (20) **DIN EN 16712-1.** *Tragbare Geräte zum Ausbringen von Löschmitteln, die mit Feuerlöschern gefördert werden - Tragbare Schaumgeräte - Teil 1: Zumischer PN 16.*
2015.
- (21) **Mühlbauer A.** *Technische Wärmelehre Teil 1: Wärmeübertragung (Vorlesungsskriptum)* Institut für Elektrowärme : Universität Hannover, 1989/90.
- (22) **Ohrenberger G.** *Erarbeitung einer Versuchsmethodik zur Bewertung der Löschwirkung von Löschmittelzusätzen.* Leoben : Montanuniversität Leoben, 2017.
- (23) **Holubar S.** *Entwicklung einer automatisierten Löschvorrichtung für Brandversuche im Labormaßstab, Bachelorarbeit.* Leoben : Montanuniversität Leoben, 2018.
- (24) **Grimm M.** *Untersuchung von Löschwasserzusätzen an einer automatischen Löschvorrichtung.* Leoben : Montanuniversität Leoben, 2020.
- (25) **Barrett L. I.** *Possibilities of Fire-Extinguishing Chemicals in Fighting Forest Fires. 2,*
Columbus : Journal of Forestry, 1931, Bd. 29.
- (26) **Blakely A. D.** *Combustion Recovery of Flaming Pine Needle Fuel Beds Sprayed With Water/MAP Mixtures.* University of Minnesota : United States Department of Agriculture, Intermountain Research Station, 1990. INT-421.

- (27) **Rappsilber T., Below P., Krüger S.** *Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range.* Berlin : Fire Safty Journal, 2019.
- (28) **Rappsilber T., Krüger S.** *Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams.* Berlin : Fire Safety Journal, 2018.
- (29) **Noaki M., Delichatsios M. A., Yamaguchi J., Ohmiya Y.** *Heat release rate of wooden cribs with water application for fire suppression.* Tokio : Fire Safety Journal, 2018.
- (30) **Omega.** (Online) Thermoelement. abgerufen am: 10.05.2021, <https://www.omega.de/prodinfo/thermoelemente.html>
- (31) **Datenblatt RS Com.** (Online). abgerufen am: 10.5.2021, <https://docs.rs-online.com/a31d/0900766b815bb239.pdf>.
- (32) **Schweizer-FN.** Emissionsgrad von verschiedenen Werkstoffen und Oberflächen. (Online) abgerufen am: 8.4.2021, <https://www.schweizerfn.de/stoff/strahlungswaerme/strahlungswaerme.php>.
- (33) **F-500 Technology GmbH.** Steckbrief zu F-500 EA. *F-500 EA.* (Online) abgerufen am: 12.05.2021, <https://www.f-500.de/produkt/steckbrief-f-500-ea.html>.
- (34) **Energie Experten.** (Online) 21.6.2018, abgerufen am: 25.4.2021, <https://www.energie-experten.org/heizung/holzheizung/brennholz/brennwert-holz>.
- (35) **Kern H.** *Industriebrandbekämpfung für kommunale Feuerwehren.* Leoben : Blaulicht-Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik, 2015.

7 Anhang

KERN EOE300K100XL

Allround-Plattformwaage für Logistik, Gewerbe und Industrie



Messsystem	
Ablesbarkeit [d]:	100 g
Anwärmzeit:	10 min
Auflösung:	3000
Außermittige Belastung bei 1/3 Max:	300 g
Einschwingzeit:	3 s
Empfohlenes Justiergewicht:	200 kg (M2)
Justiermöglichkeiten:	Justierung mit externem Gewicht
Linearität:	200 g
Reproduzierbarkeit:	100 g
Tarierbereich:	300 kg
Wägebereich [Max]:	300 kg
Wägeeinheiten:	kg lb
Wägesystem:	Dehnungsmessstreifen
Anzeige	
Display Ziffernhöhe:	2,500 cm
Funktionen	
Data-Hold-Funktion:	ja
Erschütterungsfreies Wägen (Tierwägeprogramm):	ja
Umgebungsbedingungen	
Luftfeuchtigkeit (max.):	80 %
Umgebungstemperatur (max.):	35 °C
Umgebungstemperatur (min.):	10 °C
Energieversorgung	
Batterie-Betriebsdauer:	60 h
Eingangsspannung:	220 V - 240 V AC 50 Hz

n/a:	Netzadapter extern
Energieversorgung	
Netzteill/Adapter im Lieferumfang:	CH EURO
Dienstleistungen	
DAkkS-Kalibrierschein:	963-129
Justage auf Aufstellungsort:	961-249
Kategorie	
Kategorie:	Waagen
Marke:	KERN
Produktgruppe:	Plattformwaage
Verpackung & Versand	
Abmessungen Verpackung (BxTxH):	1150 x 620 x 115 mm
Bruttogewicht:	22.300 kg
Lieferzeit:	24 h
Nettogewicht:	19 kg
Versandart:	Paketdienst
Bauform	
Abmessungen Anzeigerät (BxTxH):	210 x 110 x 45 mm
Abmessungen Wägeplatte (BxTxH):	945 x 505 x 65 mm
Drehbare Fußschrauben:	ja
Gehäusematerial:	Kunststoff
Kabellänge Anzeigerät:	2,700 m
Material der Wägeplatte:	Stahl lackiert
Wandhalterung:	ja
Wägefläche (BxT):	945 x 505 mm



LEHRSTUHL FÜR THERMOPROZESSTECHNIK

Lehrstuhlleiter
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Raupenstrauch
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben
Tel. +43(0)3842 402-5801
Fax +43(0)3842 402-5802
Email: tpt@mu-leoben.at
<http://institute.unileoben.ac.at/thermoprozesstechnik>

Prüfbericht

Auftraggeber:	Intern
Eingang der Probe:	01.01.2021
Überbringer	Ehgartner
Gebinde	1*Wanne
Gewicht der Probe:	-
Bezeichnung:	Holz für Verbrennungsversuche
Analysennummer:	14-21

	lufttrocken	wasserfrei
Flüchtige Bestandteile [%]	76,76	85,46
C _{fix} [%]	12,87	14,33
Zwischensumme (=Substanz) [%]	89,63	99,79
Asche [%]	0,19	0,21
Wasser [%]	10,19	0,00
Σ	100,00 [%]	100,00 [%]
Kohlenstoff [%]	46,80	52,11
Wasserstoff [%]	6,23	6,94
Stickstoff [%]	0,19	0,21
Gesamtschwefel [%]	0,00	0,00
Sauerstoff (Rest) [%]	36,41	40,54
Σ	89,63 [%]	99,79 [%]
Brennwert [kJ/kg]	17.825	19.847
Heizwert [kJ/kg]	16.208	18.323

Leoben am: 07.04.2021

Labor

Thomas Ehgartner
Tel.: 03842-402-5822
mail: thomas.ehgartner@unileoben.ac.at



Lehrstuhlleiter

Univ.-Prof. Dip.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch



Medizinische Universität Graz

D&F Institut für Hygiene, Mikrobiologie und Umweltmedizin

Vorstand: Univ. Prof. Dr. Ivo Steinmetz
Neue Stiftingtalstraße 6, 8010 Graz



Wasserhygiene und Mikroökologie

Staatlich akkreditierte Prüf- und Inspektionsstelle
Leitung: Univ. Prof. Mag. Dr. rer. nat. Franz F. Reinthaler
Stellvertretung: Amtsärztin Sabine Plutzer
Neue Stiftingtalstraße 2A/2. OG, 8010 Graz
Tel.Nr.: 0316 385 73614

Auftraggeber
Marktgemeinde Gratkorn
Dr. Karl Renner-Straße 47
8101 Gratkorn

Probenherkunft
WVA Marktgemeinde Gratkorn
Dr. Karl Renner-Straße 47
8101 Gratkorn

Eingang / Prüfung: 15.09.2020

Prüfbericht: PB202613

gemäß EN ISO/IEC 17025; RZ = Richtzahl (Indikatorparameterwert), ZHK = zulässige Höchstkonzentration (Parameterwert),

MU% = Messunsicherheit, n.u. = nicht untersucht, Unterauftragnehmer*, nicht akkreditierter Parameter**;

Probenahme intern gemäß ISO 17020: TWV/ BHygV/ ÖNORM ISO 5667 Teil 3,4,5 / ÖNORM EN ISO 19458

überbrachte Probe (externer Probenehmer): Vor-Ort-Parameter und Lokalausweis nicht akkreditiert; Sensorik im Labor bestimmt

Probenbezeichnung	P3 HB Brunnenleitungen, Entnahmeleitung
--------------------------	---

Nähere Probenbezeichnung:

Probennummer: P2006676
Probenahme am: 15.09.2020
Probenahme durch: Gerald Ruckenbauer
Probenahmeart: Hahnentnahme
Entnahmestelle: Hochbehälter
Vorbehandlung: teilweise UV-Desinfektion

Vor-Ort-Parameter

Parameter	Einheit	Ergebnis	MU%	RZ	ZHK	Methode
Temperatur	°C	16,5				DIN 38404-4:1976
Farbe		farblos				ÖNORM M 6620:2012
Aussehen		klar				ÖNORM M 6620:2012
Geruch		ohne				ÖNORM M 6620:2012

PRÜFBERICHT BEZIEHEN SICH AUSSCHLIEßLICH AUF DIE UNTERSUCHTE PROBE.
PRÜFBERICHT DÜRFEN NUR VOLLSTÄNDIG REPRODUZIERT (KOPIERT) WERDEN.

Ausfertigungsdatum: 21.09.2020

Prüfbericht: PB202613

Parameter	Einheit	Ergebnis	MU%	RZ	ZHK	Methode
Geschmack		n.u.				ÖNORM M 6620:2012

Bakteriologische Untersuchung

Parameter	Einheit	Ergebnis	MU%	RZ	ZHK	Methode
Koloniebildende Einheiten bei 22°C	KBE/ml	0	50	≤100		ISO 6222:1999
Koloniebildende Einheiten bei 37°C	KBE/ml	0	50	≤20		ISO 6222:1999
Escherichia coli	KBE/100ml	0			0	ISO 9308-1:2014
Coliforme Bakterien	KBE/100ml	0		0		ISO 9308-1:2014
Enterokokken	KBE/100ml	0			0	ÖNORM EN ISO 7899-2:2000

chemisch - physikalische Untersuchung

Parameter	Einheit	Ergebnis	MU%	RZ	ZHK	Methode
Färbung (436nm)	/m	< 0,1	10	< 0,5		DIN EN ISO 7887:2012
pH-Wert	bei 20°C	7,54	5	6,5 - 9,5		EN ISO 10523:2012
Elektrische Leitfähigkeit (20°C)	µS/cm	461	5	≤ 2500		DIN EN 27888:1993
Calcium	mg/l	92,3	6	≤ 400		EN ISO 11885:2009
Magnesium	mg/l	14,1	6	≤ 150		EN ISO 11885:2009
Natrium	mg/l	4,0	6	≤ 200		EN ISO 11885:2009
Kalium	mg/l	1,7	6	≤ 50		EN ISO 11885:2009
Gesamthärte	°dH	16,1				DIN 38409-6:1986
Gesamthärte	mmol/l	2,883				DIN38409-6:1986
Karbonathärte	°dH	13,4				DIN 38409-6:1985
Säurekapazität(KS 4,3)	mmol/l	4,79	5			DIN 38409-7:2005
Eisen	mg/l	< 0,02	5	≤ 0,20		EN ISO 11885:2009
Mangan	mg/l	< 0,005	10	≤ 0,050		EN ISO 11885:2009
Ammonium	mg/l	< 0,02	15	≤ 0,50		DIN 38406-5:1983
Nitrit	mg/l	< 0,01	10		≤ 0,10	DIN EN 26777:1993

PRÜFBERICHTE BEZIEHEN SICH AUSSCHLIEßLICH AUF DIE UNTERSUCHTE PROBE.
PRÜFBERICHTE DÜRFEN NUR VOLLSTÄNDIG REPRODUZIERT (KOPIERT) WERDEN.

Ausfertigungsdatum: 21.09.2020

Prüfbericht: PB202613

Parameter	Einheit	Ergebnis	MU%	RZ	ZHK	Methode
Nitrat	mg/l	9,0	10		≤ 50	EN ISO 10304-1:2009
Chlorid	mg/l	6,5	10	≤ 200		EN ISO 10304-1:2009
Sulfat	mg/l	28,5	10	≤ 250		EN ISO 10304-1:2009
TOC	mg/l	0,6	10	≤ 6		EN 1484:1997

PRÜFBERICHTE BEZIEHEN SICH AUSSCHLIEßLICH AUF DIE UNTERSUCHTE PROBE.
PRÜFBERICHTE DÜRFEN NUR VOLLSTÄNDIG REPRODUZIERT (KOPIERT) WERDEN.

Ausfertigungsdatum: 21.09.2020