

Masterarbeit

Erarbeitung einer Versuchsmethodik zur Bewertung der Löschwirkung von Löschmittelzusätzen

erstellt am

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Vorgelegt von:

Gregor Ohrenberger, BSc
01035303

Betreuer:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Hannes Kern
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 16.11.2017

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.

Ort/Datum

Unterschrift

Danksagung

Die Fertigstellung dieser Arbeit markiert das baldige Ende meines Studentenlebens. Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um meinen Dank an all jene auszusprechen, die mich über diese Zeit hinweg begleitet haben. Durch sie hatte ich eine sehr erfüllte und glückliche Studentenzeit, an die ich stets gerne und voller Dankbarkeit zurückdenken werde.

Beginnen möchte ich bei meinen Eltern, denen ich es letztendlich zu verdanken habe, im beschaulichen Städtchen Leoben gelandet zu sein und auf deren Unterstützung ich immer zählen konnte.

Ich hatte das große Glück, vielen außergewöhnlichen Menschen begegnet zu sein. Im Laufe eines Studiums geht wohl jeder durch Höhen und Tiefen. Umso wichtiger ist es Freunde um sich zu haben, die einem zur Seite stehen. Ihnen möchte ich von ganzem Herzen danken. Über meine Zeit in Leoben entstanden enge Freundschaften, die – und davon bin ich überzeugt – ein Leben lang halten werden.

Schließlich möchte ich meinen besonderen Dank an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch und Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hannes Kern aussprechen, die meine Diplomarbeit überhaupt ermöglichten und mich bei Fragen und Problemen stets wohlwollend unterstützten. Mein Dank gilt jedoch ebenso allen anderen Professoren und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Lehrstühle für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Thermoprozesstechnik und Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes. Ein sympathischeres, offeneres und konstruktiveres Umfeld kann sich ein Student wohl nicht wünschen.

Vielen Dank und Glück Auf!

Kurzfassung

Erarbeitung einer Versuchsmethodik zur Bewertung der Löschwirkung von Löschmittelzusätzen

Anwender von Löschmittelzusätzen zur Bekämpfung von Bränden der Klasse A stehen oft vor dem Problem, den vielfältigen Produkten am Markt ohne geeignete Bewertungsgrundlage gegenüberzustehen. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, eine Versuchsmethodik zu entwickeln, mit der die Löschwirkung von Löschmittelzusätzen zur Bekämpfung von Klasse A Bränden quantifiziert werden kann und die somit eine Bewertungsgrundlage bieten könnte.

Zunächst wurde eine Übersicht über die gegenwärtig gebräuchlichen Löschmittel, ihre Verwendung und ihre Löschwirkung gegeben. Ebenso wurden Löschversuche an Feststoffbränden, die weltweit von Feuerwehrorganisationen, privaten sowie öffentlichen Forschungseinrichtungen betrieben wurden, beschrieben, kategorisiert und ihre Vor- und Nachteile dargestellt.

Die Versuchsmethodik, die im praktischen Teil der Arbeit auf Basis von Kiefernholzstäben entwickelt wurde, sollte sehr einfach im Labor durchführbar sein. Durch eine hohe Versuchsanzahl soll die Aussagekraft der Löschexperimente erhöht werden. Zur Entwicklung einer solchen Methodik wurden Überlegungen zu den grundsätzlichen Versuchsparametern und den möglichen Einflussgrößen angestellt und diese in vielfältigen Versuchen näher erforscht. Schlussendlich konnte eine Versuchsmethodik erarbeitet werden, die den gestellten Ansprüchen weitestgehend entsprach. Es zeigte sich allerdings ein sehr starker menschlicher Einfluss, der die Reproduzierbarkeit der Versuche einschränkte. Es konnten insgesamt wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die die Basis für Weiterentwicklungen darstellen.

Abstract

Development of a testing methodology to evaluate the extinguishing effect of extinguishing agents

Users of extinguishing agent additives for solid-substance fires often face difficulties in evaluating the available products on the market, as they lack a sound basis for their decision. The main aim of the present work was to develop a testing methodology that allows to quantify the extinguishing effect of additives for solid-substance fires, which could support users in their purchasing decision.

To begin with, an overview of common extinguishing agents is given along with their field of application and their extinguishing effect. Furthermore, fire tests that are conducted by fire departments, private and governmental research institutions worldwide are described and categorized, and their advantages and disadvantages are discussed.

The testing methodology that was developed in the thesis' practical part was aimed at being easily practicable in laboratory environment. A sufficiently large number of experiments ensured the validity and significance of the data gained through the extinguishing experiments. In the course of the development of such a methodology, the fundamental test parameters and potential influencing factors were assessed and tested. Finally, a testing methodology could be elaborated that largely met the requirements. However, the human influence on these experiments turned out to be underrated which limited the reproducibility. Overall, the experiments provided a valuable basis for further developments.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	9
1.1 Problemstellung	9
1.2 Zielsetzung	10
2 Hintergrund	11
2.1 Löschmittel	11
2.1.1 Brandklassen	11
2.1.2 Löschmittel im Detail	12
2.1.2.1 Wasser und wässrige Löschmittel	12
2.1.2.2 Löschpulver	15
2.1.2.3 Inertgase	16
2.1.2.4 Aerosol-Löschmittel	16
2.1.2.5 Halone	16
2.1.2.6 Fettbrandlöschmittel	16
2.2 Brandversuche	17
2.2.1 Normversuche	18
2.2.2 Nicht genormte Versuche	19
2.2.2.1 Aus Normen abgeleitete Versuche	20
2.2.2.2 Kleinversuche im Labor	21
2.2.2.3 Brandversuche mit Rauchabzug	22

2.2.2.4	Brandversuche ohne Rauchabzug (Raumbrände).....	24
2.2.3	Fazit.....	27
3	Versuchsentwicklung.....	29
3.1	Grundlegende Gedanken zur Versuchsentwicklung.....	29
3.2	Vorgehen.....	32
3.2.1	Vorversuche.....	32
3.2.2	Entwicklung der Versuchsaufbauten I und II.....	33
4	Ergebnisse.....	35
4.1	Versuchsentwicklung – Vorversuche.....	35
4.1.1	Nachstellen der bereits am Lehrstuhl durchgeführten Versuche.....	35
4.1.2	Erstellung eines grundlegenden Versuchsaufbaus.....	37
4.1.3	Brennstoff.....	40
4.1.3.1	Holz.....	41
4.1.3.2	Alternative Brennstoffe.....	45
4.1.3.3	Fazit der Vorversuche.....	45
4.1.3.4	Charakterisierung des Kiefernholzes.....	46
4.2	Versuchsaufbau I.....	47
4.2.1	Versuche mit verschiedenen Aufbauten.....	47
4.2.1.1	Gültigkeit der Versuche und Löschmethode.....	48
4.2.1.2	1a.....	50
4.2.1.3	1b.....	52
4.2.1.4	1c.....	54
4.2.1.5	1d.....	55
4.2.1.6	1e.....	57
4.2.1.7	1f.....	57
4.2.1.8	1g.....	58
4.2.2	Versuche mit Löschmittelzusätzen.....	60
4.2.2.1	Randomisierung und Reihenversuche.....	61
4.2.2.2	Versuchsdurchführung.....	61
4.2.2.3	Ergebnisse.....	62
4.2.3	Fazit.....	68
4.3	Versuchsaufbau II.....	72
4.3.1	Versuche mit verschiedenen Aufbauten.....	72
4.3.1.1	Stapelaufstellung, Gültigkeit der Versuche und Löschmethode.....	75
4.3.1.2	2a.....	76

4.3.1.3	2b	78
4.3.1.4	2c	78
4.3.1.5	2d	79
4.3.2	Weiterführende Versuche	80
4.3.2.1	Versuche mit nicht konditioniertem Holz	80
4.3.2.2	Versuche mit konditioniertem Holz	81
4.3.3	Fazit	85
5	Zusammenfassung	89
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang	94
	Übersicht über alle Versuche	95
	Versuchsaufbau I	97
	Versuchsaufbau II	106
	Arbeitsanweisung	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erprobung eines Feuerlöschers an einer Normholzkrippe	19
Abbildung 2: Versuchsaufbau der Underwriters Laboratories	21
Abbildung 3: Versuchsanordnung der Versuche von Rissington	23
Abbildung 4: Ergebnisse der „Tremonia“-Versuche.....	26
Abbildung 5: Fingerdruckzerstäuber	36
Abbildung 6: grundlegender Versuchsaufbau	38
Abbildung 7: Metallschale	39
Abbildung 8: Zeichnung der Metallschale mit Abmessungen	39
Abbildung 9: Kiefer 5x5 mm.....	42
Abbildung 10: Lärche 9,2x9,2 mm	43
Abbildung 11: Buche 20x10 mm	44
Abbildung 12: Kiefer 13,5x13,5 mm	45
Abbildung 13: Aufbau 1a.....	50
Abbildung 14: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1a	51
Abbildung 15: Aufbau 1b.....	52
Abbildung 16: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1b	53
Abbildung 17: Aufbau 1c.....	54
Abbildung 18: Aufbau 1d.....	55

Abbildung 19: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1d	56
Abbildung 20: Aufstellung 1e	57
Abbildung 21: Aufstellung 1f	58
Abbildung 22: Aufstellung 1g	58
Abbildung 23: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1g	59
Abbildung 24: Ergebnisse der Randomisierungsversuche	63
Abbildung 25: Zusammengefasste Ergebnisse der Randomisierungsversuche	64
Abbildung 26: Ergebnisse der Reihenversuche	65
Abbildung 27: Versuche mit dem Löschmittel Wasser	66
Abbildung 28: Zusammengefasste Ergebnisse mit dem Löschmittel Wasser	67
Abbildung 29: Versuche mit dem Löschmittel Klasse-A-Schaummittel 0,3 Vol.-%	67
Abbildung 30: Versuche mit dem Löschmittel Biotensid 0,3 Vol.-%	68
Abbildung 31: Metalltrog	73
Abbildung 32: Zeichnung des Metalltrogs mit Abmessungen	73
Abbildung 33: Anleitung aus dem Brandschutzratgeber [20]	76
Abbildung 34: Richtige Vorgehensweise in der Löschphase des Experiments	76
Abbildung 35: Aufbau 2a	77
Abbildung 36: Aufbau 2b	78
Abbildung 37: Aufbau 2c	79
Abbildung 38: Aufbau 2d	79
Abbildung 39: Übersicht Ergebnisse	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Brandklassen und dafür geeignete Löschmittel [2]	12
Tabelle 2: Holzarten und Profile	41
Tabelle 3: Ergebnisse der Brennstoffanalyse	46
Tabelle 4: Elementare Zusammensetzung	46
Tabelle 5: Energieinhalt	46
Tabelle 3: Übersicht über die Konfigurationen	48
Tabelle 4: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1a	51
Tabelle 5: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1b	53
Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1d	55
Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1g	59
Tabelle 8: Zusammengefasste Ergebnisse der Randomisierungsversuche	64
Tabelle 9: Zusammengefasste Ergebnisse der Reihenversuche	65
Tabelle 10: Übersicht über die Konfigurationen	74
Tabelle 11: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 2d mit nicht konditioniertem Holz und verschiedenen Löschmitteln	81
Tabelle 15: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 2d	83

1 Einleitung

Löschmittelzusätze spielen in der heutigen Brandbekämpfung eine wesentliche Rolle. Je nach Anforderung steht den Anwendern eine große Vielzahl an möglichen Löschmitteln und Kombinationen aus diesen zur Verfügung.

Gerade im Bereich der Bekämpfung von Feststoffbränden, stehen die Kunden der Fülle an am Markt verfügbaren Löschmittelzusätzen relativ hilflos gegenüber. Löschmittelzusätze können die Löschwirkung des Wassers zum Teil erheblich verbessern und so ihr Einsatz die Anwender in der Brandbekämpfung unterstützen. Die Kosten der Mittel und die benötigten Zumischraten unterscheiden sich jedoch beträchtlich. Eine einfache Möglichkeit die Kosten dem Nutzen gegenüberzustellen und so die Kaufentscheidung auf eine objektive Basis zu stellen, existiert zum gegebenen Zeit nicht.

1.1 Problemstellung

Natürlich gibt es verschiedenste Möglichkeiten Löschmittelzusätze zu bewerten. Versuche im Labor können Auskunft über bestimmte chemische und physikalische oder auch spezielle brandrelevante Eigenschaften geben. Die Löschwirksamkeit, als Kombination verschiedenster Eigenschaften, lässt sich damit jedoch nur ungenügend untersuchen.

Großversuche mit hohen Brandlasten stellen für die Anwender wichtige Erfahrungswerte zur Verfügung und können auf einen hohen Praxisbezug verweisen. Allerdings sind sie sehr aufwändig in Bezug auf Zeit und Ressourcen. Letztendlich können solche Versuche nur in

geringer Anzahl wiederholt werden. Die Ergebnisse sind dadurch nur selten reproduzierbar und daher wenig aussagekräftig.

Normverfahren, mit denen die Wirksamkeit von Löschmitteln und Löschmittelzusätzen quantifiziert werden kann, existieren in dieser Form nicht. Zurzeit verfügbare Normen beschränken sich darauf, Löschmittel chemisch und physikalisch zu beschreiben und das Mindestmaß an Löschwirksamkeit zu gewährleisten.

Keines dieser Verfahren kann den Anwendern eine praktische und objektive Hilfestellung bei der Wahl des geeigneten Löschmittels, besonders auch in Hinblick auf die Kosten, bieten.

1.2 Zielsetzung

Es liegt daher nahe, ein Prüfverfahren für Brandversuche zu erarbeiten, das die Vorteile der verschiedenen Versuchsmöglichkeiten vereint und somit eine wirkliche Hilfestellung bei der Wahl des Löschmittels, in Hinblick auf Kosten und Wirksamkeit, geben kann.

Ein solcher Versuchsaufbau muss im Labor unter geringem Aufwand durchgeführt werden können, leicht wiederholbar sein und reproduzierbare, aussagekräftige Ergebnisse liefern.

In dieser Arbeit soll eine solche Bewertungsmethode systematisch erarbeitet und definiert werden. Der Anwender soll damit in die Lage versetzt werden, die Löschwirkung von verschiedenen Löschmittelzusätzen zur Bekämpfung von Feststoffbränden bei verschiedenen Konzentrationen quantifizieren zu können. Er soll dabei unter vergleichsweise geringem Einsatz von Material, Arbeit und Zeit verlässliche Ergebnisse erhalten, die ihn bei seiner Kaufentscheidung unterstützen.

2 Hintergrund

Um die Vorgehensweise und die Bedeutung der in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Versuche besser begreifen und einordnen zu können, soll in diesem Kapitel ein Überblick über den aktuellen Stand der Dinge gegeben werden. Zunächst wird sehr allgemein auf die zurzeit verwendeten Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden aller Brandklassen eingegangen. Im zweiten Teil des Kapitels wird ein Überblick über die üblichen Versuchsmöglichkeiten zur Beurteilung von Löschmittelzusätzen, die zur Bekämpfung von Bränden der Klasse A dienen, gegeben.

2.1 Löschmittel

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die zurzeit gängigen Löschmittelarten, ihre Anwendungsmöglichkeiten und Wirkungsweisen gegeben. Begonnen wird bei der Definition der einzelnen Brandklassen. Im Weiteren werden die einzelnen Arten von Löschmitteln näher betrachtet.

2.1.1 Brandklassen

Grundsätzlich dienen Brandklassen der Kategorisierung unterschiedlichster Brände. In Europa werden die Brandklassen in der EN 2 definiert. Diese Definition stellt auch die Grundlage für die weiteren Ausführungen dieses Textes dar. Die NFPA 10-1974 findet in den USA und international Anwendung. [1], [2]

Die EN 2 teilt Brände in fünf Kategorien ein, die mit den Buchstaben A,B,C,D und F gekennzeichnet sind. Die Zuordnung ist in Tabelle 1 ersichtlich. Die Unterscheidung folgt dabei vor allem dem zugrundeliegenden Löschmechanismus. Das Ziel ist eine möglichst eindeutige Zuordnung von Löschmitteln und ihren Löscheffekten zu einer bestimmten Brandklasse. So zum Beispiel werden Flüssigkeitsbrände bewusst von Gasbränden getrennt. Obwohl auch Flüssigkeiten nur in ihrer Gasphase verbrennen, beruht die Löschmethodik doch auf ganz anderen Löscheffekten. [1]

Tabelle 1: Brandklassen und dafür geeignete Löschmittel [2]

A	Brände fester, glutbildender Stoffe	Wasser, Schaum, ABC-Pulver, Retarder
B	Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen	Schaum, ABC-Pulver, BC-Pulver
C	Brände von Gasen	ABC-Pulver, BC-Pulver
D	Brände von Metallen	Metallbrandpulver, Sand, Graugussspäne
F	Brände von Speiseölen/-fetten	Fettbrandlöschmittel

2.1.2 Löschmittel im Detail

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen, heutzutage gebräuchlichen Löschmittel eingegangen. Dieses Kapitel soll einen möglichst vollständigen Überblick über die einzelnen Löschmittel und ihre Einsatzmöglichkeiten über alle Brandklassen hinweg geben. Die Gliederung dieser erfolgt auf nicht auf Basis ihrer Löschwirkung sondern nach deren physikalischer Form.

2.1.2.1 Wasser und wässrige Löschmittel

Wasser eignet sich hervorragend zum Löschen von Bränden der Brandklasse A. Es ist daher für solche Brände das bei weitem am häufigsten verwendete Löschmittel. Meistens wird Wasser ohne weitere Zusätze verwendet. Was Wasser als Löschmittel auszeichnet, ist insbesondere seine Kühlwirkung, die den Hauptlöscheffekt darstellt. Man spricht hier auch vom Wärmebindungsvermögen. Diese kommt aus seiner hohen spezifischen Wärmekapazität und seiner außergewöhnlich hohen spezifischen Verdampfungsenthalpie. Für die Löschwirkung ist vor allem der verdampfende Teil des Wassers verantwortlich, da durch ihn die meiste Wärme entzogen werden kann. [1]

Es ist essentiell, den Anteil an Wasser, das verdampft, möglichst hochzuhalten. Leider richtet das Löschwasser auch einen erheblichen Anteil am Gesamtschaden eines Brandes an. Es ergeben sich damit gute Gründe, die Löscheffektivität des Löschwassers zu steigern. [1]

Das kann unter anderem durch verschiedene Additive erreicht werden. Man spricht hier allgemein von wässrigen Löschmitteln, also solche, die zu mehr als 80% aus Wasser bestehen. Die Hauptlöschwirkung ist nach wie vor die Kühlwirkung, die lediglich durch zum Beispiel höhere Benetzbarkeit verbessert wird. [1]

Im Folgenden soll ein Überblick über die verschiedenen Arten von Additiven gegeben werden.

Schaummittel

Durch das Zumischen von Schaummitteln ist es möglich, das Wasser aufzuschäumen. Üblicherweise werden 3-6 Vol.-% zugemischt. Technisch ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten der Aufschäumung, auf die hier jedoch nicht weiter eingegangen wird. Die Menge an Luft im Löschschaum wird über die sogenannte Verschäumungszahl, kurz VZ, angegeben. Über diese erfolgt auch die Einteilung der Löschschäume in Leicht-, Mittel- und Schwerschäume. Ihre Definition ist in der nachfolgenden Formel (2-1) dargestellt. [1], [3]

$$VZ = \frac{\text{Volumen des Schaumes}}{\text{Volumen der unverschäumten wässrigen Schaummittellösung}} \quad (2-1)$$

Der Hauptlöscheffekt des Schaums besteht im Ersticken der Flammen. Das wird durch die Schaumschicht erreicht, die sich über das Brandgut legt und damit die Luftzufuhr unterbindet. Doch auch die Löschwirkung des zerfallenden und so wasserfreisetzenden Schaumes spielt je nach Brandklasse eine gewisse Rolle. [3]

Grundsätzlich basieren die Schaummittel auf Proteinen, Tensiden und Fluortensiden, welche auch miteinander verarbeitet werden können. Dabei lassen sich die unterschiedlichen Arten von Schaummitteln in Proteinschäume (PS), Fluorproteinschäume (FPS), filmbildende Fluorproteinschäume (FFFP oder 3FP), filmbildende Schäume (AFFF oder A3F), Mehrbereichsschäume (MBS) und Class-A-Foam-Schäume (CAFSM) gliedern. Außerdem sind einige Schaumtypen alkoholbeständig und werden zusätzlich mit den Kürzeln AR (alcohol resistant) oder ATC (alcohol type concentrate) gekennzeichnet. [1], [3]

Netzmittellösungen, Netzwasser

Auch in niedrigeren Konzentrationen, üblicherweise unter 1 Vol.-%, können tensidbasierte Schaummittel eingesetzt werden, um die Löschwirkung des Wassers zu verbessern. Dabei werden die Mittel jedoch ohne Luftzufuhr zugemischt, wodurch eine Verschäumung bewusst

vermieden wird. Die Wirkmechanismen unterscheiden sich jedoch grundlegend von denen der Schäume. Sie kommen daher nur bei der Bekämpfung von Feststoffbränden zur Anwendung. [1]

Der grundsätzliche Wirkmechanismus besteht darin, dass die zugegebenen Tenside der Schaummittel die Oberflächenspannung des Löschwassers beträchtlich verringern. Dadurch wird einerseits die Tropfengröße verringert und andererseits dem Wasser ermöglicht, tiefer in Poren und in verkohltes Material einzudringen. Oft kann beim Löschen mit Netzwasser ein Verschäumen durch aufsteigende Verbrennungsgase beobachtet werden. Das kann sich durchaus positiv auf die Löschleistung auswirken, solange der Schaum nicht zu stabil ist. [1]

Das Potential, das in der Verwendung von Netzmitteln zur Bekämpfung von Feststoffbränden steckt, wird gerade am Beispiel Class-A-Foam deutlich. Schon eine Zumischrate von unter 0,5 Vol.-% kann den Löschmittelbedarf erheblich reduzieren. [1]

Gelbildner

Durch diese Zusätze bildet sich eine gelartige Schicht auf dem Brandgut. Dadurch kann das Wasser langsamer abfließen und mehr verdampfen. Die Kühlwirkung wird deutlich verbessert. Man spricht hierbei neben Gelbildner auch von Verdickungsmitteln und Quellkörperbeimengungen. [1]

Die Erfahrungsberichte zu diesen Mitteln fallen sehr unterschiedlich aus. Vielfach wird deren Wirksamkeit angezweifelt und auch ihre Einsatzmöglichkeiten scheinen denen der Schaummittel unterlegen. So sind sie zum Beispiel nicht in der Lage geschäumt zu werden und können nicht für die Brandbekämpfung von Klasse B Bränden eingesetzt werden. Darüber hinaus ergeben sich auch erhebliche Nachteile bei der Handhabung. Zum einen kann das Verkleben der Löschausrüstung ein großes Sicherheitsrisiko darstellen, zum anderen können besprühte Flächen sehr rutschig werden. [1]

Außerdem ergibt sich auch kein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber den Schaummitteln, da die Preise der Gelmittel nicht wesentlich geringer, jedoch höhere Zumischraten notwendig sind. [1]

„Die Verwendung dieser Verdickungsmittel ist also nicht effizienzsteigernd, sondern vielmehr aus technischen, einsatztaktischen und v. a. sicherheitstechnischen Gründen abzulehnen“ [1]

Retardants

Retardants bezeichnen grundsätzlich flammenhemmende Mittel. Für wässrige Löschmittel eignen sich besonders Ammoniumsalze, Phosphate und Sulfate, deren Zumengung bis zu 18 Vol. -% betragen kann. Üblicherweise werden diese Stoffe bei der Waldbrandbekämpfung mit Flugzeugen v. a. in Amerika verwendet. Zur besseren Sichtbarmachung der gelöschten Flächen, sind ungiftige Farbstoffe zugesetzt. [1]

Da sie für den normalen Feuerwehreinsatz keine Bedeutung haben, wird auch hier nicht weiter darauf eingegangen.

2.1.2.2 Löschpulver

Die Gruppe der Löschpulver lässt sich grob in ihre Einsetzbarkeit zur Bekämpfung von Bränden der einzelnen Brandklassen einteilen. Damit ergeben sich im wesentlichen drei Gruppen von Löschpulvern: BC, ABC und D. [4]

BC-Löschpulver

Dieses Pulver ist geeignet Brände der Klassen B und C zu löschen, versagt jedoch vollkommen bei Feststoff- und Metallbränden. Die gebräuchlichsten Bestandteile dieser Pulver sind Natrium- und Kaliumhydrogencarbonat, Kaliumsulfat, Natrium- und Kaliumchlorid und Kaliumcarbamate. [4], [5]

Die Löschwirkung beruht hauptsächlich auf der heterogenen Inhibition in der Flammenzone, was auch als „Wandeffekt“ bezeichnet wird. Radikale der Verbrennungsreaktion werden dabei an der großen Oberfläche des Pulvers rekombiniert und es kommt zu einem Abbruch der Reaktionsketten in der Verbrennungsreaktion. [3], [4]

ABC- Löschpulver

Diese meist aus Ammoniumdihydrogenphosphat oder Ammoniumsulfat bestehenden Pulver, sind in der Lage Brände der Klassen A, B und C zu löschen. Dabei wirken sie zum einen gegen Flüssigkeits- und Gasbrände nach dem „Wandeffekt“ und andererseits gegen Feststoffbrände durch Bildung einer luftundurchlässigen und beim Aufschmelzen kühlenden Sinterschicht auf der Oberfläche des Brandguts. [4], [5], [6]

D-Löschpulver

Zur Bekämpfung von Metallbränden werden spezielle Anforderungen an das Pulver gestellt. Hauptsächlich kommen Alkalichloride, vor allem Natriumchlorid, zum Einsatz. Die Löschwirkung entsteht auch hier durch die Bildung einer luftundurchlässigen Sinterschicht. [4], [7]

2.1.2.3 Inertgase

Die wichtigsten Vertreter dieser Löschmittelgruppe sind Argon, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und speziellen Mischungen aus diesen. Der Hauptlöscheffekt beruht auf der Verdrängung von Sauerstoff und somit auf der Erstickung des Brandes. Prinzipiell sind Inertgase für die Bekämpfung von Bränden aller Brandklassen geeignet. Stickstoff und Kohlenstoffdioxid sind jedoch keine echten Edelgase und somit nicht zum Löschen von Metallbränden geeignet. [3], [4]

2.1.2.4 Aerosol-Löschmittel

Diese Löschmittel finden vor allem in automatischen Löschanlagen für geschlossene Räume Anwendung. Durch eine meist elektrisch aktivierte chemische Reaktion wird ein sehr feines Pulver freigesetzt. Der Löscheffekt ist ähnlich dem der Pulverlöschmittel. Das enthaltene Kalium führt an der großen Oberfläche des Aerosols zu einer Unterbrechung der Radikalreaktionsketten und somit der Verbrennungsreaktion. Diese Mittel sind nicht giftig oder umweltschädlich und senken auch nicht den Sauerstoffanteil der Luft ab. Sie sind daher in ihrer Anwendung sicher und zuverlässig. [8]

2.1.2.5 Halone

Obwohl die meisten Halone aufgrund ihrer ozonschädigenden Wirkung verboten wurden, besteht die Möglichkeit, ungefährliche, teilweise neuentwickelte Varianten zur Brandbekämpfung zu nutzen. Anwendung finden sie sowohl im Innenraumbereich, als auch im militärischen Bereich. Halone sind halogenierte Kohlenwasserstoffe, die in flüssiger oder fester Form verwendet werden können. Der Löscheffekt beruht einerseits auf Wärmeentzug und andererseits auf chemischer Inhibition der Verbrennungsreaktionen. Halone eignen sich zur Bekämpfung von Bränden der Klassen A, B und C. [3], [9]

2.1.2.6 Fettbrandlöschmittel

Speisefett- und Ölbrände können mit herkömmlichen Löschmitteln kaum gelöscht werden, die Verwendung von Wasser erhöht die Gefährdung sogar enorm. Daher wurde für diese Art

von Bränden die Brandklasse F definiert. Löschmittel dieser Brandklasse sind meist hochkonzentrierte wässrige Salzlösungen, die eine sofortige Verseifung des Fettes bewirken, wodurch sich eine fast unbrennbare, luftundurchlässige Schicht auf der Oberfläche bildet und der Brand erlischt. Auch eine gewisse Kühlwirkung unterstützt die Brandbekämpfung. Diese Mittel sind auch bedingt geeignet um Brände der Klassen A und B zu löschen. [10], [11], [12]

2.2 Brandversuche

Bei der Beschaffung von neuen Gerätschaften und Löschmitteln stehen Anwender vor dem Problem, sich bei ihrer Entscheidung auf Erfahrungswerte stützen zu müssen. Dafür werden verschiedenartige Brandversuche von Feuerwehren, Behörden und Forschungseinrichtungen durchgeführt, um Geräte, Löschmittel und Arbeitsmethoden auf ihre Eigenschaften und ihre Tauglichkeit in praxisnahen Bedingungen hin beurteilen zu können.

In diesem Kapitel wird, dem Schwerpunkt dieser Arbeit folgend, speziell auf die heute üblichen Methoden eingegangen, mit denen auch die Wirksamkeit von Löschmitteln und Löschmittelzusätzen, das heißt Schaum- und Netzmittel, zur Bekämpfung von Feststoffbränden bewertet werden soll. Sie lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- Normversuche
- Nicht genormte Versuche:
 - aus Normversuchen abgeleitete Versuche
 - Kleinversuche im Labor
 - Brandversuche mit Rauchabzug
 - Brandversuche ohne Rauchabzug (Raumbrände)

Nur ein begrenzter Teil dieser Versuche und ihrer Ergebnisse werden tatsächlich publiziert. Großversuche werden auch nur selten systematisch durchgeführt und für wissenschaftliche Aussagen herangezogen. Somit kann dieses Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit stellen, sondern soll lediglich einen Eindruck über die Herangehensweisen vermitteln. In Hinblick auf die in dieser Arbeit behandelte Versuchsmethodik im Labormaßstab, soll auch besonders auf die sich ergebenden Vor- und Nachteile dieser Versuche eingegangen werden.

2.2.1 Normversuche

Normen haben prinzipiell die Aufgabe, Löschmitteln und Geräten ein „Mindestmaß an Verwendungsfähigkeit“ zu bescheinigen. Außerdem soll die Zusammenarbeit verschiedener Einsatzkräfte durch einheitliche Ausrüstung gewährleistet werden. Daher sind Behörden oft nur bereit genormte und zugelassene Geräte und Mittel zu finanzieren. Es kommt hier jedoch in der Praxis zu einem Konflikt. Einerseits dauert das Normen sehr lange oder es existieren überhaupt noch keine geeigneten Normprüfverfahren. Andererseits ist es natürlich nicht sinnvoll, Feuerwehreinheiten Gerätschaften und Mitteln auf dem neusten Stand der Technik vorzuenthalten. [1]

Für die Charakterisierung und Bewertung von Schaum- und Löschmittelzusätzen stehen in Europa lediglich die Normen EN 1568 „Feuerlöschmittel – Schaummittel“ und die EN-3 „Tragbare Feuerlöscher“ zur Verfügung. [1]

Die Norm EN 1568 „Feuerlöschmittel – Schaummittel“ legt lediglich fest, ob das Schaummittel in Form von Leicht- Mittel- und Schwerschäum die chemischen und physikalischen Eigenschaften zum Löschen von polaren und unpolaren brennbaren Flüssigkeiten besitzt [13]. Das hat den Grund, dass Schaummittel in der Praxis vor allem zum Löschen von Flüssigkeitsbränden (Klasse B) verwendet werden [1].

Die Norm EN-3 „Tragbare Feuerlöscher“ gibt eine Versuchsmethodik vor, die erlaubt, tragbare Feuerlöscher zu testen. Ein Feuerlöscher muss dieses Testverfahren durchlaufen, um genehmigt zu werden. Das einzige Kriterium ist dabei, ob mit dem zu testenden Feuerlöscher der Brand unter bestimmten Umständen gelöscht werden kann. Damit soll ein Mindestmaß an Löschfähigkeit gewährleistet werden. Die Beurteilung des Löschmittels selbst ist in dieser Norm nicht vorgesehen. [14]

Die Versuchsmethodik der EN-3 läuft folgendermaßen ab: Der Versuchsaufbau besteht prinzipiell aus Holzleisten, die in definierter Weise zu einer Holzkrippe aufgestapelt werden. Hierbei sind mehrere Größen definiert. Die Zündung erfolgt über eine mit Heptan gefüllte Schüssel, die unter die Krippe geschoben wird. Die EN-3 legt den Beginn der Löschaktivität nach einer bestimmten Zeitspanne nach dem Entzünden fest. Diese sogenannte Vorbrenndauer beträgt je nach Größe des Aufbaues 6 bzw. 8 Minuten. Der Brand selbst wird von fachkundigen Personen manuell mit dem zu testenden Feuerlöscher bekämpft. Kann der Brand innerhalb von 5 bzw. 7 Minuten gelöscht werden und kommt es in den weiteren 3 Minuten zu keinem erneuten Aufflammen, gilt der Test als bestanden. [14]

In Abbildung 1 ist die Brandbekämpfung zur Erprobung eines Feuerlöschers an einer Normholzkrippe zu sehen.



Abbildung 1: Erprobung eines Feuerlöschers an einer Normholzkrippe

Obwohl das Potential von Netzmitteln, wie dem Class-A-Foam, zur Bekämpfung von Klasse-A-Bränden (Feststoffbränden) eindeutig erkennbar ist, fehlt es an geeigneten Normprüfverfahren, um die Einsatztauglichkeit der Mittel selbst, aber auch der für ihren Einsatz benötigten Gerätschaften, zu überprüfen. [1]

So stellte Holger de Vries 2000 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 kann.“ [1 S.220.] Das ist nach wie vor gültig und betrifft den gesamten EU-Raum.

Ähnlich gestaltet sich die Situation in den USA. Der US-amerikanische Standard NFPA 18 („Standard on Wetting Agents“), der sich selbst bei den Tests auf den Standard UL 711 („Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers“) bezieht, sieht definierte Löschmethoden an Holzkrippen vor. Wiederum ist das Normverfahren nur für das Bewerten von Feuerlöschern definiert. [15], [16]

2.2.2 Nicht genormte Versuche

Es ist für die betroffenen Einsatzkräfte von besonderer Bedeutung, Geräte und Mittel unter praxisnahen Bedingungen zu erproben. Hierfür stehen keine Normprüfverfahren zur

Verfügung, sodass die Anwender selbst gefordert sind, Versuchsaufbauten, Bedingungen, Kriterien und Versuchsdurchführungen auszuarbeiten. [1]

Hier gibt es grundsätzlich einige verschiedene Herangehensweisen. Eine Möglichkeit ist, Normprüfverfahren und Versuchsaufbauten dahingehend zu adaptieren, dass mit ihnen bestimmte Eigenschaften bewertet werden können. Eine andere ist, Versuche zu entwerfen, die sich im Labor realisieren lassen. Großversuche können auf offener Fläche oder in Hallen oder aber in geschlossenen Räumen durchgeführt werden.

Alleine für die Beurteilung von Class-A-Foam wurden schon verschiedenste Versuche durchgeführt. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über den Aufbau, die Durchführung und die Auswertung derartiger Versuche abseits von Normen und Standards gegeben werden.

2.2.2.1 Aus Normen abgeleitete Versuche

Die Norm EN-3 „Tragbare Feuerlöscher“ und der US-amerikanische Standard UL 711 „Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers“ sind eigentlich nur für die Erprobung von Feuerlöschern formuliert. Trotzdem können die darin vorgegebenen Versuchsmethodiken dahingehend modifiziert werden, dass sie gut zum Beurteilen von Löschmitteln für Brände der Klasse A geeignet sind.

Im einfachsten Fall wird lediglich ein Feuerlöscher mit verschiedenen Löschmitteln oder Löschmittelzusätzen für den Versuch verwendet. Das Kriterium der Auswertung ist die verbrauchte Löschmittelmenge. Alternativ können statt tragbaren Feuerlöschern auch über Schläuche kontinuierlich versorgte Geräte verwendet werden. Beide Möglichkeiten beinhalten jedoch die Ausführung einer kundigen Person.

Die Underwriters Laboratories erweiterten den Versuchsaufbau des UL 711- Standards dahingehend, dass gezielt die Löschwirkung von Löschmittelzusätzen für Brände der Klasse A verglichen werden konnte, ohne dass dazu manuell mit einem Feuerlöscher gelöscht werden musste. Dazu wurde eine automatische Sprinklereinrichtung direkt über der Holzkrippe angebracht. Der Zeitpunkt für den Beginn der Löschaktivität wurde, anders als in der EN-3, festgelegt, wenn die Brandlast auf 40% der Ausgangsmasse abgebrannt war. Durch Aktivieren der Sprinkleranlage, die Wasser oder Löschmittel fördern konnte, nahm die Wärmefreisetzung des Brandes, sowohl der Konvektion, als auch der Strahlung schnell ab. Hatte sie 17% des Ausgangswerts erreicht, wurde die Löschmittelzufuhr gestoppt. Da der Brand jedoch nicht vollständig gelöscht wurde, kam es zu einer weiteren, gewollten wieder ansteigenden Wärmefreisetzung, bis die Krippe schließlich zusammenbrach. Für die Auswertung wurden die Werte und Verläufe der Wärmefreisetzungsraten sowohl während der Löschfähigkeit, als auch beim Wiederentfachen des Brandes herangezogen. [17]

Abbildung 2 zeigt den mit einer Sprinkleranlage erweiterten Versuchsaufbau der Underwriters Laboratories.[17]

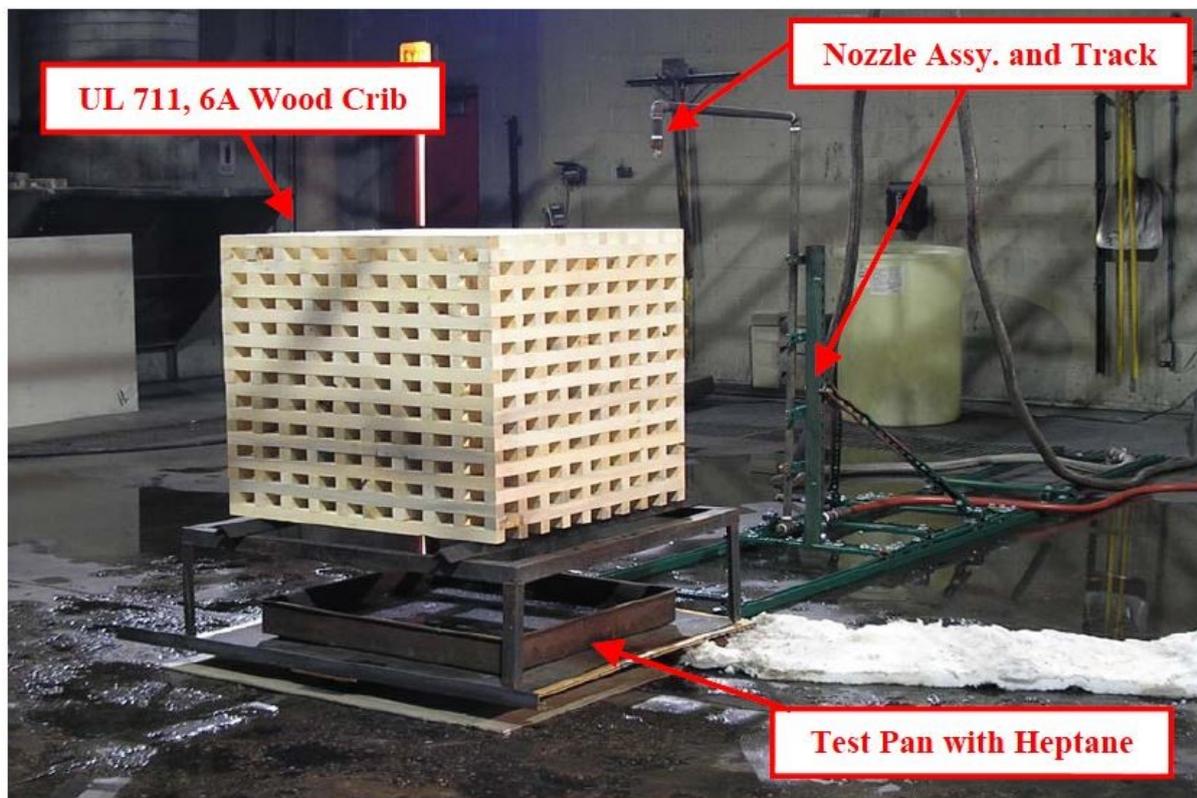


Abbildung 2: Versuchsaufbau der Underwriters Laboratories

2.2.2.2 Kleinversuche im Labor

Im Labor ist es möglich, verschiedene Eigenschaften von Löschmitteln und Löschmittelzusätzen auf ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften bei sehr gut einstell- und kontrollierbaren Bedingungen hin zu untersuchen. Damit können natürlich bestimmte Eigenschaften sehr isoliert betrachtet werden. Schwieriger wird es dagegen, wenn Eigenschaften bewertet werden sollen, die letztendlich aus einer Kombination von verschiedensten Eigenschaften der Löschmittel bestehen. Dazu zählt eben auch die Löschwirksamkeit eines Löschmittels.

Beispielhaft werden in diesem Kapitel die Versuche des National Institute of Standards and Technology, eine Bundesbehörde der USA, sowie der Underwriters Laboratories vorgestellt.

Diese erarbeiteten einige Versuchsmethoden im Labor, um Eigenschaften von Löschmittel für Klasse-A-Brände testen zu können. Im Unterschied zu den Untersuchungen der Norm EN

1568, die die chemischen und physikalischen Eigenschaften näher analysieren, wurden hier die für Löschzwecke relevanteren Eigenschaften untersucht. [1]

Dabei wurde die entzündungshemmende Wirkung von Class-A-Foam im Vergleich zu Wasser untersucht. Die beiden Institute gingen hier ähnlich vor. Sperrholz bzw. zweilagig geschichtete Holzkrippen wurden mit Wasser, Class-A-Foam-Wassergemisch oder Schaum getränkt bzw. bedeckt und mit Wärmestrahlungsleistungen von 15 bis 60 kW/m² beaufschlagt. Die Zeit bzw. benötigte Leistung zum Entzünden des Holzes gibt Auskunft über die entzündungshemmende Wirkung der zu testenden Mittel. [1]

Im Weiteren wurde auch die Feuchtigkeitsaufnahme näher betrachtet. Genauer gesagt, wurde die Gewichtszunahme des Holzes bzw. des Sperrholzes untersucht, wenn es mit Wasser oder Class-A-Foam-Wassergemisch benetzt wurde. [1]

Versuche im Labor haben den großen Vorteil, dass die Versuchsbedingungen sehr genau bekannt und kontrollierbar sind. Die Versuchsaufbauten sind üblicherweise klein gehalten. Ihre Resultate sind in der Regel auch reproduzierbarer, als die von Großversuchen. Ein großer Nachteil ist die geringere Praxistauglichkeit.

2.2.2.3 Brandversuche mit Rauchabzug

Brandversuche können ab einer gewissen Größe nicht mehr im Labor durchgeführt werden. Stattdessen eignen sich größere Hallen mit entsprechendem Rauchabzug oder Plätze im Freien. Typischerweise lassen sich hier große Versuchsaufbauten mit viel Brandlast verwirklichen. Es soll im Weiteren anhand einiger Beispiele ein Überblick gegeben werden, wie solche Versuche aufgebaut, durchgeführt werden und wie sie sich bewertet lassen.

Versuche von Rissington

Im Zuge der Versuche von Rissington wurden in einer Halle mit Rauchfang Brandversuche an Holzpaletten durchgeführt. In jedem Versuch wurden 56 Holzpaletten, das entspricht einer Brandlast von 1,2 t Holz, nach bestimmten Vorgaben aufgestapelt und kontrolliert mit Heptan in Brand gesetzt. Nach einer gewissen Vorbrenndauer wurde das Feuer unter Einsatz verschiedener Löschmittel händisch gelöscht. Neben subjektiven Eindrücken über das Löschverhalten, wurde die benötigte Löschmittelmenge und die benötigte Dauer zum Löschen gemessen. Sensoren zeichneten außerdem die Wärmestrahlungsintensität an den Ecken des Rauchfangs auf, um Rückschlüsse über die Brandintensität zu gewinnen. [1]

In Abbildung 3 ist die Versuchsanordnung der Versuche von Rissington schematisch in der Draufsicht skizziert.[1]

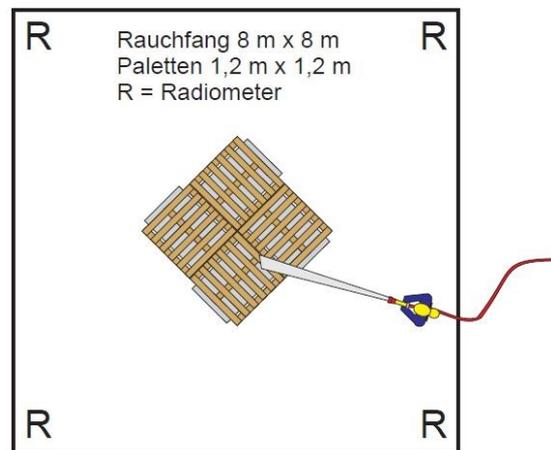


Abbildung 3: Versuchsanordnung der Versuche von Rissington

Versuche der Feuerwehr Bochum

Die Feuerwehr Bochum war sehr häufig mit Bränden von Papiercontainern konfrontiert. Sie führte daraufhin gezielt Versuche durch, um die Eignung von Löschmitteln, Löschausrüstung und Vorgehensweisen für diese Problemstellung zu testen.

Dazu wurden Papiercontainer mit Altpapier gefüllt und in Brand gesetzt. Nach einer Vorbrenndauer von 30 Minuten wurde mit dem Löschen begonnen. Verglichen wurde die Wirksamkeit verschiedener Löschmittel, wie Wasser, Schaum und CO₂. Es kamen auch verschiedene Leitungen, Rohre und Lanzen bei unterschiedlichen Volumenströmen und Drücken zur Anwendung. Außerdem wurden verschiedene Herangehensweisen, wie ein teilweises Aufbrechen oder das Löschen von oben bzw. das Einführen der Löschlanzen erprobt. Letztendlich wurde für die Beurteilung, neben subjektiven Eindrücken, der Verbrauch an Löschmittel herangezogen. [1]

Die Versuche zeigten zwar deutlich die Überlegenheit der Schaummittel und brachte eine Reihe weiterer für Praxis wichtige Erkenntnisse, für eine wissenschaftliche Auswertung waren diese Versuche jedoch nicht geeignet. Dazu fehlte es vor allem an der Reproduzierbarkeit und an definierten Bedingungen. Tatsächlich wurden bei den Versuchen starke Inhomogenitäten des Brandes in der zufälligen Schüttung des Altpapiers festgestellt. Der Zeitpunkt an dem „Brandaus“ gegeben werden konnte, war ebenfalls von großer Unsicherheit behaftet. Er wurde vor allem durch Temperaturmessungen im Brandgut festgestellt. Die Position der Thermoelemente in der Schüttung konnte dabei auch nicht exakt bestimmt werden. Erst durch Ausräumen des Containerinhalts konnten möglicherweise verbleibenden Glutrückstände sicher erkannt werden. [1]

Versuchsmethoden nach der ÖBFV-RL GP-03

Der Österreichische Bundesfeuerwehrverband stellt in seiner Richtlinie zur „Prüfung von Sonderlöschgeräten und Sonderlöschmitteln“ (ÖBFV-RL GP-03) eine Reihe von Versuchsaufbauten vor, an denen Löschgeräte und Löschmittel erprobt werden können. Neben der bereits beschriebenen Normmethode nach EN-3, werden die Möglichkeiten von sechs aufgestapelten Holzpaletten oder 40 leeren Getränkeboxen vorgestellt. Auch Autoreifen in einer Gitterbox eignen sich gut für Brandversuche und es findet sich eine Anweisung für die Durchführung eines PKW-Brandversuchs wieder. Das Löschvermögen wird aus folgenden Parametern abgeleitet: die subjektiv empfundene Brandintensität bei Beginn der Löschkraft, der Löschmittelverbrauch, die Zeit von Löschanfang bis zum Abschluss des Löschens, eventuelle Nachlöscharbeiten und falls gemessen, die Temperaturverläufe. [18]

2.2.2.4 Brandversuche ohne Rauchabzug (Raumbrände)

Wohnungsbrände sind ein typisches Szenario, dem Feuerwehren regelmäßig gegenüberstehen. Es erscheint daher sinnvoll, Zimmerbrände für Löschkraft nachzustellen, um so praxisnahe Erfahrungen mit Löschmitteln, Geräten und Vorgehensweisen zu sammeln. So wurden schon von verschiedenen Institutionen Großversuche durchgeführt, um die Löschkraft von Class-A-Foam als Netzmittel, als Schaum, mit verschiedenen Mehrbereichsschaummitteln und andere Löschmitteln, wie Gelbildnern, auf ihr Verhalten in realistischen Einsatzbedingungen zu untersuchen. [1]

Es wurden einige Versuche veröffentlicht, die im Allgemeinen durch die Orte bekannt geworden sind, in denen sie durchgeführt wurden. Dazu zählen die Versuche der Universität Wuppertal in Traun, Ingolstadt und in der Versuchsgrube Tremonia, der DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung. Im Hinblick auf die USA sind die Versuche in Salem und jene der Underwriter Laboratories zu nennen. Auch die ÖBFV-RL GP-03 schlägt eine Anordnung für einen Zimmerbrandversuch vor. [1], [17], [18]

Der Versuchsraum war bei diesen Experimenten recht unterschiedlich aufgebaut. Während man bei einigen Versuchen Schiffscontainer verwendete, wurde bei anderen auf Holzbaracken und Holzhäuser oder gemauerte Räume zurückgegriffen. Es konnten darin Absperrwände aus Gips oder unbrennbaren Fasermaterialien eingesetzt werden. Bei ähnlichen Versuchsanordnungen wurden unterschiedliche Brandlasten verwendet. Man verwendete zum Teil echte Möbel oder mit einfachen Materialien nachgebaute Typen. Es konnte aber auch lediglich eine Holzkrube in der Mitte des Raumes platziert werden. [1]

In den meisten Versuchen wurde die Tür von Anfang an offen gelassen, um durch die Belüftung einen sich schnell entwickelten Brand zu erhalten. Hingegen hielt man bei den Versuchen in Ingolstadt, den Raum während der 15-minütigen Vorbrenndauer vollständig geschlossen. [1]

Die Vorbrenndauer lag bei den unterschiedlichen Versuchen üblicherweise zwischen 8 und 15 Minuten. Danach begannen die Versuchspersonen, meist ein Zweierteam in schwerer Atemschutzausrüstung, mit der Löschfähigkeit. Zunächst wurde von außen der Brand eingedämmt. Sobald es für die löschenden Personen sicher genug war, betraten sie den Raum und führten dort die Löscharbeit fort. Die Löscharbeiten wurden wie unter realen Einsatzbedingungen bis zum „Brand aus“ durchgeführt. Wie die Personen bei der Brandbekämpfung vorzugehen hatten wurde nicht im Detail festgelegt. Auch ist weder der Zeitpunkt fürs Betreten des Brandraumes definiert, noch der eigentliche Moment in dem „Brand aus“ gegeben wurde, beide lagen im Ermessen der tätigen Personen. [1]

Die Parameter, die zur Auswertung herangezogen wurden, waren üblicherweise die Temperaturverläufe innerhalb der Vorbrenndauer, die Temperaturänderungsgeschwindigkeit beim Löschvorgang, die verbrauchte Löschmittelmenge, die Zeit bis der Raum betreten werden konnte und schließlich die Zeit, die benötigt wurde um den Brand zu löschen. [1]

Häufig wurde der sogenannte Löschaufwand berechnet. Der Löschaufwand stellt das Produkt von benötigter Löschmittelmenge und Löschzeit dar und wird üblicherweise in der Einheit [L*min] angegeben. [1]

Daneben konnten subjektive Eindrücke festgehalten werden, wie etwa die herrschenden Sichtverhältnisse oder die feuerwehrpraktische Handhabung im Einsatzfall. Videoanalysen brachten hier zusätzliche Informationen. [1]

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der gültigen „Tremonia“-Versuche. Die Ergebnisse sind in einem dreiachsigen Diagramm eingetragen. Auf den drei Achsen sind die Löschdauer, Löschmittelmenge und der eben erwähnte Löschaufwand aufgetragen. [1]

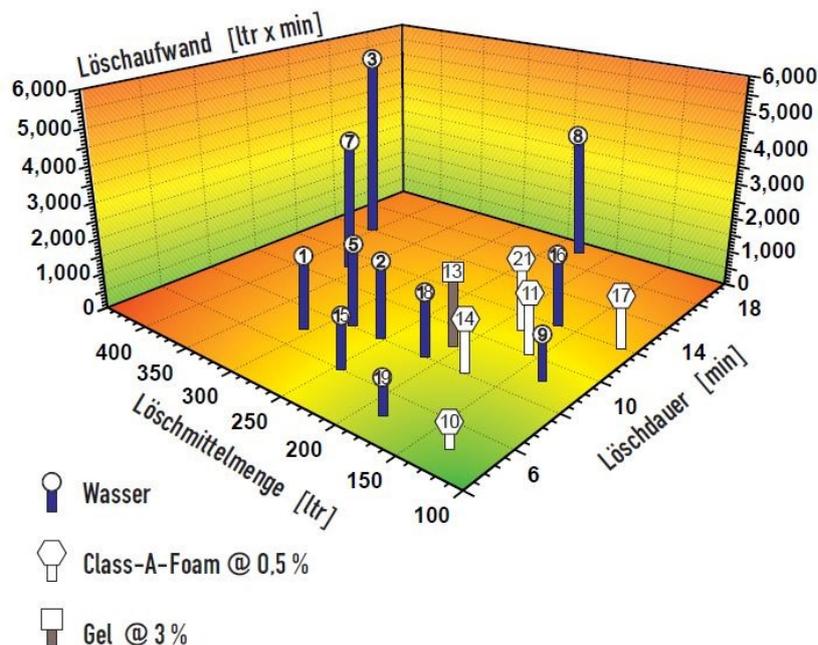


Abbildung 4: Ergebnisse der „Tremonia“-Versuche

Kritik

Obwohl solche Brandversuche einen großen Praxisbezug haben, stellt sich die Analyse der Ergebnisse oft als schwierig heraus. Als problematisch ist zu erachten, dass ein solcher Versuch aufgrund seiner Größe sehr aufwändig ist und daher nicht oft wiederholt werden kann. Schwankt der Löschmittelverbrauch sehr stark von Versuch zu Versuch, ist eine gesicherte Aussage nicht mehr möglich. So musste etwa nach den Canterbury-Versuchen eingestanden werden, dass durch die große Streuung der Messwerte eine eindeutige Aussage nicht möglich war. [1], [19]

Auch wurde Kritik am Aufbau einiger dieser Versuche geäußert und ihre Realitätsnähe in Frage gestellt. Es wurde davon abgeraten, Versuchsaufbauten in dünnwandigen Blechcontainern, Gipskartonplatten oder Holz zu errichten, da starke Mauern und Decken weitaus höhere Wärmekapazitäten besitzen und sich somit im Brandfall komplett anders verhalten. Auch die Brandlast sollte nicht zu kompakt sein, sondern, wie echte Möbel eine große spezifische Oberfläche aufweisen und im Raum verteilt sein. [19]

Neben dem Aufbau, lässt auch die Durchführung oft Raum für Kritik. So sollten Brandversuche, um realistische Wohnungsbrände zu simulieren, lange nach dem Flash-over durchgeführt werden. Es zeigten sich auch erhebliche Unterschiede durch die Vorgangsweise der löschenden Personen, etwa bei der Anwendung des sogenannten indirekten Löschens. Es wurde auch besonders hervorgehoben, dass die Kompetenz und Erfahrung der Testpersonen sehr großen Einfluss auf die Versuchswerte haben. [19]

Schwächen ergaben sich auch von Seiten der Auswertung. Kritisiert wurde die geringe Anzahl an durchgeführten Versuchen und die sehr stark schwankenden Ergebnisse. Vielfach seien zu viele Randbedingungen verändert worden, um schlüssige Vergleiche anzustellen. Es wurde betont, dass für die Auswertung unbedingt die tatsächlich benötigte Gesamtlöschmittelmenge betrachtet werden muss. Eine reine Betrachtung der Verläufe der Raumtemperatur oder ähnliches, wäre zu wenig. Ebenso wurde die Aussagekraft des sogenannten wirksamen Anteils [%], der den Quotienten aus verdampftem Wasser zur Gesamtlöschmittelmenge angibt, relativiert. Das Kriterium des Löschaufwands wurde ebenso als nicht sinnvoll bewertet. [19]

2.2.3 Fazit

Abschließend soll hier noch einmal Bilanz über die vorgestellten Versuchsmöglichkeiten gezogen werden. Wichtig im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit, ist gerade die Möglichkeit zur Beurteilung von Löschmittelzusätzen. Darauf soll hier auch kurz eingegangen werden.

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Versuchsaufbauten anhand derer Raumbrände nachgestellt werden können. Einsatzkräfte können dabei mehr oder weniger reale Brandszenarien durchspielen und praxisnahe Erfahrungen mit Gerätschaften, Löschmitteln und Vorgehensweisen sammeln.

Für wissenschaftliche Auswertungen reichen diese Versuche oftmals nicht aus. Zu gering ist die durchführbare Anzahl an Versuchen, da sie im Aufbau schlicht sehr aufwendig sind. Die Anzahl an einfließenden Faktoren ist sehr hoch. Damit sind die erhaltenen Ergebnisse nur schwer vergleichbar und schlecht reproduzierbar.

Versuche mit großen Brandlasten zur Erprobung von verschiedenen Löschmitteln eignen sich tatsächlich auch zur Beurteilung von Löschmitteln und Löschmittelzusätzen. Dazu gehören auch im Besonderen die Versuchsaufbauten der Norm EN-3 und des US-amerikanischen Standards UL 711, die beide mit Holzkrippen arbeiten. Nichtsdestoweniger sind die Versuche recht aufwändig und nur schwer in hoher Anzahl durchzuführen, was eine verlässliche Aussage erschwert.

In Laborversuchen können Schaummittel nach der Norm EN 1568 auf ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften hin gut untersucht werden. Weiters wurden auch Versuche vorgestellt, die einsatzrelevantere Eigenschaften von Löschmittelzusätze und Schaummitteln, wie die entzündungshemmende Wirkung und die Feuchtigkeitsaufnahme von definierten Brennstoffen, untersuchen. Versuche unter Laborbedingungen sind in der

Regel viel leichter reproduzierbar. So kann in relativ kurzer Zeit eine große Anzahl an wiederholbaren, identen Brandversuchen gemacht werden, die aussagekräftige Ergebnisse bringen. Dafür können jedoch kaum einsatzpraktische Erkenntnisse gewonnen werden.

Löschmittelzusätze, die speziell zum Löschen von Feststoffbränden entwickelt wurden, werden nach heutigem Stand nach der EN 1568 „Feuerlöschmittel – Schaummittel“ als Mehrbereichsschaummittel zugelassen. Die Norm EN-3 „Tragbare Feuerlöscher“ bescheinigt Feuerlöschern ein Mindestmaß an Löschwirkung. Ein eigenes Normverfahren zur Evaluierung der Löschwirkung von Löschmittelzusätzen für Klasse-A-Bränden existiert nicht.

Ein solches Verfahren, das im Labormaßstab durchgeführt werden kann und im besten Fall auch genormt ist, könnte diese für die Praxis sehr relevanten Eigenschaften unter gut kontrollierbaren Versuchsbedingungen untersuchen. Durch eine hohe Versuchsanzahl könnten gut vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse erbracht werden.

3 Versuchsentwicklung

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Versuchsentwicklung beschrieben. Zunächst wurden die wesentlichen Versuchsparameter und Einflussfaktoren herausgearbeitet. Im Anschluss daran wird das konkrete Vorgehen zur Versuchsentwicklung Schritt für Schritt vorgelegt.

3.1 Grundlegende Gedanken zur Versuchsentwicklung

Bevor mit Versuchen begonnen werden konnte, wurden Überlegungen angestellt, welche Ergebnisparameter entscheidend sind, welche Faktoren für einen solchen Versuchsaufbau eine Rolle spielen, welche störenden Einflüsse auftreten können und wie sie von vornherein vermieden werden können.

Im Mittelpunkt all dieser Überlegungen stehen die eigentlichen Ergebnisparameter, um die herum eine Versuchsentwicklung überhaupt erst möglich ist. Die entscheidende Messgröße dieser Brandversuche soll die zum Löschen benötigte Löschmittelmenge sein. Sie wird in Gramm angegeben und gravimetrisch bestimmt. Entscheidend ist dabei nicht nur ihr Wert, sondern ebenfalls ihre Streuung und ihre Reproduzierbarkeit über mehrere Versuche und Versuchsreihen hinweg.

Der entscheidende Vorteil einer Versuchsmethodik im Labormaßstab ist, dass mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine hohe Anzahl an Versuchen durchzuführen werden kann, wodurch statistisch aussagekräftige Ergebnisse überhaupt erst ermöglicht werden. Dafür ist es jedoch ebenso erforderlich, dass der Aufbau ein stets gleiches Abbrennverhalten

zeigt. Außerdem ist es wichtig, dass der Anwender eine gleichbleibende Löschmethode verwendet.

Anhand dieser Anforderungen lässt sich nun eine Reihe von Faktoren zusammenfassen, die bei der Versuchsmethodik abgeklärt werden müssen:

- Material
- Physischer Versuchsaufbau
- Entzündungsmöglichkeit
- Vorbranddauer, auch Vorbrennzeit genannt
- Externe Einflüsse
- Löschmethode, Handhabung
- Menschlicher Einfluss
- Löschkriterium
- Regeln für die Gültigkeit
- Versuchsauswertung

Für einen reproduzierbaren, aussagekräftigen Versuch ist es entscheidend, möglichst genau definierte **Materialien** zu verwenden. Das betrifft nicht nur die Art des Brennstoffs und seine Qualitäten, Feuchtegehalt, Brennwert, sondern auch seine Abmessungen.

Der **Versuchsaufbau** muss möglichst genau definiert werden. Dabei ist unbedingt das verwendete Material zu nennen, dessen Menge und Abmessungen und wie es aufgestapelt oder gehäuft wird. Außerdem müssen verwendete Hilfsmittel, die Unterlage, auf der der Versuch durchgeführt wird, sowie die Umgebung des Versuchs, wie zum Beispiel der Abzug genau beschrieben werden. Die Anforderungen an den Versuchsaufbau sind klar: gleichmäßige und vollständige Brandausbildung, ohne dass der Versuchsaufbau Gefahr droht instabil zu werden. Wichtig ist außerdem, dass sich der Aufbau gut löschen lässt, was sich in einem über die Versuche hinweg möglichst gleichmäßigen Löschwasserbedarf auswirken soll.

Die Möglichkeiten des **Entzündens** des Brandversuchs sind sehr vielfältig. In diesem Punkt wird beschrieben, wie der Brand initiiert wird, welche Stoffe, in welcher Menge sie verwendet werden und welche Hilfsmittel sonst noch nötig sind.

Die **Vorbrenndauer oder Vorbrennzeit** ist die Zeit vom Entzünden des Versuchs bis zum Beginn der Löschtätigkeit. Ist sie zu kurz gewählt, ist der Brand noch nicht genug entwickelt. Eine zu lange Vorbrenndauer führt schnell zum instabil werden des Aufbaus und gefährdet die Gültigkeit des Versuchs.

Brandversuche im Labor müssen im Allgemeinen immer unter einem Abzug durchgeführt werden. Dort unterliegt der Versuch gewissen **externen Einflüssen**, wie dem dort herrschende Luftzug. Durch eine **Rotation** des Versuchsaufbaus oder ähnliche Maßnahmen, kann dieser Einfluss minimiert werden.

Alle in dieser Arbeit behandelten Löschversuche haben gemein, dass die Löschtätigkeit per Hand mit einem handelsüblichen Fingerdruckzerstäuber durchgeführt wurde. Es musste daher eine Anweisung für die **Löschmethode** gegeben werden, wie der Anwender vorzugehen hat. Die erwünschte Handhabung war genau zu definieren, um den unvermeidlichen menschlichen Fehler möglichst klein zu halten. Natürlich stellte das eine sehr große Fehlerquelle dar. Selbst eine routinierte Person kann die einzelnen Brandversuche nicht immer einheitlich auf die exakte selbe Weise löschen.

Der **menschliche Einfluss** ist in einem Versuchsaufbau, wie er in dieser Arbeit beschrieben wird, sicher nicht zu vermeiden. Er wirkt sich zu einem gewissen Teil auf die Ergebnisse der Experimente aus. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Anwender nicht jeden Versuch auf die exakt gleiche Weise löschen kann. Genaue Anweisungen sind daher essentiell. Es ist außerdem denkbar, dass hier ein gewisser Lerneffekt auftritt. Das heißt, dass der Anwender durch jeden Versuch geübter wird und den folgenden Versuch daher etwas effizienter löschen kann als den vorherigen. Andere Einflüsse des menschlichen Fehlers sind schwieriger zu detektieren, sind jedoch sicherlich möglich.

Das **Löschkriterium** beschreibt, wann bei einem Löschversuch die Löschtätigkeit eingestellt werden muss. Da hiervon die benötigte Löschmittelmenge direkt beeinflusst wird, ist dieses Kriterium von essentieller Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse. Das Löschkriterium muss für den Anwender optisch eindeutig erkennbar sein, um eine reproduzierbare Versuchsdurchführung überhaupt erst ermöglichen zu können. Konsequenterweise ergeben sich damit zwei praktische Möglichkeiten, wann die Löschtätigkeit beendet wird: der Zeitpunkt, ab dem keine Flammen mehr auftreten und jener, bei dem keine Glut mehr erkennbar ist.

Natürlich sind alle Versuche dieser Art fehlerbehaftet und es muss davon ausgegangen werden, dass nicht alle Versuche gut gelingen. Diese erschweren die statistische Auswertung der Versuche beziehungsweise machen einen Vergleich sinnlos. Es müssen daher möglichst genaue **Gültigkeitskriterien** festgelegt werden, die bestimmen, ob ein Versuch unabhängig von seinem Ergebnis als gültig gewertet werden kann. Wesentliche Ausschlusskriterien sind vor allem ein ungleichmäßiges oder unvollständiges Anbrennen während der Vorbrennzeit, Stapel, die aufgrund des fortschreitenden Brandes instabil

werden und zusammenbrechen oder Rückzündungen, nachdem der Brand eigentlich schon als gelöscht gilt.

Einer der entscheidenden Vorteile, die ein Versuch im Labormaßstab hat, ist die Möglichkeit, eine hohe Anzahl an Versuchen relativ einfach durchführen zu können. In der **Versuchsauswertung** sollen die Ergebnisse auch auf statistischer Basis untersucht werden und ihre Aussagekraft bewertet werden. Ziel dieser Arbeit soll auch sein, eine konkrete Anzahl an notwendigen Versuchen nennen zu können.

Die einzelnen Kriterien sind sehr unterschiedlich handzuhaben. Während einige, wie etwa Material und die Entzündungsmöglichkeit prinzipiell frei wählbar sind, ergeben sich andere erst aus dem beobachteten Verhalten im Laufe des Versuchs, wie etwa die Vorbrenndauer. Ziel ist es, einen brauchbaren Versuchsaufbau zu entwickeln, bei dem all diese Kriterien definiert werden können.

3.2 Vorgehen

Im Folgenden soll beschrieben werden, wie aus den gerade aufgelisteten Kriterien Versuchsaufbauten entwickelt wurden und ihre Eignung überprüft wurde. In diesem Kapitel soll dem Leser die Systematik der Arbeit näher gebracht werden, wie die einzelnen Versuche mit den Kriterien in Verbindung stehen.

Die Versuchsentwicklung ließ sich in drei große Phasen gliedern. Es fanden Vorversuche statt, die erste Erfahrungen mit Brandversuchen im Labor bringen sollten. Ebenfalls wurden verschiedenen Materialien getestet. In den anschließenden Phasen der Entwicklung, wurden die Versuchsaufbauten I und II unter ständiger Einbeziehung von gemachten Erfahrungen erarbeitet.

3.2.1 Vorversuche

Am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wurden bereits einfach gehalten Brandversuche im Labormaßstab durchgeführt, die den Versuchen der Norm EN-3 nachempfunden waren. Diese wurden im Zuge der Vorversuche zum Teil wiederholt und erste Erkenntnisse für weitere Versuche abgeleitet.

Im Wesentlichen konnte in diesen Versuchen die Art der Brandinitierung und eine Versuchsumgebung festgelegt werden, die externe Einflüsse möglichst minimiert.

Zusätzlich wurden erste Möglichkeit eines Versuchsaufbaus ausgelotet. Der Versuchsaufbau musste so klein gehalten werden, dass er unter dem Rauchabzug durchgeführt werden konnte.

Im zweiten Teil der Vorversuche wurde die Frage nach dem richtigen Material behandelt. Grundsätzlich sollte der Versuchsaufbau geeignet sein, Löschmittelzusätze für die Bekämpfung von Klasse-A-Bränden auf ihre Löschwirkung hin im Labor zu testen. Damit waren schon erste Randbedingungen bestimmt: Das Material musste für einen Brand der Klasse A geeignet sein, durfte also nicht schmelzend brennbar sein. Bei den Vorexperimenten kamen verschiedene Holzarten in unterschiedlichen Profilen zum Einsatz, zusätzlich wurde die Eignung eines weiteren Brennstoffs getestet. Der ausgewählte Brennstoff wurde schließlich auch charakterisiert.

3.2.2 Entwicklung der Versuchsaufbauten I und II

Mit den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurden weitere Versuchsaufbauten entwickelt. Maßgeblich für die weitere Entwicklung, war die Wahl des Löschkriteriums. Wie bereits beschrieben, ging es darum, den Zeitpunkt festzulegen, bei dem die Löschtätigkeit beendet werden konnte. Entweder wurde gelöscht bis keine Glut mehr erkennbar war oder bis keine Flammen mehr aus dem Stapel austraten.

Dieser entscheidenden Frage wurde nachgegangen, indem für jedes der zwei Löschkriterien ein Versuchsaufbau entwickelt wurde. Beim Versuchsaufbau I lag das Löschkriterium - keine Glut mehr sichtbar - zugrunde. Im Versuchsaufbau II wurde nur noch gelöscht, bis keine Flammen mehr sichtbar waren. Diese Unterscheidung hatte allen voran großen Einfluss auf die aufgebrachte Brandlast, Versuchsaufbau II musste wesentlich größer gestaltet werden als Aufbau I. Während für Aufbau I der Versuchsaufbau der Vorexperimente herangezogen werden konnte, musste für Aufbau II auch eine geeignete Grundlage entwickelt werden.

Die Entwicklung wird in Kapitel 4.2 und 4.3 beschrieben. Das Vorgehen war in beiden Fällen ähnlich. Grundsätzlich wurden verschiedene Möglichkeiten einer Stapelaufstellung durchgetestet. Als Löschmittel wurde in dieser Phase Wasser verwendet. Auf Grundlage der gemessenen Werte für den Verbrauch an Löschmittel und anderer, subjektiver Eindrücke, wurde der geeignetste Versuchsaufbau für weiterführende Versuche ausgewählt. Somit wurde an dieser Stelle der physikalische Aufbau fixiert.

Diese weiterführenden Versuche bestanden zunächst aus einigen Versuchsreihen, die durchgeführt wurden um die Menge an brauchbaren Daten zu erhöhen. In diesen Versuchen

wurden außerdem weitere Erfahrungen im Umgang dieser Brandversuche gemacht. Somit konnten Regeln für die Gültigkeit eines Versuchs und die genaue Handhabung der Löschmethode besser definiert werden.

Im letzten Schritt sollten die Versuchsaufbauten auch auf ihre Eignung hin untersucht werden, verschiedene Löschmittelzusätze quantitativ beurteilen zu können. Dazu wurden weitere Versuche durchgeführt, mit der einzigen Änderung, nicht Wasser, sondern bestimmte Löschmittelzusätze in definierter Konzentration zu verwenden.

Dazu bestanden zwei mögliche Vorgehensweisen in der Versuchsanordnung: das Durchführen von Reihenversuchen und das sogenannte Randomisieren. Beide haben sowohl Vor- als auch Nachteile. Ihr Einfluss wurde in Kapitel 4.2.2.1 an Aufbau I untersucht. An Aufbau II wurden nur noch Reihenversuche durchgeführt.

Zuletzt wurden die Ergebnisse ausgewertet. Zentral dabei waren die Ergebnisparameter. Für einen einzelnen Versuch war das die verbrauchte Löschmittelmenge, die in Gramm angegeben wurde. Zur Bewertung einer Versuchsreihe wurde der Mittelwert der einzelnen Löschmittelmengen und deren Streuung berechnet. Aussagen über die Reproduzierbarkeit ließen sich über einen Vergleich mehrerer identisch durchgeführter Versuchsreihen miteinander treffen. Wobei hier wieder die Mittelwerte und die Streuungen betrachtet wurden. Im Zuge der Versuchsauswertung konnten abschließende Betrachtungen über äußere und menschliche Einflüsse auf die Versuche vorgenommen werden.

Die Bewertung verschiedener Löschmittelzusätze sollte auf die gleiche Weise erfolgen, also über die Betrachtung der Mittelwerte und die Streuung.

Als Streuung wurde in diesem Zusammenhang ein 95%-Konfidenzintervall bezeichnet. Die einzelnen Versuchsreihen wurden mit Hilfe einer Varianzanalyse, genauer gesagt einem Test auf Gleichheit der Mittelwerte, auf einem Signifikanzniveau von 95% durchgeführt.

Im Anhang befindet sich neben einer Übersicht über alle Versuche, die in Kapitel 4.2 und 4.3. beschrieben werden, auch eine vollständige Auflistung der Einzelergebnisse.

Eine vollständige Arbeitsanweisung zur Verwendung des Aufbaus II findet sich ebenfalls im Anhang.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Versuchsentwicklung, die einzelnen Versuchsaufbauten, ihre Durchführung und schließlich ihre Ergebnisse präsentiert. Dazu werden in drei Unterkapiteln die Vorversuche, die Entwicklung von Aufbau I und II behandelt.

4.1 Versuchsentwicklung – Vorversuche

Die Vorversuche stellen den Beginn der praktischen Arbeit dar. Es wurden bereits entwickelte Versuche nachgestellt und daraus Verbesserungen abgeleitet. Es konnte damit ein geeigneter grundsätzlicher Versuchsaufbau gefunden werden. Im zweiten Schritt wurden an diesem Aufbau Materialstudien durchgeführt, um den geeignetsten Brennstoff zu eruieren. Dieser wurde schließlich auch charakterisiert.

4.1.1 Nachstellen der bereits am Lehrstuhl durchgeführten Versuche

Am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik wurden bereits erste rudimentäre Ansätze und Tests durchgeführt, um verschiedene Löschmittelzusätze zu testen. Da diese Tests jedoch viel zu ungenau waren, um belastbare Ergebnisse zu liefern, stellt diese Arbeit eine Fortsetzung der Forschung in diese Richtung dar.

Die bereits erarbeitete Versuchsanordnung bestand aus zwölf Kiefernholzleisten mit den Abmessungen 50x5x5 mm. Sie wurden in drei Ebenen auf einer Keramischale angeordnet, vier pro Lage. Die Schale besaß eine nahezu rechteckige Form mit den Abmessungen 50x40 mm und eine Tiefe von 10 mm.

Die Schale wurde mit 1,5 ml FAM-Normalbenzin befüllt und die Holzleisten darüber angeordnet. Der Brandversuch wurde mit einem Feuerzeug gestartet und die Vorbrennzeit abgestoppt. Zur Sicherheit wurde die Keramischale auf einem großen Eisenuntersatz positioniert und der Versuch unter dem laufenden Rauchabzug durchgeführt. Nach einer Vorbrenndauer von 235 Sekunden ab Entzünden des Benzins wurde der Brand mit einem handelsüblichen Fingerdruckzerstäuber gelöscht, bis keine Glut mehr zu sehen war. Messungen ergaben, dass dieser bei jedem Sprühstoß durchschnittlich 126,6 mg versprühte. Der Fingerdruckzerstäuber ist in Abbildung 5 gezeigt. Die Massedifferenz der Sprühflasche vor und nach dem Versuch entsprach der Masse an benötigtem Löschmittel. In diesen Versuchen wurde das Löschmittel variiert, reines Wasser und Wasser mit bestimmten Zusätzen in unterschiedlichen Konzentrationen kamen zum Einsatz.



Abbildung 5: Fingerdruckzerstäuber

Im Zuge dieser Arbeit wurden diese Versuche teilweise nachgestellt. Es wurde jedoch ausschließlich Wasser als Löschmittel verwendet. Hier zeigte sich jedoch schnell das ungenügende Verhalten dieses Versuchsaufbaus, sodass weitere Versuche mit Löschmittelzusätzen gar nicht erst durchgeführt wurden.

Allerdings konnten einige wichtige Schwachstellen dieses Versuchsaufbaus ausgemacht werden und daraus Empfehlungen abgeleitet werden, den Versuchsaufbau insgesamt zu verbessern.

Die **Keramischale** ließ durch ihre kleinen Abmessungen nur beschränkt andere Versuchsaufbauten zu. Darüber hinaus konnte mit einer Schale nur einige wenige Versuche hindurch durchgeführt werden, da sie aufgrund der thermischen Einflüsse zerbrach. Eine Alternative aus Metall konnte hier Abhilfe schaffen.

Der **Aufbau** der Holzleisten erwies sich als ungeeignet, da der Stapel sich nur sehr ungleichmäßig entzündete. Während am Ende der Vorbrenndauer einige Leisten noch überhaupt nicht angebrannt waren, zerfielen andere beinahe schon, da sie schon fortgeschritten verkohlt waren. Konsequenterweise mussten hier Versuche mit unterschiedlichen Holzarten – und Profilen und mit alternativen Aufbauten durchgeführt werden, um die gewünschten Eigenschaften herauszuarbeiten.

Das **FAM-Normalbenzin** rußte sehr stark und stellte nur ein sehr ungenau definiertes Kohlenwasserstoffgemisch dar. In Anlehnung an die EN-3 wurde in den kommenden Versuchen Heptan verwendet.

Die Versuche fanden in einem **Abzug** mit zusätzlicher Luftzufuhr von unten statt. Diese hatte jedoch großen Einfluss auf den Brand selbst. In folgenden Versuchen sollte unter einem herkömmlichen, ausschließlich nach oben absaugenden Abzug gearbeitet werden.

Der Versuchsaufbau war statisch und wurde während des gesamten Versuchs nicht bewegt. Die Ungleichmäßigkeit des Brandes, sowie der starke Einfluss des Abzugs legte eine regelmäßige **Drehung** des Versuchsaufbaus nahe. Eine kontinuierliche oder schrittweise Drehbewegung des Versuchs während der Vorbrenndauer sollte die Gleichmäßigkeit des Brandes erhöhen, indem zum Beispiel äußere Einflüsse wie Luftströme über die Dauer des Versuchs von allen Seiten auf den Brand einwirken. In späteren Versuchen sollte dies mit einem Drehteller ermöglicht werden.

4.1.2 Erstellung eines grundlegenden Versuchsaufbaus

Aus den nachgestellten Versuchen konnten bereits wichtige Verbesserungen abgeleitet werden. Die Umsetzung dieser bis hin zur Implementierung zu einem brauchbaren Versuchsaufbau soll in diesem Kapitel näher beschrieben werden. Dieser sollte die Grundlage für die Materialversuche und die Versuchsentwicklung des Aufbaus I darstellen.

Der grundlegende Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

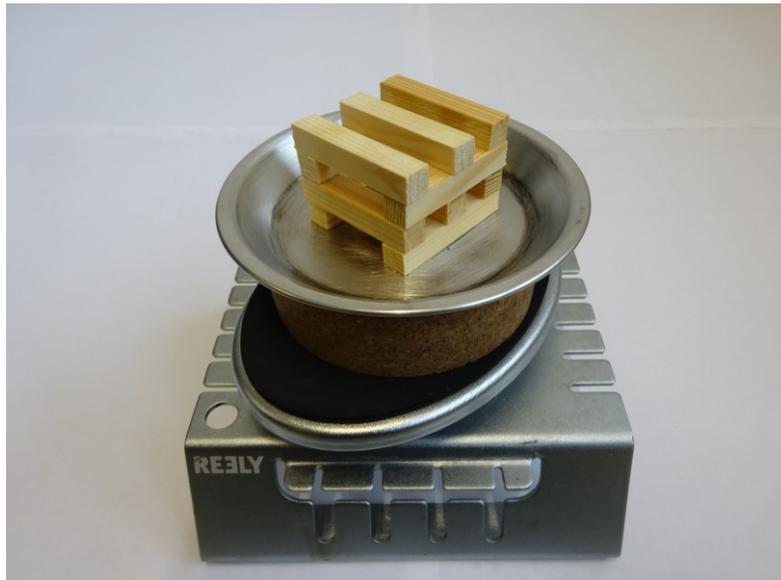


Abbildung 6: grundlegender Versuchsaufbau

Die Basis des Versuchs war ein Drehteller. Darauf gestellt wurde ein Korkring, der die Unterlage für eine Metallschale bildete. Auf dieser konnten nun verschiedene Versuchsaufstellungen getestet werden. Die Brände wurden über 2 ml Heptan initiiert, das sich in einer Vertiefung der Metallschale sammelte. Das Heptan brannte in der Regel zwischen 1:25 und 1:35 min lang.

Der Drehteller des Modellbauherstellers „Reely“ hielt während einer gesamten Drehung sehr gut seine waagrechte Position. Die Standfläche war in etwa elliptisch geformt, etwa 155 mm lang und 110 mm breit. Die Fläche war mit rutschfestem Schaumstoff überzogen. Den Versuch während der Durchführung kontinuierlich oder in regelmäßigen Abständen drehen zu können, stellte einen wesentlichen Schritt dar, die Homogenität des Feuers über den gesamten Aufbau zu gewährleisten. Es konnten so Einflüsse, die einseitig auf den Versuch einwirken zwar nicht unterbunden, wohl aber minimiert werden.

Der Korkring hatte einen Innen- und Außendurchmesser von 60 mm und 105 mm und eine Höhe von 30 mm. Der Ring war notwendig, um der darauf liegenden Metallschale guten Halt zu geben. Die Schale konnte trotz ihrer Vertiefung waagrecht stehen. Der Korkring selbst wurde vor dem Versuch angefeuchtet, da über die Metallschale hohe Temperaturen auf ihn einwirken konnten.

Da die Erfahrungen aus den ersten Versuchen mit Keramikschalen negativ ausfielen, wurde sie durch eine Metallschale ersetzt. Es wurde dazu eine Edelstahlschale mit einem Durchmesser von 120 mm angeschafft, in die mittig symmetrisch eine Vertiefung hineingearbeitet wurde. Die Vertiefung hatte einen oberen äußeren Durchmesser von circa

35 mm und fasste ein Volumen von 2 ml. Die Vertiefung war für das Heptan bestimmt, das den Brandversuch initiierte. Zu sehen ist sie in Abbildung 7. Abbildung 8 zeigt eine Skizze mit den dazugehörigen Abmessungen. Die Dimensionierung der Schale eignete sich ideal, um Hölzer von circa 50 mm Länge in verschiedenen Konfigurationen zu erproben. Die Metallschale hielt im Gegensatz zu keramischen Materialien die wechselnde thermische Belastung sehr gut aus und konnte so für beliebig viele Versuche verwendet werden.



Abbildung 7: Metallschale

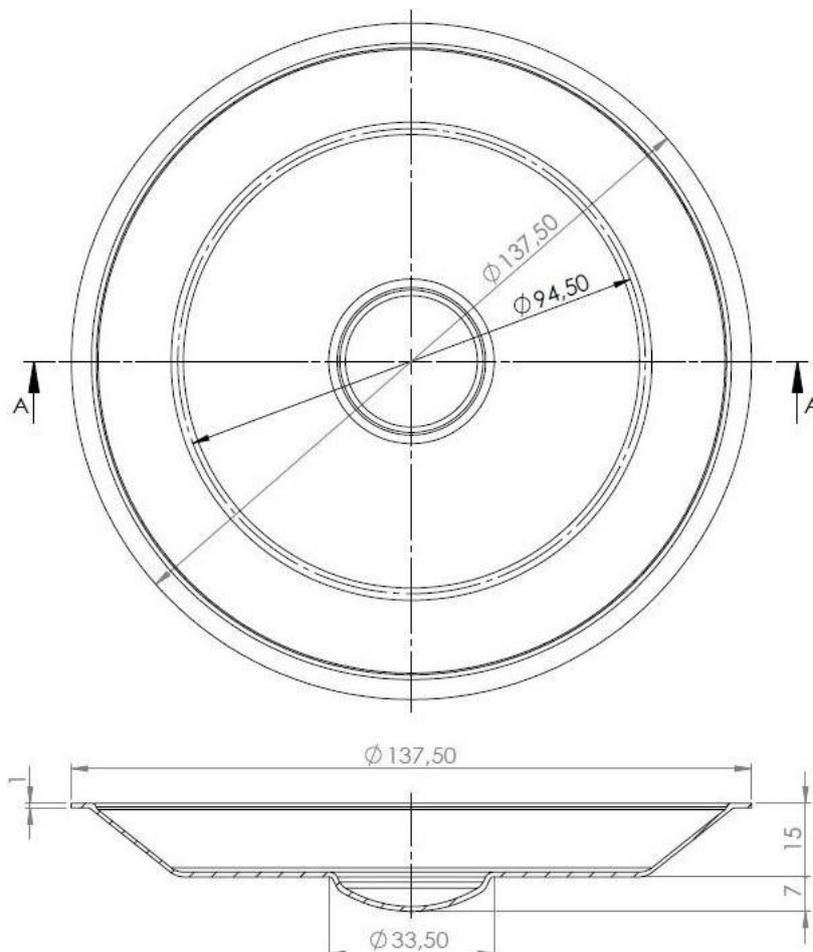


Abbildung 8: Zeichnung der Metallschale mit Abmessungen

Da die Luftströmung, die im Abzug herrschte, wahrscheinlich großen Einfluss auf den Brandversuch hatte, wurde ab sofort in einem Abzug gearbeitet, in dem die Luft ausschließlich von oben abgesaugt wurde. Die Luftauslässe befanden sich nicht direkt über dem Versuchsaufbau, sondern rund 50 cm rechts und links in einer Höhe von 1,5 m über der Arbeitsfläche. Der Abzug wurde während der Versuche nicht geschlossen, um zu verhindern, dass die Luft durch einen dünnen Spalt schnell in den Versuchsraum strömen konnte. Insgesamt stand der Abzug in dieser Position 1m hoch und 2m breit offen, wobei sich der Versuchsaufbau in der Mitte der Breite befand. Die Arbeitsfläche war insgesamt etwa 1m tief, auch hier war der Versuchsaufbau mittig positioniert.

4.1.3 Brennstoff

Die Wahl des Materials ist für einen gelungenen Versuchsaufbau von großer Bedeutung. In diesem Kapitel wird die Eignung verschiedener Materialien erörtert und durch Versuche auf ihre Tauglichkeit getestet.

Es ist hier besonders hervorzuheben, dass in dieser Versuchsmethodik Löschmittelzusätze für die Bekämpfung von Klasse-A-Brände getestet werden sollten. Damit kämen nur Feststoffe als Brennstoff in Frage, die bei Hitze nicht schmelzen. Ein weiteres, wichtiges Kriterium war die Homogenität des Materials. Bei den Versuchen sollten möglichst gleichbleibende Bedingungen herrschen.

Holz ist ein ausgesprochen wandelbares Material. Es sind in der Regel viele verschiedene Holzarten in unterschiedlichen Profilen im Handel erhältlich. Zu betonen ist, dass Holz in den meisten Brandfällen der Brandklasse A die Hauptmenge der Brandlast darstellt. Es erschien daher sinnvoll, für praxisnahe Versuche auch Holz zu verwenden. Derzeit übliche Großversuche zur Bestimmung der Löschwirkung werden hauptsächlich mit Holz durchgeführt.

Es ist ein Naturprodukt, seine Eigenschaften unterliegen daher zwangsläufig größeren Schwankungen, als industriell hergestellte Materialien. Dazu zählen besonders der Wassergehalt, die Dichte, die Porosität, der Harzanteil, der Brennwert, die chemische Zusammensetzung und die makroskopische Strukturierung. Allesamt haben sie Einfluss auf das Brand- und Löschverhalten, wie etwa eine Veränderung des Eindringverhaltens des Löschmittels.

Als alternative Brennstoffe kämen außerdem nicht schmelzende Kunststoffe, wie zum Beispiel Duroplaste, organische Fasern, Watte oder andere gepresste Produkte, wie

Pressspanplatten und Grillanzünder in Frage. Diese industriell verarbeiteten Produkte haben wahrscheinlich homogenere Eigenschaften als Holz.

4.1.3.1 Holz

Es wurden Versuche durchgeführt, die klären sollten, welche Holzarten und Profile grundsätzlich für einen Laborversuch besser oder schlechter geeignet wären. Dabei stand nicht unbedingt eine quantitative, als vielmehr eine qualitative Bewertung im Mittelpunkt.

Dafür wurden eine Reihe im Handel erhältliche Profile einiger verschiedener Holzarten auf ihre Eignung für Brandversuche getestet. Die getesteten Hölzer sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Holzarten und Profile

Holzart	Profil [mm x mm]
Kiefer	5 x 5
Kiefer	10 x 10
Kiefer	13,5 x 13,5
Kiefer	20 x 10
Buche	20 x 9
Buche	13,5 x 13,5
Lärche	9,2 x 9,2

Die Versuche wurden auf dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt und mit 2ml Heptan entzündet. Die Profile wurden auf eine Länge von 50 mm zurechtgeschnitten und in verschiedenen Konfigurationen aufgestapelt. Das Holz wurde nicht speziell konditioniert, lediglich mehrere Tage bei Laborbedingungen gelagert.

Das Hauptaugenmerk der Versuche lag auf der Beurteilung, ob die Materialien und ihre Profile für diese Art von Brandversuchen geeignet sind. Dafür wurde jede Holzart und ihr zugehöriges Profil in einigen verschiedenen Konfigurationen aufgestellt und entzündet. Eine Rotation wurde in etwa alle 15 Sekunden um 90° vollzogen. Zunächst wurde der Holzstapel nicht gelöscht, sondern komplett abgebrannt. Es erfolgte hier eine subjektive Beurteilung der Entwicklung, der Gleichmäßigkeit und der Vollständigkeit des Brandes und der Stabilität des

Stapels. Außerdem wurde ein Zeitpunkt ermittelt, bei dem das Löschen des Brandes am sinnvollsten erschien. Zu diesem Zeitpunkt musste der gesamte Stapel möglichst gleichmäßig in Brand stehen, jedoch die Stabilität gewährleistet sein. Im zweiten Versuchsschritt wurde der Brand zum ermittelten Zeitpunkt mit Wasser aus dem Fingerdruckzerstäuber gelöscht, bis keine Glut mehr erkennbar war. Hier wurde die benötigte Wassermenge gewogen, sowie das Löschverhalten subjektiv beurteilt.

Dadurch, dass verschiedene Hölzer in unterschiedlichen Profilen angeschafft wurden, lassen sich die Eigenschaften gut gegenüberstellen. Folgend sind die einzelnen Versuche und ihre Ergebnisse näher beschrieben.

Kiefer 5x5

Dieses Holz wurde bereits in den Vorversuchen verwendet und zeigte dort bereits unzufriedenstellende Eigenschaften. Weitere Versuche am neuen Versuchsaufbau änderten an dieser grundlegenden Aussage wenig.

Die Aufstellung ist in Abbildung 9 gezeigt. Es ließen sich mit zwölf Stück Holzleisten Vorbrennzeiten von 2:30 bis 3:00 min verwirklichen. Die benötigten Löschwassermengen bewegten sich dabei im Bereich von 0,7 bis 1,8 g. Die Stapel zeigten außerdem ungünstige Eigenschaften. Sie brannten sehr ungleichmäßig an, die untersten Stäbe verloren sehr schnell an Stabilität, wodurch auch der ganze Stapel instabil wurde.



Abbildung 9: Kiefer 5x5 mm

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass dieses Holzprofil nicht geeignet war. Die benötigte Löschwassermenge war zu gering und das Brand- und Stabilitätsverhalten nicht zufriedenstellend. Die Brandlast ließ sich auch nicht weiter erhöhen, da die Stapel zu schnell instabil wurden.

Kiefer 10x10 und Lärche 9,2x9,2

Der Unterschied im Profil war so gering, dass sich die beiden Hölzer sehr gut vergleichen ließen. Es zeigte sich für beide, dass erst Stapel mit mehr als vier Stück sinnvoll waren. Mit beiden Hölzern wurden Experimente bestehend aus acht Stäben durchgeführt und verglichen. In der nachfolgenden Abbildung ist die Aufstellung mit 9,2x9,2 mm Lärchenholzstäben zu sehen.



Abbildung 10: Lärche 9,2x9,2 mm

Das Kiefernholz zeigte sehr gute Eigenschaften. Es entzündete sich leicht, brannte recht gleichmäßig und vollständig an und erreichte bei wiederholten Versuchen stets bei 3:00 min einen Zustand, der für einen Löschversuch gut geeignet war. Die benötigten Löschwassermengen variierten im Bereich zwischen 2,3 bis 3,3 g.

Das Lärchenholz war dagegen weniger zufriedenstellend. Es entzündete sich deutlich schlechter. In einigen Fällen ging das Feuer sogar aus, bevor überhaupt ein Vollbrand erreicht wurde. Die meisten anderen Versuche benötigten eine Vorbrenndauer von rund 4:00 min. Das Löschverhalten des Lärchenholzes unterschied sich ebenfalls stark von der Kiefer. Die Glut im Lärchenholz war deutlich schwieriger zu löschen und erforderte wesentlich mehr Wasser. Die Löschwassermenge lag im Bereich von 3,2 bis 5,1 g.

Zusammenfassend, bestach die Kiefer mit diesem Profil durch ein gutes Brand- und Löschverhalten, auch die Werte des Löschmittelverbrauchs lagen in einem guten Bereich. Hier bestand jedenfalls Potential, das Material für weitere, optimierende Versuchen zu verwenden. Die Lärche zeigte dagegen Schwächen im Anbrennverhalten und auch beim Löschen. Eine sehr hartnäckige Glut machte das Ergebnis recht beliebig und vom Zufall abhängig.

Kiefer 20x10 und Buche 20x10

Diese recht großen Profile wurden zu je sechs Stück hochkant aufgestapelt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Aufstellung mit Buchenholzstäben.

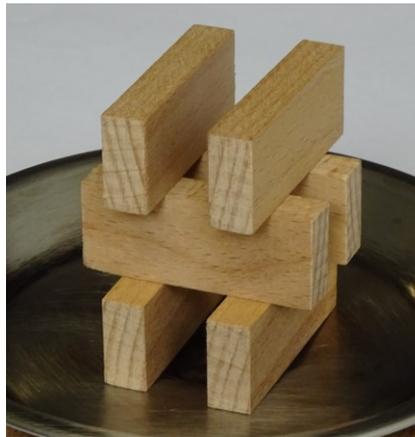


Abbildung 11: Buche 20x10 mm

Wieder zeigte das Kiefernholz gute Eigenschaften beim Anbrennen und beim Löschen. Nach einer Vorbrenndauer von 4:00 min war der Stapel gleichmäßig und vollständig in Brand. Er ließ sich gut löschen und benötigte dafür rund 3,6 bis 4,2 g Löschwasser.

Das Buchenholz brannte noch schneller als die Kiefer an und entwickelte dabei einen sehr gleichmäßigen und vollständigen Brand mit stärkerer Flammenbildung als die Kiefer. Bereits nach 3:10 min konnte mit der Löschfähigkeit begonnen werden. Längeres Abwarten wäre für den Versuch problematisch gewesen, da der Stapel bereits nach 3:45 min so instabil geworden war, dass er einzustürzen drohte, was den Versuch ungültig gemacht hätte. Zu löschen war das Buchenholzes deutlich schwieriger als das Kiefernholz. Vergleichbar mit dem Lärchenholz, saß die Glut besonders in den unteren Stäben sehr tief im Holz und ließ sich nur mit großem Aufwand löschen. Hier wurden Löschwassermengen von rund 7,3 bis 9,0 g benötigt.

Somit ließ sich zusammenfassend feststellen, dass das Kiefernholz mit diesem Profil die Eigenschaften besaß, die für den Versuchsaufbau erwünscht waren. Das Buchenholz hingegen war in seiner Handhabung schwieriger und seine Eigenschaften weniger geeignet.

Kiefer 13,5x13,5 und Buche 13,5x13,5

Hier zeigten sich die bereits beobachteten Eigenschaften der Holzarten. Die Aufstellung mit Kiefernholzstäben ist in der Abbildung 12 zu sehen. Die Größe der Profile führten jedoch zu sehr langen Vorbrenndauern. Diese Typen schienen insgesamt nicht geeignet.

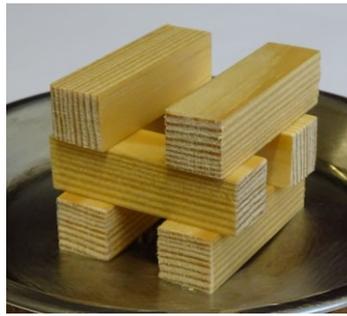


Abbildung 12: Kiefer 13,5x13,5 mm

4.1.3.2 Alternative Brennstoffe

Von den möglichen alternativen Brennstoffen wurde nur ein Versuch mit handelsüblichen Grillanzündern durchgeführt. Zur qualitativen Bewertung wurden mehrere Blöcke auf eine metallische Unterlage gelegt und angezündet.

Es zeigten sich jedoch keine zufriedenstellenden Eigenschaften, woraufhin diese Materialwahl verworfen wurde.

Außerdem erschien es zweifelhaft, ein Material für Brandversuche dieser Art zu verwenden, das mit praxisnahen Löschszenarien nichts mehr zu tun hätte.

4.1.3.3 Fazit der Vorversuche

Die für den Versuchsaufbau gewünschten Eigenschaften, gute Entzündbarkeit, gleichmäßiges Brandverhalten, gute Eigenschaften beim Löschen, wurden am besten von Kiefernholz erfüllt. Sowohl das 20x10 mm, als auch das 10x10 mm Profil schienen für weitere Versuchsoptimierungen geeignet. Stäbe im Profil 10x10 mm konnten jedoch leichter zu verschiedenen Stapeln angeordnet werden, was sie in ihrer Anwendung flexibler und für weitere Versuche geeigneter machte. Somit stellten Kiefernholzleisten im Profil von 10x10 mm das Ausgangsmaterial für alle folgenden Versuche dar. Abschließend erfolgte eine Charakterisierung des gewählten Brennstoffs.

4.1.3.4 Charakterisierung des Kiefernholzes

Eine Probe der 10x10 mm Kiefernholzleisten wurde im lehrstuhleigenen Labor analysiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 3, 4 und 5 gezeigt.

Es wurde in den Versuchen stets mit Holz desselben Herstellers gearbeitet, nicht jedoch mit derselben Charge. Diese könnten sich geringfügig unterschieden haben. Dadurch erklärten sich kleine Abweichungen, etwa des Wassergehalts.

Tabelle 3: Ergebnisse der Brennstoffanalyse

Flüchtige Bestandteile	[%]	79,39
C_{fix}	[%]	11,17
Asche	[%]	2,53
Wasser	[%]	6,91
Summe	[%]	100,00

Tabelle 4: Elementare Zusammensetzung

Kohlenstoff	[%]	48,4
Wasserstoff	[%]	6,59
Stickstoff	[%]	0,20
Gesamtschwefel	[%]	0,01
Sauerstoff (Rest)	[%]	35,35
Summe	[%]	90,55

Tabelle 5: Energieinhalt

Brennwert	[kJ/kg]	16.680
Heizwert	[kJ/kg]	15.064

4.2 Versuchsaufbau I

In diesem Kapitel werden die einzelnen Teilschritte zur Findung eines Brandversuchs für die Bewertung von Löschmittelzusätzen beschrieben und ihre Ergebnisse präsentiert. Der in den Vorversuchen entwickelte Versuchsaufbau, stellt die Grundlage für die Versuche dieses Kapitels dar. Dieser fand in den im folgenden beschriebenen Versuchen konsequente Anwendung.

Als Brennstoff dienten Kiefernholzstäbe, die in verschiedenen Varianten aufgestapelt werden konnten. Die beste Stapelkonfiguration ausfindig zu machen, war das Ziel des ersten Teils dieses Kapitels.

Daran anschließend wurden Versuche mit zwei verschiedenen Löschmittelzusätzen durchgeführt. Um der Frage nachgegangen zu können, ob für die Bewertung von Löschmittelzusätzen eine Randomisierung der einzelnen Versuche sinnvoll ist oder ob ein Abarbeiten in Versuchsreihen ohne Variation des Löschmittels besser geeignet ist, wurden beide Möglichkeiten untersucht.

4.2.1 Versuche mit verschiedenen Aufbauten

Auf dem in den Vorversuchen entwickelten Versuchsaufbau, wurden nun verschiedene Stapelkonfigurationen getestet. Die in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Versuchsbedingungen fanden hier konsequente Anwendung.

Als Brennstoff wurden ausschließlich Kiefernholzstäbe mit den Maßen 50x10x10 mm verwendet. Das Holz wurde nicht speziell konditioniert, lediglich über mehrere Tage bei Laborbedingungen gelagert. Der Aufbau wurde alle 15 Sekunden händisch um 90° weitergedreht. Gelöscht wurde mit einem handelsüblichen Fingerdruckzerstäuber. Die Handhabung des Löschens oblag dabei der durchführenden Person.

Insgesamt wurden sieben verschiedene mögliche Aufbauten erprobt. Eine Übersicht ist in der nachstehenden Tabelle 6 zu sehen. Die Vorbrenndauer konnte nicht beliebig festgelegt werden. Sie wurde erst im Laufe der Versuche, aufgrund der gemachten Erfahrungen, für jede Versuchsanordnung angepasst.

Tabelle 6: Übersicht über die Konfigurationen

Konfiguration	Stückzahl	durchschnittliche Holzmasse	Vorbrenndauer
		g	mm:ss
1a	10	27,3	4:00
1b	7	19,1	4:00 3:45 3:30
1c	14	35,5	3:30
1d	11	29,7	3:30 3:00 2:45
1e	8	21,6	3:00 2:30
1f	10	28,6	2:30 2:15
1g	10	27,3	3:00 2:45 2:30

Nachfolgend werden die allgemeinen Regeln zur Beurteilung der Gültigkeit eines Versuchs näher erläutert. Ebenso muss die Löschmethode, sprich die Handhabung des Löschvorgangs und der richtige Umgang mit dem Fingerdruckzerstäuber definiert werden.

Im Anschluss daran werden die einzelnen Versuche näher beschrieben und die Resultate präsentiert. Die Werte der einzelnen Versuchsreihen befinden sich im Anhang.

4.2.1.1 Gültigkeit der Versuche und Löschmethode

Um nachfolgende Versuche sinnvoll bewerten zu können, mussten zwei wesentliche Kriterien vorab definiert werden. Das waren zum einen die Kriterien für die Gültigkeit eines Versuchs und zum anderen die Löschmethode selbst.

Die Vorbrenndauer musste für einen Versuchsaufbau so gewählt werden, dass der gesamte Stapel gleichmäßig und vollständig anbrannte. Konkret sollten alle Holzstäbe gleichmäßig angekohlt sein, die untersten ähnlich stark wie die obenliegenden. Auch sollten

keine gravierenden Unterschiede zwischen den einzelnen Seiten eines Stapels auftreten. Diese Punkte wurden in Anforderung nach Gleichmäßigkeit zusammengefasst. Daneben sollte der Stapel bei Beginn der Vorbrenndauer stets vollständig in Brand stehen. Das heißt, es sollte sich zu diesem Zeitpunkt ein starkes und auch über den gesamten Stapel gleichmäßiges Flammenbild gebildet haben. Die Größe des Brandes sollte am Ende der Vorbrenndauer sein Maximum erreicht haben.

Ein wesentlicher Ausschlussgrund für diese Brandversuche war die Stabilität des Stapels. Um als gültiger Versuch zu gelten, musste der Stapel von der Brandinitiierung bis zum „Brand aus“ im Wesentlichen seine Aufstellung beibehalten. Das heißt, es sollte zu keinem Verrutschen oder Herausspringen von einzelnen oder mehreren Stäben kommen, genauso wenig wie zu einem Neigen des Stapels oder gar zum Zusammenbruch. Leicht nachvollziehbar scheint diese Regel im Falle des Zusammenbruchs des Stapels und auch beim Verrutschen der Stäbe. Das konnte den Löschvorgang wesentlich beeinflussen. Dies wurde besonders deutlich, wenn zwei Stäbe sehr nahe beieinander zu liegen kamen. Die Glut wurde dadurch vom Löschmittel schlechter erreicht. Auch im umgekehrten Fall eines herausgefallenen Stabes, wirkte sich das auf die Löscharbeit meist verkürzend aus.

Selbstverständlich verhielt sich kein Brand wie der andere. Daher kann diese Richtlinie auch keine exaktere Abgrenzung anbieten. Schlussendlich oblag die Bewertung, ob ein Versuch als gültig gewertet werden konnte, der durchführenden Person.

Zuletzt muss auch die Löschmethode näher vorgegeben werden. Zum Löschen wurde stets ein handelsüblicher Fingerdruckzerstäuber verwendet. Messungen ergaben, dass dieser bei jedem Sprühstoß durchschnittlich 126,6 mg versprühte. Es wurde darauf geachtet, dass der Zerstäuber vor Löschbeginn zumindest halb voll war. Bei geringen Füllmengen konnte es vorkommen, dass beim Sprühen Luft angesaugt wurde, was die Löschtätigkeit negativ beeinflusste.

Die Sprühflasche wurde auf den brennenden Stapel gerichtet und aus einem Abstand von mindestens 7 cm mit kräftigen Sprühstößen das Löschmittel auf den Brand verteilt. Ein näheres Herangehen an den Stapel barg ein großes Risiko ihn zu verrücken oder gar umzuwerfen. Der Winkel und die Position des Löschangriffs konnte frei gewählt werden. Es empfahl sich, den Drehteller in die gewünschte Position zu drehen, anstatt ständig die Position der Hand zu ändern. Besonders kritisch war die Endphase der Löschtätigkeit, in der es darum ging, verbleibende Glutpunkte zu löschen. Konnten diese Punkte nicht effektiv erreicht werden, zog sich die Löschphase in die Länge und überproportional viel Löschmittel musste aufgewendet werden. Es war darauf zu achten, diese entscheidenden Punkte sehr

zielgenau zu bekämpfen. Dafür konnte der vorgegebene Mindestabstand auch unterschritten werden, solange die Stabilität und die Ordnung des Stapels nicht gestört wurden.

4.2.1.2 1a

In dieser Formation wurden fünf Lagen Hölzer übereinandergelegt. Eine Fotoaufnahme zeigt den Aufbau in Abbildung 13.

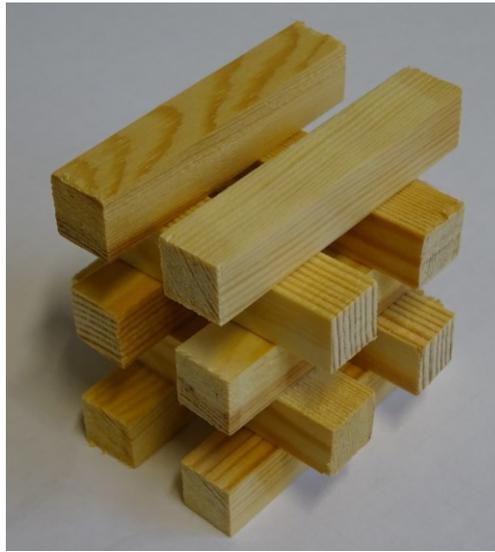


Abbildung 13: Aufbau 1a

Schon in den ersten Versuchen zeigte sich eine Vorbrenndauer von 4 min als optimal, auf eine Variation wurde daraufhin verzichtet. Nach dieser Vorbrenndauer war stets ein recht vollständig entwickeltes und gleichmäßiges Flammenbild zu beobachten.

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. An insgesamt vier nicht aufeinanderfolgenden Tagen, wurden ein mal sieben und drei mal zehn Einzelversuche gemacht. Es kam nur zu einer geringen Anzahl an ungültigen Versuchen, etwa durch nur einseitiges Anbrennen. Es wurde nur im zweiten Block ein Versuch und im zweiten zwei Versuche für ungültig erklärt und ihr Ergebnis nicht in die Analyse einbezogen.

Die Resultate sind in nachstehender Tabelle 7 und in Abbildung 14 in Form von Kastendiagrammen dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1a

Versuch	Vorbrenn- dauer	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
	mm:ss	g	g	%
1a-1	4:00	4,2	1,6	37,8
1a-2	4:00	1,9	0,3	13,9
1a-3	4:00	2,0	0,3	16,1
1a-4	4:00	2,6	0,6	23,7

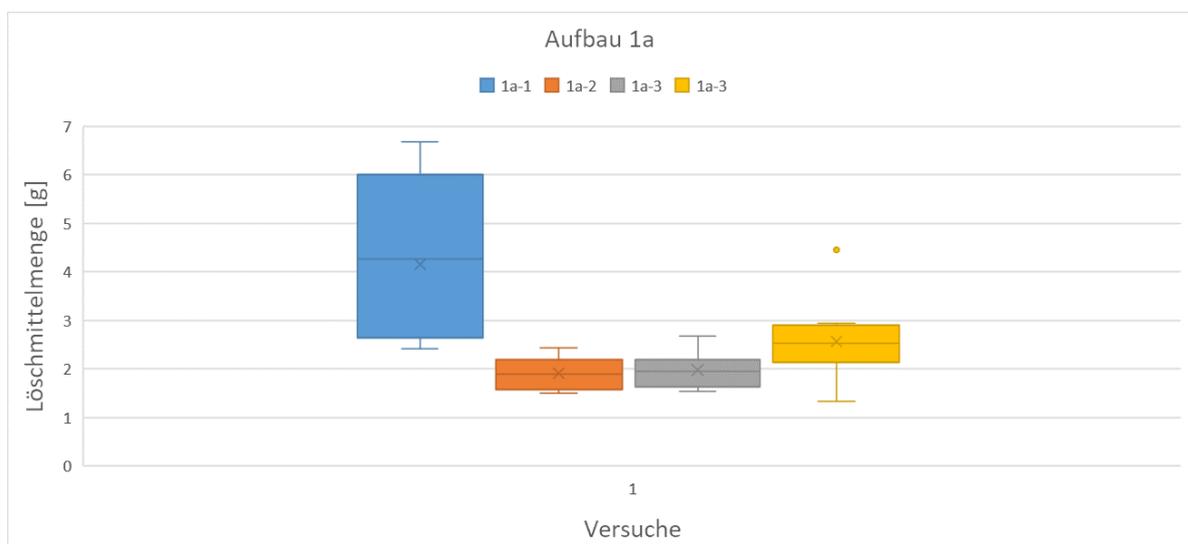


Abbildung 14: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1a

Auffällig war sicherlich der erste Versuchsblock. Er wies eine sehr große Streuung der Werte auf und sein Mittelwert lag dabei auch wesentlich über dem aller nachfolgenden Versuche. Der zweite und dritte Versuchsblock fand an einander folgenden Tagen statt. Die Ergebnisse zeigten sehr geringe Streuungen und die Mittelwerte waren bei einem Signifikanzniveau von 95% statistisch gesehen gleich. Die anschließend vierte Reihe zeigte auch keine wesentlich größere Streuung als die beiden vorhergehenden. Lediglich der Mittelwert der vierten Reihe lag statistisch signifikant darüber.

Dieser Versuchsaufbau zeigte sehr gute Eigenschaften. Er brannte in der Regel sehr gleichmäßig und vollständig an. Es zeigte sich dabei ein großes und gleichmäßiges Flammenbild. Der Stapel war auch während des ganzen Versuchs sehr stabil, sei es

innerhalb der Vorbrenndauer, als auch in der Löschphase. Es wurde kein einziger Versuch ungültig erklärt. Das Verhalten beim Löschen wurde ebenfalls als sehr positiv wahrgenommen. Der Brand war stets gut löschar, Probleme mit schwierig zu löschenden Glutpunkten traten nicht auf. Das war vor allem dem recht offenen Aufbau dieser Variante zu verdanken. Glühende Stellen im Inneren des Stapels konnten gut mit dem Fingerdruckzerstäuber getroffen werden.

Zusammenfassend erschien dieser Aufbau in Hinsicht auf sein Verhalten und die erreichten Werte durchaus geeignet, um weitere Versuche mit Wasser und Löschmittel durchzuführen. Nachteilig wurde lediglich die recht geringe gesamte Löschmittelmenge beurteilt, die sich um den Wert von nur 2 g bewegte.

4.2.1.3 1b

In dieser Formation wurden lediglich sieben Stück Holzleisten zu je 50x10x10 mm verwendet. Sie wurden in drei Lagen aufgestapelt, zwei in der untersten, drei in der mittleren und wieder zwei in der obersten Lage. Eine Fotoaufnahme zeigt den Aufbau in Abbildung 15.

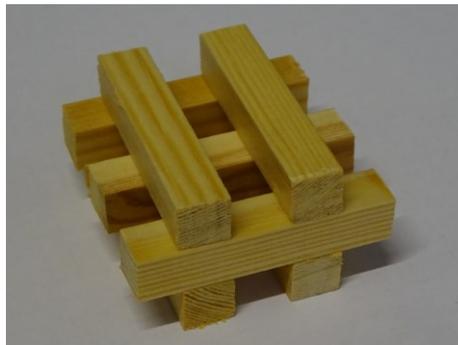


Abbildung 15: Aufbau 1b

Es wurden vier Blöcke zu je zehn Versuchen durchgeführt. Dabei wurde die ursprünglich gewählte Vorbrenndauer von 4:00 min nach einmaliger Wiederholung auf 3:45 min und schließlich auf 3:30 min gesenkt.

Die Resultate sind in Tabelle 8 gezeigt. Abbildung 16 zeigt sie in Form von Kastendiagrammen.

Tabelle 8: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1b

Versuch	Vorbrenn- dauer	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
	mm:ss	g	g	%
1b-1	4:00	2,8	0,8	28,7
1b-2	4:00	2,2	0,8	35,1
1b-3	3:45	2,0	0,6	30,1
1b-4	3:30	1,7	0,4	22,3

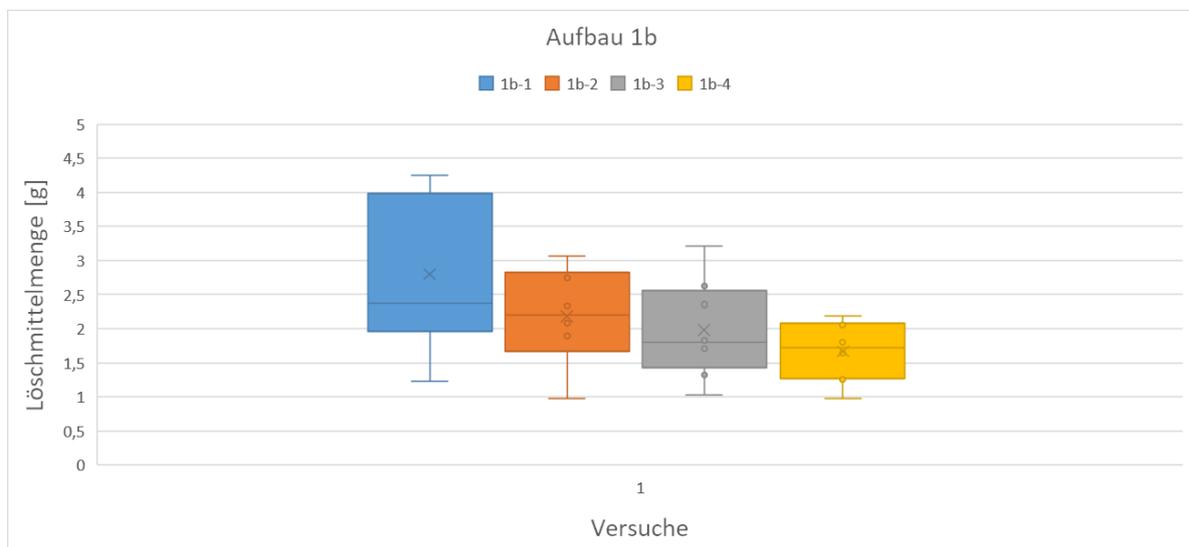


Abbildung 16: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1b

Wieder zeigte der erste durchgeführte Block ein deutlich schlechteres Ergebnis als die nachfolgenden. Die nachfolgenden Versuchsblöcke wurden mit Vorbrenndauern von 4:00, 3:45 und 3:30 min in dieser Reihenfolge sehr zeitnahe durchgeführt.

Erkennbar war deutlich ein Abnehmen der benötigten Löschmittelmenge mit Verringerung der Vorbrenndauer. Ebenso wies der letzte Block auch die geringste Streuung auf. Die Ergebnisse deckten sich mit den subjektiven Eindrücken während der Versuche. Eine längere Vorbrenndauer führte zu einer stärkeren Verkohlung, die das Löschen schwieriger machte und mehr Löschmittel verbrauchte. Die stärkere Verkohlung machte den Stapel jedoch sehr instabil, sodass bei einer Vorbrenndauer von 4:00 min vier von zehn Versuchen

für ungültig erklärt werden mussten. Bei den Blöcken mit 3:45 und 3:30 min Vorbrenndauer waren es nur jeweils zwei von zehn.

Dieser Versuchsaufbau zeigte ein gutes Brandverhalten und ließ sich auch gut löschen. Bei einer Vorbrenndauer von 3:30 min zeigten sich die besten Ergebnisse. Hier war die Streuung am geringsten, jedoch war die absolute Löschmittelmenge von durchschnittlich unter 2 g sehr gering. Mehr Zeit erhöhte zwar den Grad der Verkohlung, was die benötigte Löschmittelmenge erhöhte, jedoch den Stapel auch wesentlich instabiler machte.

Aufbau 1b kam aufgrund der recht geringen Löschmittelmenge und der im Vergleich zu anderen Aufbauten größeren Streuung nicht für weitere Versuche in Frage.

4.2.1.4 1c

Mit diesem Aufbau wurde bewusst eine sehr große Brandlast eingesetzt. 14 Stäbe wurden hierfür gekreuzt in fünf Lagen übereinandergestapelt. Die Aufstellung ist in Abbildung 17 gezeigt.

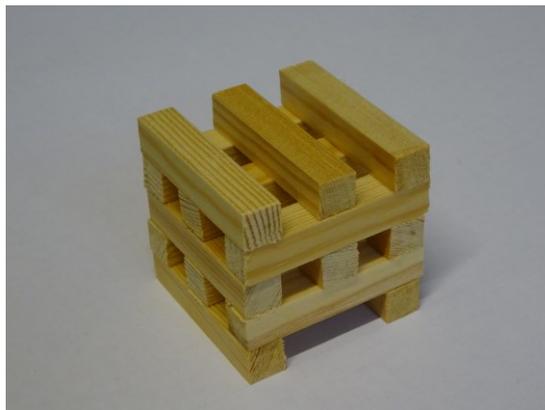


Abbildung 17: Aufbau 1c

Nach einzelnen Experimenten zeigte sich eine Vorbrenndauer von 3:30 min als optimal. Es fand daraufhin nur eine Reihe aus zehn Einzelversuchen statt. Die Versuche zeigten einen mittleren Löschmittelverbrauch von 8,2 mg in einem 95%-Konfidenzintervall von $\pm 0,7$ mg.

Aufgrund der Größe des Stapels waren die untersten Stäbe sehr viel rascher verkohlt und bereits am Zusammenbrechen, als die obersten gerade erst Feuer fingen. Eine Veränderung der Vorbrenndauer wäre daher nicht möglich gewesen. Das Löschen selbst stellte sich als sehr aufwändig heraus, da die kompakte Bauweise das Erreichen von glühenden Stellen im Inneren sehr schwierig und zufällig werden ließ.

Dieser Aufbau stellte sich somit aufgrund seiner schlechten Handhabung als nicht weiter brauchbar heraus.

4.2.1.5 1d

Aufgrund der Erfahrungen aus Versuchsaufbau 1c wurde bei Aufbau 1d die Brandlast etwas reduziert, indem die oberste Lage aus drei Stäben weggelassen wurde. Die übrigen elf Stäbe wurden baugleich aufgestellt. Die Aufstellung ist in Abbildung 18 gezeigt.

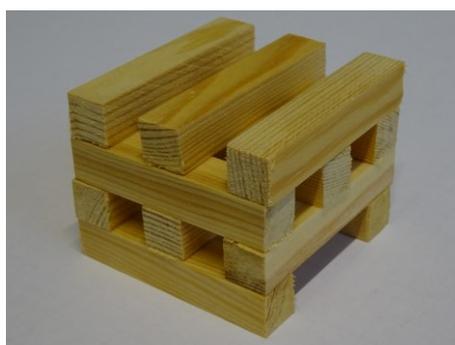


Abbildung 18: Aufbau 1d

Es wurden insgesamt vier Versuchsreihen zu je neun bzw. zehn Versuchen durchgeführt. Begonnen wurde mit einer Vorbrenndauer von 3:30 min, die einmal wiederholt wurde, danach folgten Reihen mit 3:00 und schließlich 2:45 min.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 und Abbildung 19 dargestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1d

Versuch	Vorbrenndauer	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
	mm:ss	g	g	%
1d-1	03:30	8,3	2,3	27,7
1d-2	03:30	7,6	2,1	27,6
1d-3	03:00	6,7	1,4	21,4
1d-4	02:45	5,9	1,4	24,1

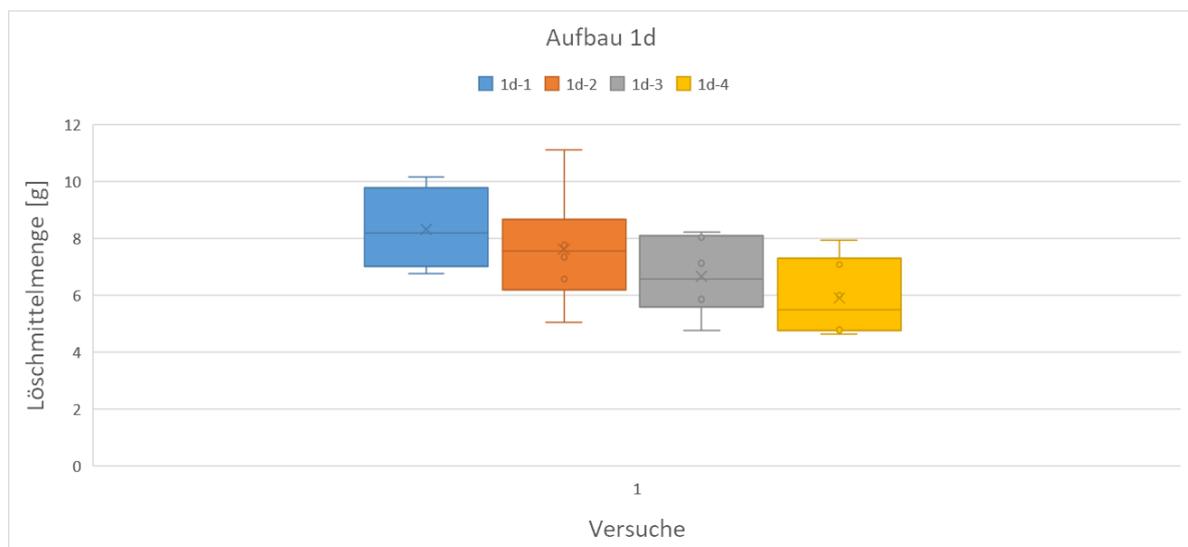


Abbildung 19: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1d

Es zeigte sich wie schon in den Versuchen mit anderen Aufbauten, ein deutlich erkennbar schlechterer erster Versuchsblock. Schon beim der zweiten Reihe wurde ein niedrigerer Mittelwert an Löschmittelmenge erzielt. Ebenfalls erkennbar war ein Abnehmen der Löschmittelmenge mit der Vorbrenndauer. Alle Versuchsreihen zeigten ähnliche und relativ große Streuungen.

Bei Vorbrennzeiten von 3:30 und 3:00 min zeigte der Aufbau ein sehr gutes Brandverhalten, bei dem der gesamte Stapel gleichmäßig und vollständig in Flammen stand. Lediglich 2:45 min Vorbrenndauer schien zu kurz zu sein. Ein Zusammenbrechen der Stapel wurde nicht beobachtet.

Jedoch erwies sich das Verhalten der Aufstellung über den Versuch hinweg als nicht optimal, was besonders an der Anzahl an ungültigen Versuchen erkennbar war. Alle Versuchsblöcke wiesen viele ungültige Versuche auf, nämlich vier bis fünf von zehn. Das Hauptproblem war, dass die Stäbe während des Löschvorgangs sehr leicht verrutschten und somit das Ergebnis auf ungewisse Art beeinflussten. Die Bewertung der Gültigkeit war hier sehr schwierig.

Subjektiv war es die Schwierigkeit zu erkennen, weit innen gelegene Glutpunkte in dieser sehr kompakten Bauweise zu löschen. Der Stapel war schlicht zu unzugänglich für gezieltes Löschen von verbleibenden Glutpunkten.

Zusammengefasst konnte mit dem Aufbau 1d ein hoher Löschmittelbedarf realisiert werden. Dieser wurde jedoch immer von einer großen Streuung begleitet. Es kam außerdem zu einer sehr hohen Anzahl an ungültigen Versuchen. Dabei war die Entscheidung über die

Gültigkeit sehr schwierig. Für weiterführende Versuche erschien dieser Aufbau nicht geeignet.

4.2.1.6 1e

Aufgrund der Erfahrungen von Aufbau 1c und 1d wurde nun die Brandlast weiter verringert, indem eine weitere Lage Stäbe entfernt wurde. Somit blieben acht Stück übrig, die wie in Abbildung 20 gezeigt, aufgestellt wurden.

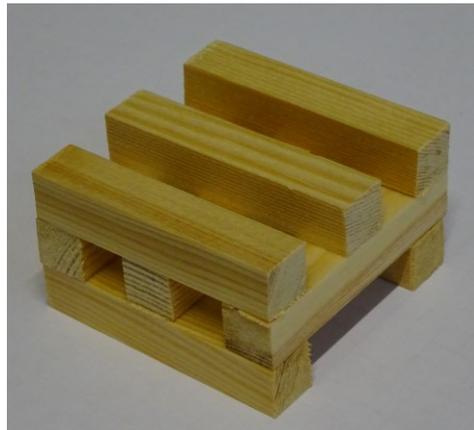


Abbildung 20: Aufstellung 1e

Es wurden insgesamt nur zwei Versuchsreihen mit Vorbrennzeiten von 3:00 und 2:30 min durchgeführt. Auf eine Darstellung der Ergebnisse kann hier verzichtet werden. Alleine die Erfahrungen während der Versuche ließen eine weitere Auswertung sinnlos erscheinen. Das Problem war der sehr hohe Anteil an ungültigen Versuchen. Die einzelnen Versuche brannten sehr ungleich an. Einerseits verkohlten manche zu stark, andere wiederum brannten nur ungenügend oder einseitig an. Viele der Aufbauten verrutschten während des Löschvorgangs und machten die Entscheidung über die Gültigkeit sehr schwierig.

Dieser Aufbau eignete sich nicht für weitergehende Versuche.

4.2.1.7 1f

Dieser Aufbau aus 10 Stäben, angeordnet mit zwei Stäben in den untersten zwei Lagen und jeweils drei Stäben in den zwei obersten, wurde mit Vorbrenndauern von 2:30 und 2:15 min erprobt. Die Aufstellung ist in Abbildung 21 gezeigt.

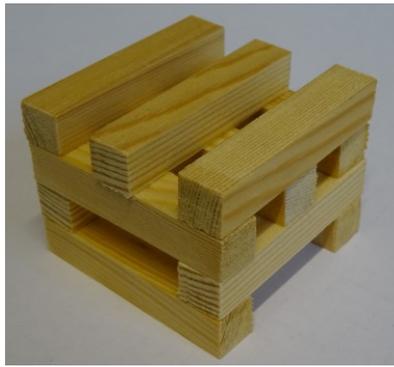


Abbildung 21: Aufstellung 1f

Auf eine Darstellung der Ergebnisse im Detail kann auch hier verzichtet werden. Die Vorbrenndauer von 2:30 min war für diese Aufstellung zu lang. Die Stapel wurden zu instabil und brachen zusammen. Schließlich wurde der Versuchsblock abgebrochen.

Ein weiterer Durchlauf mit reduzierter Vorbrenndauer von 2:15 min zeigte kaum bessere Ergebnisse. Diese Versuche zeigten jedoch ein sehr ungleiches Anbrennverhalten und waren auch in der Löschphase sehr instabil. Zu viele Versuche mussten als ungültig bewertet werden.

Insgesamt erschien dieser Aufbau als nicht zielführend. Er brannte schicht zu ungleich an und war zu instabil.

4.2.1.8 1g

Die letzte der untersuchten Aufstellungsmöglichkeiten bestand aus zehn Stäben, die in vier Lagen, zu je zwei Hölzern in der ersten und dritten und drei Hölzern in der zweiten und vierten Lage, geschichtet wurden. Die Aufstellung ist in Abbildung 22 zu sehen.

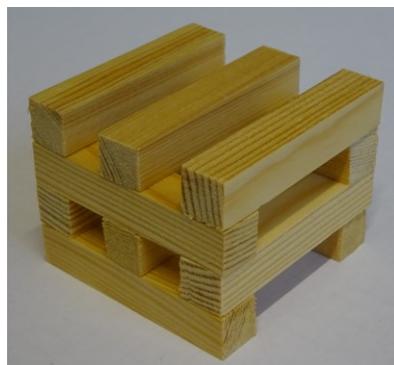


Abbildung 22: Aufstellung 1g

Es wurden insgesamt sechs Versuchsreihen, je zehn Einzelversuche, mit drei verschiedenen Vorbrenndauern durchgeführt, vier mit 2:30 min und je eine mit 3:00 und

2:45 min. In Abbildung 23 sind die Ergebnisse in Form von Kastengraphiken zu sehen, Tabelle 10 zeigt die Mittelwerte und die dazugehörigen 95%-Konfidenzintervalle als absolute und relative Werte.

Tabelle 10: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1g

Versuch	Vorbrenndauer	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
	mm:ss	g	g	%
1g-1	3:00	6,2	0,7	11,8
1g-2	2:45	5,4	1,0	19,0
1g-3	2:30	4,9	0,4	8,9
1g-4	2:30	4,0	0,2	5,9
1g-5	2:30	4,8	0,6	12,0
1g-6	2:30	4,8	0,7	14,6

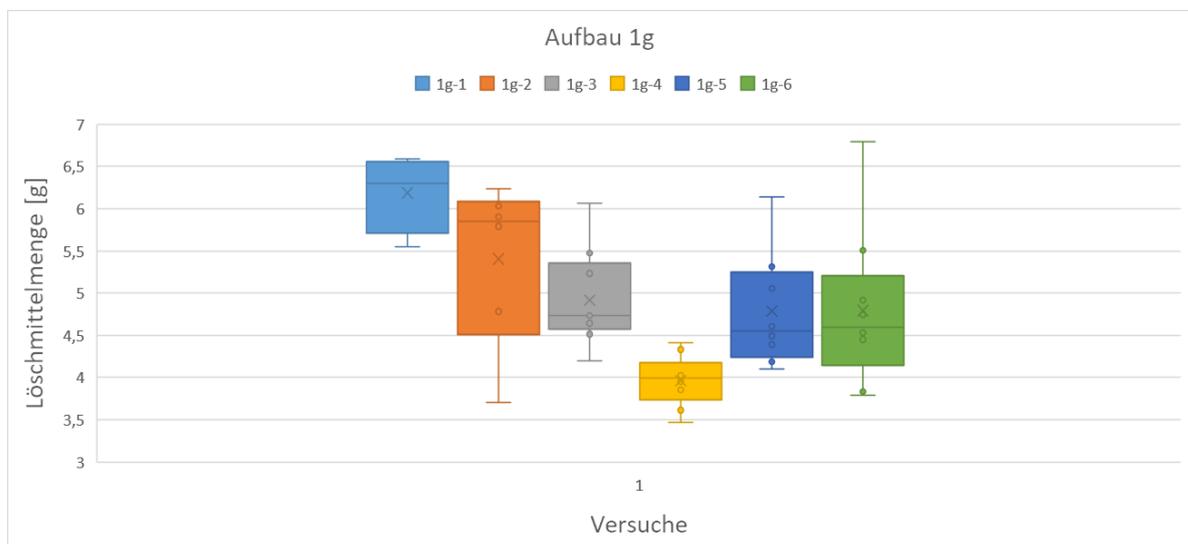


Abbildung 23: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 1g

Die Versuchsreihen 1g-1 und 1g-2 mit 3:00 und 2:45 min Vorbrenndauer waren durch eine große Anzahl an ungültigen Versuchen gezeichnet. Der Grund war vor allem ein zu fortgeschrittener Brand und durch die Verkohlung instabil gewordener Aufbau. Viele Stapel brachen beim Löschen oder sogar schon davor zusammen.

Erst die Versuche mit 2:30 min Vorbrenndauer zeigten die gewünschten Eigenschaften. Trotz kürzerer Vorbrennzeit war das Flammenbild in den meisten Fällen sehr gut entwickelt, der Brand sehr gleichmäßig und vollständig über den Stapel verteilt. Trotzdem waren die Stapel noch stabil und fielen nicht in sich zusammen und verrutschten auch kaum während des Löschvorgangs. Das spiegelte sich auch in der geringen Zahl an ungültigen Versuchen wieder, die bei ein bis zwei von zehn Versuchen lagen.

Dieser Aufbau ließ sich sehr gut löschen. Die Bauweise war durch ein fehlendes Glied in der Mitte weniger kompakt als beispielsweise die Aufbauten 1c, 1d und 1e und dadurch die Glut im inneren leichter erreichbar. Diese Eigenschaft zeigte sich in den geringen und gleichmäßigen Streuungen, sprich an den engen Konfidenzintervallen. Die Brandlast selbst reichte aus, um Löschmittelmengen von mindestens 4 mg zu realisieren.

Von besonderer Bedeutung für weiterführende Versuche war jedoch auch die Gleichmäßigkeit der einzelnen Versuchsreihen. 1g-3, 1g-5 und 1g-6 zeigten fast identische Mittelwerte und sehr ähnliche Streuungen. Lediglich die Versuchsreihe 1g-4 stellte eine Ausnahme dar, der Mittelwert lag bei noch geringerer Streuung deutlich unter den anderen. Der Grund für dieses abweichende Ergebnis konnte an dieser Stelle nicht gefunden werden.

Zusammenfassend ließen sich mit dem Versuchsaufbau 1g bei einer Vorbrenndauer von 2:30 min sehr vielversprechende Ergebnisse erzielen. Es konnten über die Versuchsreihen sehr gleichmäßige Resultate erzielt werden. Die Löschmittelmenge lag mit mindestens 4 g in einem sehr guten Bereich und streute dabei wenig. Durch die guten Eigenschaften des Aufbaus, waren die meisten Versuche gültig und ließen sich durch die etwas offenere Aufstellung gut löschen. Dieser Aufbau schien für weiterführende Versuche sehr gut geeignet.

4.2.2 Versuche mit Löschmittelzusätzen

Aus den Versuchen des vorherigen Kapitels wurde der Aufbau 1g als vielversprechendster für weiterführende Versuche ausgewählt. Bisher zeigte der Aufbau sehr gute Eigenschaften, er wurde jedoch erst lediglich mit Wasser als Löschmittel erprobt. Die nachfolgenden Versuche klärten, in wie weit er geeignet war, auch für verschiedene Löschmittelzusätze gute Ergebnisse zu erzielen.

Um Aussagen über die Eignung zum Erproben von Löschmittelzusätzen zu erhalten, wurden Versuchsreihen durchgeführt, die identisch mit der Variante 1g im Ablauf und Aufbau waren. Nur wurde dabei das Löschmittel variiert. Für die Versuche wurde stets baugleiche

Fingerdruckzerstäuber verwendet. Beim Befüllen wurde besonderer Wert auf Sauberkeit gelegt, um eine ungewollte Beeinflussung der Löschmittel zu verhindern.

4.2.2.1 Randomisierung und Reihenversuche

Für die Erprobung der Löschmittelzusätze ergaben sich zwei mögliche Methoden. Ihre Vor- und Nachteile und die Erwartungen an sie werden hier beschrieben.

Zum einen konnten Versuchsreihen durchgeführt werden, die gleich wie die vorhergegangenen Versuchsreihen abliefen. Jedoch wurden zum Unterschied die zu prüfenden Löschmitteln verwendet. Jeder einzelne Versuch wurde mit demselben Löschmittel bei gleicher Konzentration durchgeführt. Erst wenn eine Versuchsreihe abgeschlossen war, konnte in der nächsten Reihe ein anderes Löschmittel oder eine andere Konzentration verwendet werden.

Andererseits bestand die Möglichkeit der Randomisierung der Einzelversuche. So wurden die einzelnen Experimente hintereinander in zufälliger Reihenfolge, mit verschiedenen Löschmitteln bzw. Konzentrationen durchgeführt. Für die Randomisierung wurde ein Zufallsgenerator verwendet.

Das Randomisieren der Einzelversuche hatte den großen Vorteil, dass äußere Einflüsse und Störgrößen auf alle Versuche gleichmäßig wirkten. Somit fanden alle Einzelversuche unter gleichen Voraussetzungen statt. Das sollte letztendlich die statistische Vergleichbarkeit erhöhen.

Das versuchsreihenweise Vorgehen hatte hingegen den Vorteil der Routine. Die durchführende Person arbeitete stets mit dem gleichen Löschmittel. Sie konnte ihre Löschtätigkeit in unbestimmter Weise an die Eigenschaften des Versuchs und des Löschmittels angepasst haben. Es wurden Anzeichen beobachtet, die ein solchen Lerneffekt nahelegen würden. Eine ausführliche Diskussion darüber findet sich im Kapitel 4.2.3.

Dieses Vorgehen steht den Überlegungen hinter dem Randomisieren diametral entgegen. Hier wird eine starke Beeinflussung von äußeren Faktoren, konkret des menschlichen Einflusses der durchführenden Person, ganz bewusst in Kauf genommen. Andere störende Einflüsse, wie veränderte Raumbedingungen, könnten dann jedoch die Ergebnisse einseitig beeinflussen.

4.2.2.2 Versuchsdurchführung

Die nachfolgenden Versuche sollten die Auswirkungen der Vorgehensweise, Randomisierung oder reihenweises Arbeiten, sichtbar machen. Dafür wurden Versuche mit

zwei verschiedenen Löschmittelzusätzen durchgeführt. Der erste war ein handelsübliches Klasse-A-Schaummittel, das zweite ein auf Biotensiden basierendes Lösch-, Reinigungs- und Restölbeseitigungsmittel. Die beiden Löschmittelzusätze wurden in der Konzentration von 0,3 Vol.-% verwendet. In diesen Konzentrationen spricht man von sogenannten Netzmittellösungen. Als Bezugsmittel wurden außerdem Löschversuche mit reinem Wasser durchgeführt. Für die Versuche wurden die drei Löschmittel (Klasse-A-Schaummittel, Biotensid und reines Wasser) in baugleiche Fingerdruckzerstäuber gefüllt.

Für die Randomisierungsversuche wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen je 24 Einzelexperimente durchgeführt. Dafür kam jedes Löschmittel achtmal pro Tag zur Anwendung. Die Abfolge der Einzelversuche wurde vorab mit einem Zufallsgenerator festgelegt. Eine einzige Ausnahme stellte der dritte Versuchstag dar, an dem zehn Einzelexperimente mit Biotensid durchgeführt wurde, um die erhöhte Zahl ungültiger Versuche auszugleichen.

Die Reihenversuche bestanden aus drei Versuchsreihen, eine für jedes Löschmittel. Zwischen ihnen lagen jeweils Abstände von ca. einer Woche. Dabei wurden für das Klasse-A-Schaummittel und das Biotensid je zehn und mit reinem Wasser als Löschmittel 22 Einzelversuche durchgeführt. Außerdem konnten hier die Versuche 1g-3 bis 1g-6 aus Kapitel 4.2.1.8 ebenfalls hinzugezogen werden, die als Reihenversuche gemacht wurden.

4.2.2.3 Ergebnisse

Die Versuche liefen in Hinblick auf ihr Verhalten erwartungsgemäß ab. Es zeigten sich in der Handhabung keine nennenswerten Unterschiede zu den Versuchen aus der Entwicklungsphase. Allerdings konnten in der Anwendung der Löschmittel neue Erfahrungen gemacht werden. Subjektiv ließen sich die Brandversuche mit Klasse-A-Schaummittel deutlich leichter löschen als mit Wasser und Biotensid-Lösung. Auch das in der Literatur oft beschriebene Phänomen der Nachverschäumung konnte gut beobachtet werden. Dabei wurde das Netzmittel, das in nicht verschäumten Zustand eingesetzt wurde, beim Auftreffen auf das brennende Material durch austretende Pyrolysegase verschäumt. Bemerkenswert war außerdem, dass bei Verwendung von Klasse-A-Schaummittel ein stärkeres Aufblähen der verkohlten Holzstäbe beobachtet wurde. Dies ließ Rückschlüsse auf ein besseres Eindringen der Lösung in das Holz zu, was wohl ein wichtiger Faktor zur Steigerung der Löschwirkung war.

Die Anzahl an ungültigen Versuchen war im Allgemeinen mit rund einem Viertel akzeptabel. Einzig die Versuchsreihe w-1 verzeichnete mit 8 von 22 ungültigen eine deutlich höhere Anzahl.

Randomisierungsversuche

Die Ergebnisse der Randomisierungsversuche sind in Abbildung 24 gezeigt. Augenscheinlich schwankten die Werte deutlich und unterschieden sich in ihren Mittelwerten. Vom statistischen Gesichtspunkt her gesehen, waren keine Abweichungen der Mittelwerte eines Löschmittels über die drei Versuchstage erkennbar.

Somit zeigten die Versuche, die mit Wasser durchgeführt wurden, auf diesem Signifikanzniveau über alle drei Tage den gleichen Mittelwert. Selbes galt für die Versuche mit Klasse-A-Schaummittel und mit Biotensid.

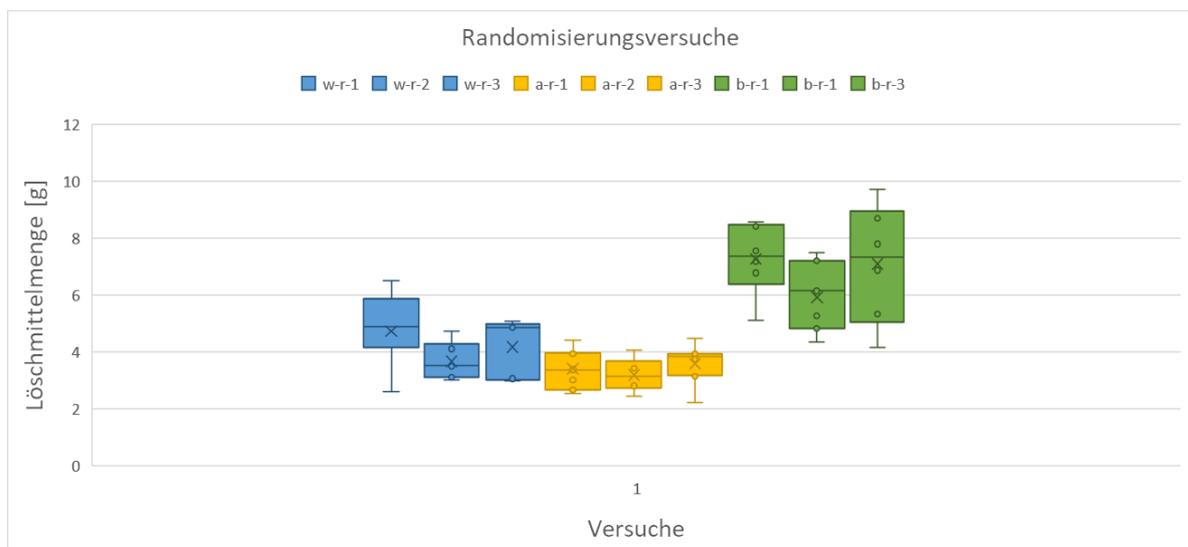


Abbildung 24: Ergebnisse der Randomisierungsversuche

Bei geringen Versuchsanzahlen, ergaben sich naturgemäß weite Konfidenzintervalle, weshalb die Versuche der einzelnen Tage wenig Aussagekraft besaßen. Sinnvoller erschien daher, die Versuche der Löschmittel aller drei Tage zusammenzufassen, was in Abbildung 25 veranschaulicht wurde. Tabelle 11 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse für die drei Löschmittel.

Durch die vergrößerte Anzahl der Versuche nahm die Breite der Konfidenzintervalle ab. Es zeigten sich nun signifikante Abweichungen der gebrauchten Löschmittelmenge bei den verschiedenen Löschmitteln. Die besten Ergebnisse konnten mit dem Klasse-A-Schaummittel erzielt werden. Dagegen zeigten die Versuche mit dem Biotensid sogar deutlich schlechtere Ergebnisse, als wenn nur Wasser verwendet wurde.

Tabelle 11: Zusammengefasste Ergebnisse der Randomisierungsversuche

Versuche	Löschmittel	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
		g	g	%
w-r-1 w-r-2 w-r-3	Wasser	4,2	0,5	12,8
a-r-1 a-r-2 a-r-3	0,3 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel	3,4	0,3	8,8
b-r-1 b-r-2 b-r-3	0,3 Vol.-% Biotensid	6,7	0,8	11,4

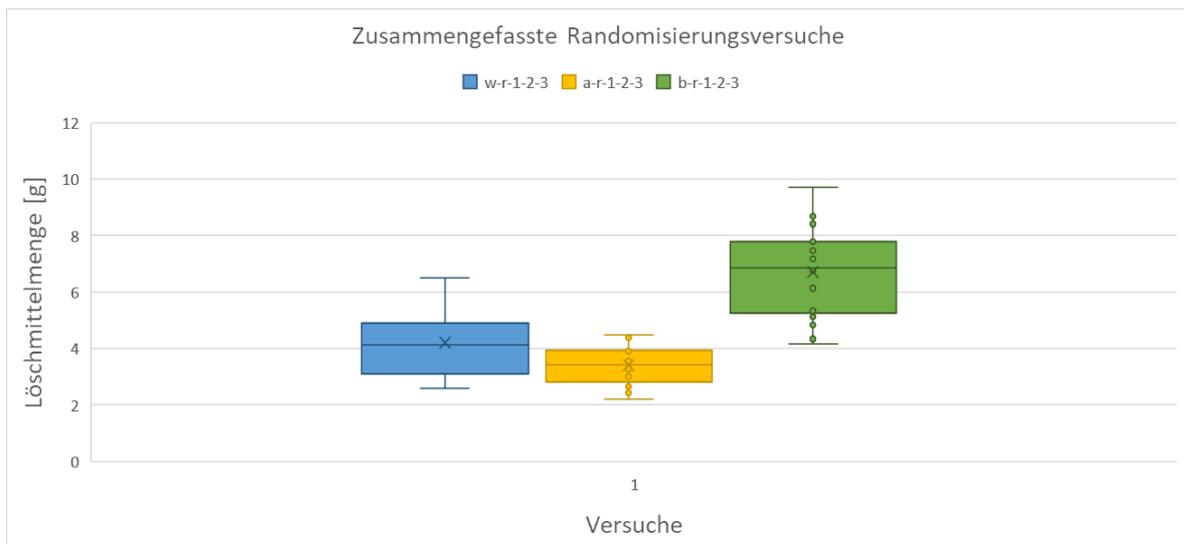


Abbildung 25: Zusammengefasste Ergebnisse der Randomisierungsversuche

Reihenversuche

Für die Reihenversuche wurden an jeweils zwei Tagen je zehn Einzelexperimente mit jeweils einem Löschmittel durchgeführt. Für das Referenzmedium Wasser konnten Ergebnisse der Versuche aus der Entwicklungsphase herangezogen werden. Es wurde jedoch zusätzlich eine Versuchsreihe aus 22 Einzelexperimenten mit Wasser durchgeführt, von der jedoch acht Versuche für ungültig erklärt werden mussten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 und in Abbildung 26 gezeigt.

In der Versuchsreihe, in der Wasser als Löschmittel verwendet wurde, erreichte man einen signifikant niedrigeren Mittelwert für die verbrauchte Löschmittelmenge, als in den Versuchsreihen aus der Entwicklungsphase. Dabei nahm die Streuung der Einzelversuchswerte deutlich zu. Mit der Klasse-A-Schaummittel-Lösung konnte ein signifikant besseres Ergebnis im Vergleich zu Wasser erzielt werden. Das Biotensid zeigte hingegen sogar einen schlechteren Mittelwert der Löschmittelmenge mit einer sehr geringen Streuung.

Tabelle 12: Zusammengefasste Ergebnisse der Reihenversuche

Versuche	Löschmittel	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
		g	g	%
w-1	Wasser	3,99	0,41	10,2
a-1	0,3 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel	3,05	0,70	22,8
b-1	0,3 Vol.-% Biotensid	5,36	0,25	4,7

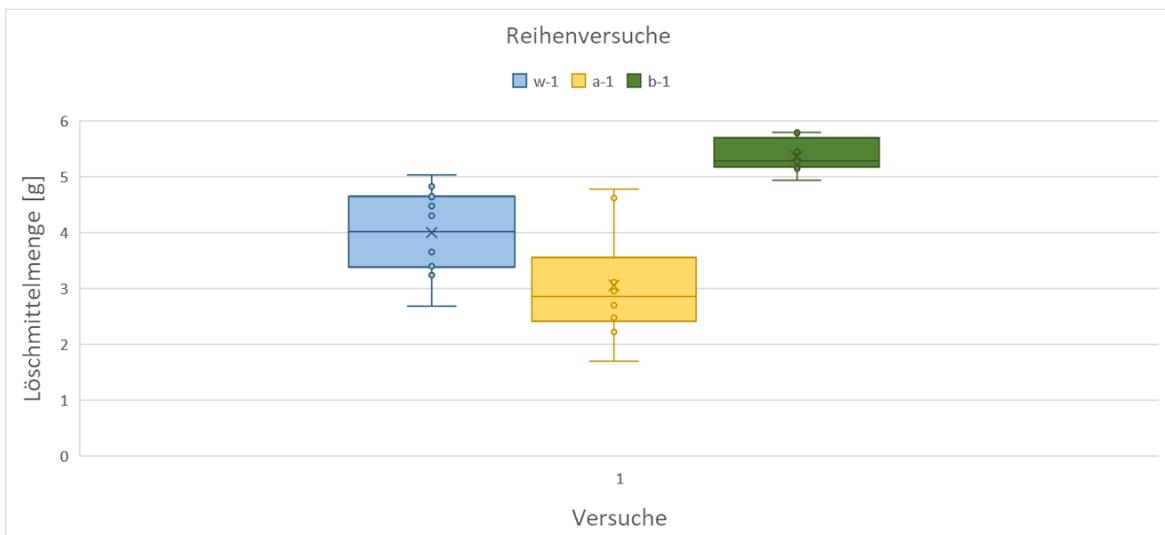


Abbildung 26: Ergebnisse der Reihenversuche

Gegenüberstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Randomisierungs- und der Reihenversuche gegenübergestellt.

Für das Löschmittel Wasser sind die Ergebnisse der Randomisierungsversuche (w-r-1, w-r-2, w-r-3) neben den der Versuchsentwicklung (1g-3, 1g-4, 1g-4, 1g-6) und der zusätzliche Reihenversuch w-1 in Abbildung 27 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Ergebnisse noch einmal in Abbildung 28 zu Blöcken zusammengefasst.

Durch die größere Streuung der Randomisierungsversuche, ließ sich eine Differenz der Mittelwerte zu den anderen zwei Blöcken auf signifikantem Niveau nicht feststellen. Die Blöcke der Versuchsreihe und der Versuche aus der Entwicklungsphase wiesen dagegen eine Differenz der Mittelwerte auf.

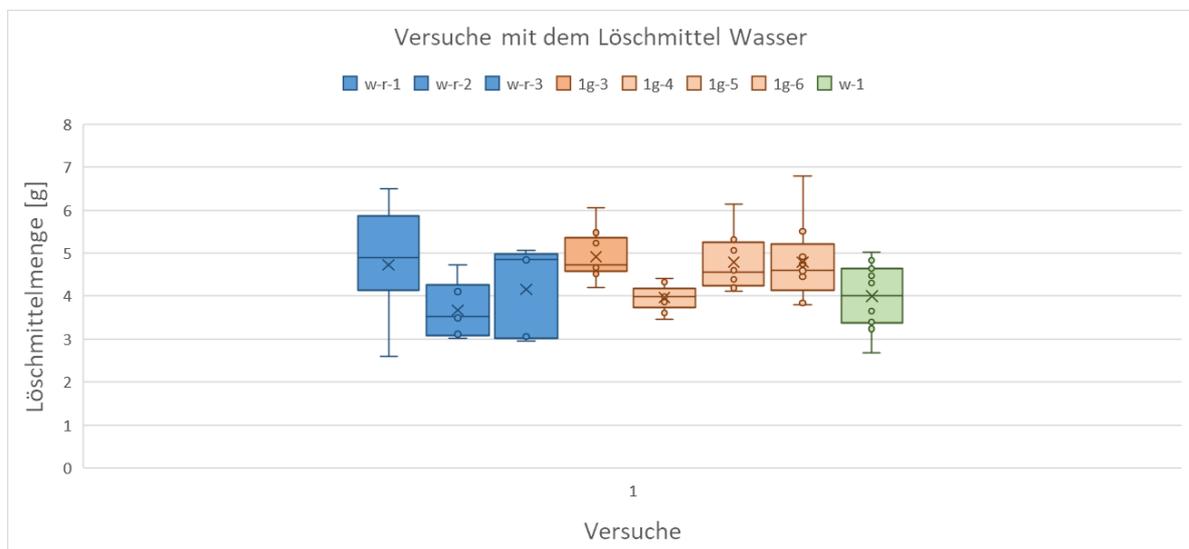


Abbildung 27: Versuche mit dem Löschmittel Wasser

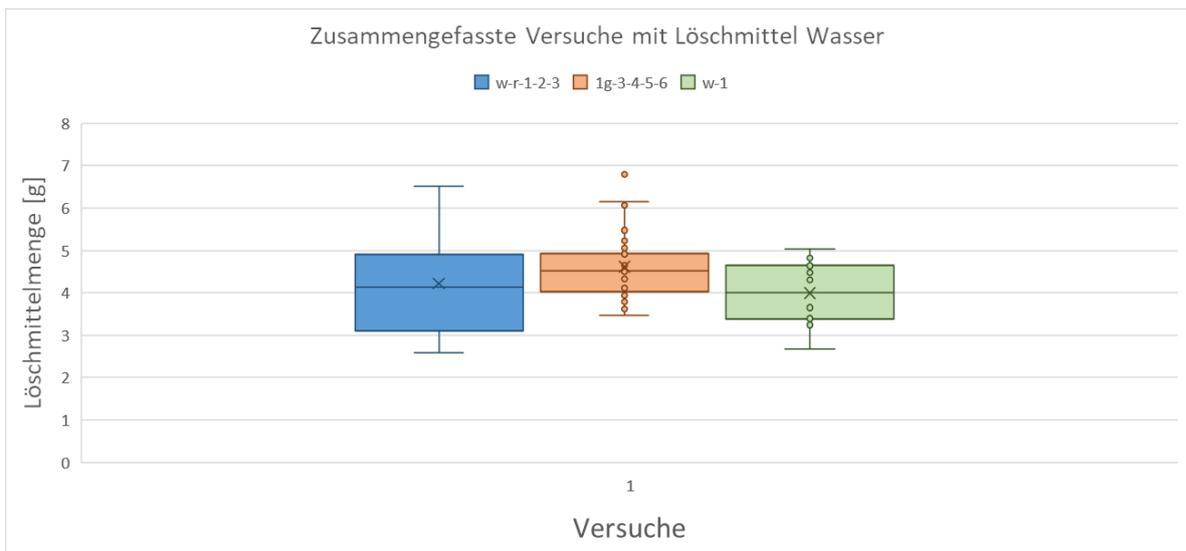


Abbildung 28: Zusammengefasste Ergebnisse mit dem Löschmittel Wasser

Die Ergebnisse der mit Klasse-A-Schaummittel durchgeführten Versuche sind in Abbildung 29 angeführt. Das Klasse-A-Schaummittel zeigte in den Randomisierungsversuchen und den Reihenversuchen sehr ähnliche Ergebnisse, die sich statisch nicht unterscheiden ließen.

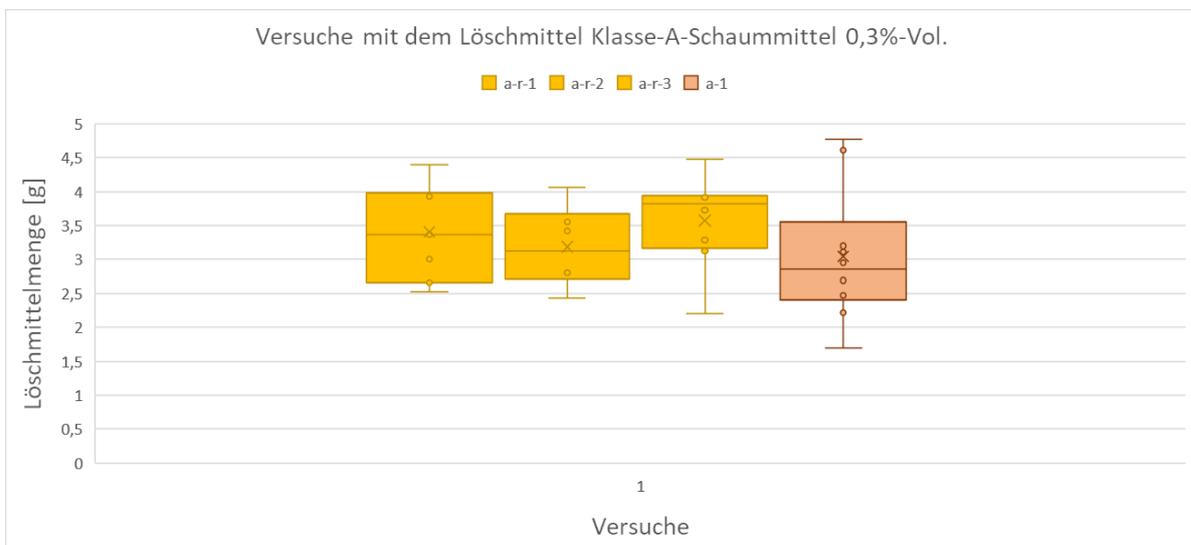


Abbildung 29: Versuche mit dem Löschmittel Klasse-A-Schaummittel 0,3 Vol.-%

Wesentlich anders verhielt sich hingegen das Biotensid-Löschmittel. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 dargestellt. Wie bereits erwähnt, zeigte es deutlich schlechtere Ergebnisse als das Referenzmedium Wasser. Interessanterweise wiesen die Randomisierungsversuche deutlich schlechtere Ergebnisse als die Reihenversuche auf. Die Reihenversuche zeigten nicht nur einen deutlich niedrigeren Löschmittelverbrauch, sondern auch eine wesentlich geringere Streuung.

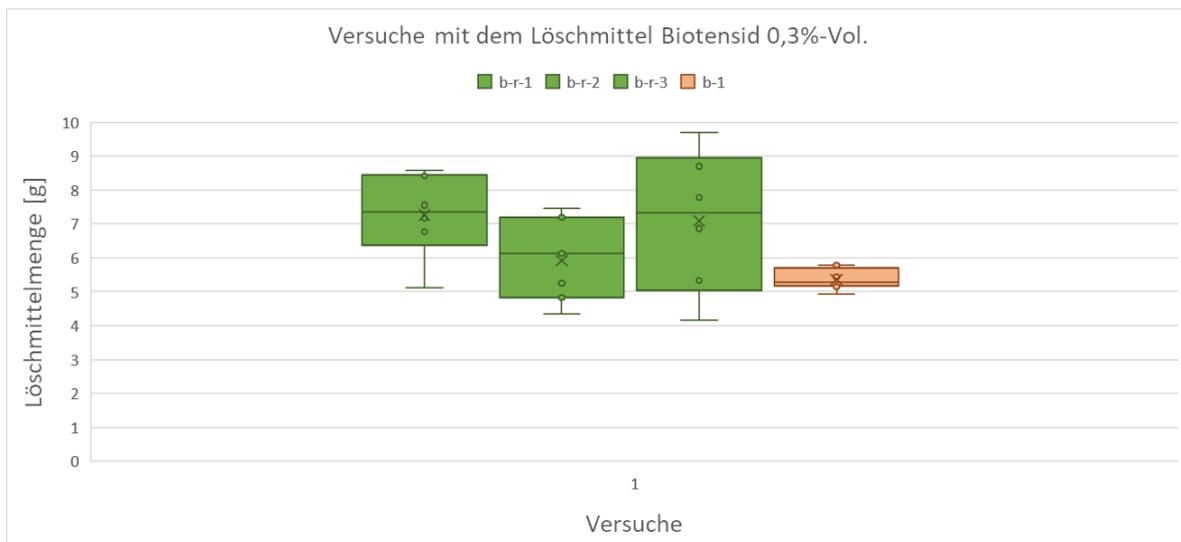


Abbildung 30: Versuche mit dem Löschmittel Biotensid 0,3 Vol.-%

4.2.3 Fazit

Bewertung der Versuche mit verschiedenen Aufbauten

In der Entwicklungsphase des Versuchsaufbaus I wurden einige verschiedene mögliche Konfigurationen getestet. Sie zeigten dabei sehr unterschiedliche Resultate. Einige der Versuchsaufbauten erwiesen sich aufgrund ihrer Eigenschaften schlicht als unbrauchbar. Dazu zählten die Aufbauten 1c, 1d, 1e, 1f, die schlecht oder ungleich anbrannten, sich schlecht löschen ließen oder aufgrund ihrer ungenügenden Stabilität für viele ungültige Versuche sorgten. Ein wichtiger Punkt schien hier die Zugänglichkeit oder auch Offenheit des Stapels zu sein. Sehr kompakt aufgestellte Stapel brannten schlechter an und ließen sich auch deutlich schlechter löschen. Es war ungleich schwieriger glühende Stellen zielgerichtet zu erreichen, was den Löscherfolg oft sehr vom Zufall abhängig machte.

Andere Versuchsaufbauten zeigten hier wesentlich bessere Eigenschaften, woraufhin eine genauere Betrachtung der gemessenen Ergebnisse stattfand. Die Versuchsaufbauten 1a und 1b zählten zu diesen. 1b wies jedoch mit 1,7 g einen niedrigen Mittelwert und mit +/- 22,3% eine sehr große Streuung auf. 1a zeigte etwas bessere Werte bei der Streuung, jedoch ebenfalls sehr geringe Mittelwerte. Lediglich Aufbau 1g zeigte überzeugende Eigenschaften: Mittelwerte um ca. 4 bis 5 g und Streuungen in der Größenordnung von 6 - 15%. Schließlich waren das die Gründe, warum dieser Aufbau für weiter Versuche herangezogen wurde.

Immer wieder wurden bei den Versuchen zwei Phänomene beobachtet. Erstens bestand offensichtlich eine Korrelation zwischen der Vorbrenndauer und der benötigten

Löschmittelmenge. Mit kürzer werdender Vorbrenndauer nahm auch die Löschmittelmenge ab. Deutlich sichtbar war dies bei den Aufbauten 1b, 1d und 1g. Erklärbar war dieser Zusammenhang mit dem Grad der Verkohlung. Je länger die Vorbrenndauer, desto weiter schritt der Brand fort und desto verkohlter war das Holz. Das Löschmittel musste somit tiefer in das Holz eindringen, um dort die Glut zu erreichen, was insgesamt mehr Löschmittelmenge benötigte.

Die zweite wichtige Beobachtung war eine über die Zeit abnehmende benötigte Löschmittelmenge, bei ansonsten konstant gehaltenen Versuchsbedingungen. Dieser Effekt trat nicht innerhalb einer Versuchsreihe auf, sondern zeigte sich erst anhand mehrerer Versuchstage. Ganz deutlich war dieses Verhalten anhand von Aufbau 1a zu beobachten, zu sehen in Abbildung 14, bei dem der erste Versuchsblock ein wesentlich schlechteres Ergebnis erzielte, als die nachfolgenden. Die ersten zwei Versuchsblöcke des Aufbaus 1b und 1d, die unter Verwendung gleicher Vorbrenndauer stattfanden und in Abbildung 16 und Abbildung 19 gezeigt sind, zeigten ein ähnliches, wenn nicht so extremes, Verhalten.

Eine mögliche Erklärung dieses Phänomens, wäre ein menschlicher Einfluss. Genauer gesagt, wurde ein Lerneffekt der durchführenden Person vermutet. Das hätte bedeutet, dass die Person erst durch wiederholtes Durchführen des Versuchs, eine Routine entwickelte und ihr Verhalten und Vorgehensweise beim Löschen an den Versuchsaufbau anpasste. Dadurch wurde sie im Löscheinsatz effizienter und konnte folglich die benötigte Löschmittelmenge und die Streuung reduzieren. Dieses Phänomen würde von der Person kaum wahrgenommen werden. Es würde auch nur bei mehreren hintereinander durchgeführten Versuchen auftreten.

Dadurch wäre einerseits die extreme Verbesserung in den Versuchen mit Aufbau 1a, aber auch der Aufbauten 1b und 1d erklärbar. Andererseits würde es auch erklären, warum der Effekt nicht in den Versuchen 1g-3, 1g-4, 1g-5 und 1g-6 zu sehen war. Bei diesen Versuchen könnte der Lerneffekt bereits in den Versuchen 1g-1 und 1g-2 mit anderen Vorbrenndauern eingesetzt haben. Das doch stark abweichende Resultat von 1g-4 war jedoch auch mit dieser Theorie nicht erklärbar.

Ergänzend muss angemerkt werden, dass es zu einer starken Überlagerung von einzelnen Einflüssen und Effekten kommen konnte, deren Abtrennung an dieser Stelle nicht möglich war.

Bewertung der Versuche mit Löschmittelzusätzen

Die Wirkung der einzelnen Löschmittel, Klasse-A-Schaummittel und Biotensid, beide in einer Konzentration von 0,3 Vol.-% eingesetzt, im Vergleich zu reinem Wasser, ließ sich

folgendermaßen bewerten: Das Klasse-A-Schaummittel zeigte gegenüber Wasser eine statistisch signifikante, jedoch nur leicht verbesserte Löschwirkung. Das Biotensid hingegen hatte in jedem Fall eine schlechtere Löschwirkung als reines Wasser. Da sich die Ergebnisse der Randomisierungsversuche so stark von jenen der Reihenversuche unterschieden, war eine Quantifizierung der Löschwirkung nicht sinnvoll möglich.

Auffallende Unterschiede gab es bei der Gegenüberstellung der Reihen- und der Randomisierungsversuche. Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen ließen sich wie folgt zusammenfassen:

Wurde Wasser als Löschmittel verwendet, unterschieden sich die Ergebnisse zwischen den randomisierten und den reihenweise durchgeführten Versuchen kaum. Es ließ sich für die meisten Fälle keine statistisch signifikante Abweichung der Löschmittelmenge feststellen. Auch die Streuung variierte kaum.

Klasse-A-Schaummittel zeigte als Löschmittel ein ganz ähnliches Verhalten. Die Art der Versuchsdurchführung machte keinen Unterschied in den Ergebnissen, weder bei den erzielten Mittelwerten der Löschmittelmenge, noch bei der Streuung der Versuche um diese.

Anders hingegen verhielt sich das Biotensid. Der Reihenversuch zeigte einen deutlich geringeren Mittelwert der Löschmittelmenge und eine geringere Streuung, als die randomisierten Versuche.

Erklärt werden konnte diese Diskrepanz wieder durch einen möglichen Lerneffekt. Die Person könnte sich nicht nur auf den Typ des Stapelaufbaus, sondern auch auf Eigenheiten des Löschmittels anpassen. Die Randomisierung hatte die Aufgabe solche Effekte zu verhindern oder zumindest auf alle Versuche gleichmäßig wirken zu lassen.

Diese Argumentation warf die Frage auf, warum ein solcher Lerneffekt im Fall des Biotensids so stark erkennbar war und bei den Löschmitteln Wasser und Klasse-A-Schaummittel nicht bzw. geringer als es statistisch nachweisbar wäre, ausfiel.

Dass ein solcher Lerneffekt nur bei den Biotensidversuchen so deutlich auftrat, konnte mit den schlechten Löscheigenschaften des Mittels zusammenhängen. Wie bereits erwähnt, stellte sich das Löschen unter Verwendung des Biotensids auch als subjektiv schwieriger heraus. Eventuell könnte sich dieses schlechte Verhalten fördernd auf den Lerneffekt ausgewirkt haben. Diese Frage konnte jedoch nicht abschließend beantwortet werden.

Abschließende Bewertung und Ausblick

Insgesamt konnten die in diesem Kapitel vorgestellten Versuche wichtige Erkenntnisse über die Eigenschaften, Handhabung und Auswertung von Brandversuchen bringen.

Das Kriterium, nachdem die Löschfähigkeit bis zum Ausgehen des letzten Glutpunktes fortgesetzt werden musste, erwies sich als problematisch. Manche Glutpunkte im Inneren brachten auf zufällige Weise große Schwierigkeiten mit sich. Bei vielen Versuchen wurde relativ viel Zeit und Löschmittel gebraucht, um solche Glutpunkte zu löschen. Das machte die Ergebnisse stärker vom Zufall abhängig. Diese Phase war dadurch besonders von der durchführenden Person abhängig. Die Versuche die folgenden Kapitel wurden daher mit dem anderen Löschkriterium durchgeführt, wonach nur bis zum Ausgehen der Flammen gelöscht wurde.

Die Anwendung einer Randomisierung erschien im Zuge dieser Versuche nicht zielführend. Es konnte dadurch keine Verbesserung der Werte erreicht werden. Stattdessen verbesserte sich das Ergebnis mancher Versuche deutlich bei einer reihenweisen Durchführung. Das war vor allem auf den beschriebenen Lerneffekt zurückzuführen. Es erschien sogar sinnvoll, sich in kommenden Versuchen diesen Lerneffekt zunutze zu machen, um möglichst wenig schwankende Ergebnisse mit kleinen Streuungen zu erhalten.

4.3 Versuchsaufbau II

Auf Grundlage der Erfahrungen der vorherigen Versuche, wurde nun ein neuer Versuchsaufbau erarbeitet. Das Vorgehen dazu wird in diesem Kapitel ausführlich behandelt, und die Ergebnisse schließlich präsentiert.

Die grundlegendste Änderung zu allen zuvor durchgeführten Versuchen, stellte die Anwendung eines anderen Löschkriteriums dar. Die folgenden Versuche sahen vor, den Löschvorgang schon beim Erlöschen der Flammen zu beenden. Dadurch sollte das Problem mit verbleibenden und schwierig zu löschenden Glutpunkten beseitigt werden.

Für die Änderung des Löschkriteriums musste die Brandlast stark erhöht werden. Im Gegensatz zu Versuchsaufbau I, welcher auf dem Grundaufbau der Vorversuche beruhte, musste hier ein neues Aufbaukonzept gefunden werden. Eine detaillierte Beschreibung findet sich anschließend im nächsten Kapitel. Darin werden auch verschiedene Aufbauten aus den bereits bewährten 10x10 mm Kiefernholzstäben erprobt und bewertet.

Anschließend wurden mit der vielversprechendsten Konfiguration weiterführende Versuche durchgeführt. Diese sollten im Wesentlichen Klarheit über mögliche menschliche Einflüsse bringen und die Eignung des Versuchs zur Quantifizierung der Löschwirkung von gewissen Löschmittelzusätzen bewerten. Erstmals wurde hier auch mit getrocknetem Holz experimentiert.

4.3.1 Versuche mit verschiedenen Aufbauten

Die starke Vergrößerung der Brandlast des Versuchsaufbaus machte einige Veränderungen zu den vorherigen Versuchen notwendig, während andere Faktoren hingegen beibehalten werden konnten.

Weiterhin wurden Kiefernholzstäbe im Profil von 10x10 mm verwendet. Die verschiedenen Aufbauten bestanden allesamt aus Stäben der Länge 170 und 50 mm. Das Holz wurde nicht speziell konditioniert, lediglich über mehrere Tage bei Laborbedingungen gelagert.

Statt der Metallschüssel der letzten Versuche, musste ein neues Gefäß angefertigt werden. Es handelte sich hierbei um eine Art Trog, der aus einem halbierten Stahlrohr der Länge 190 mm geschweißt wurde. Der Innendurchmesser des Rohrs betrug 54 mm. Quer über die Fläche hielten drei 14 mm breite Metallleisten, in einem Abstand von 37 mm

zueinander, den Holzstapel. Die zwei nachstehenden Abbildungen zeigen den Trog und seine Abmessungen.

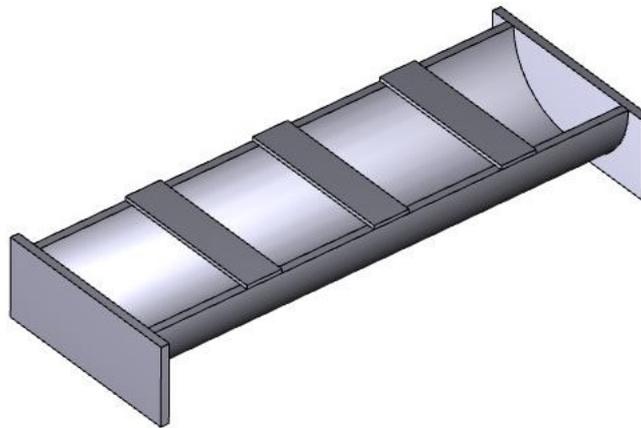


Abbildung 31: Metalltrog

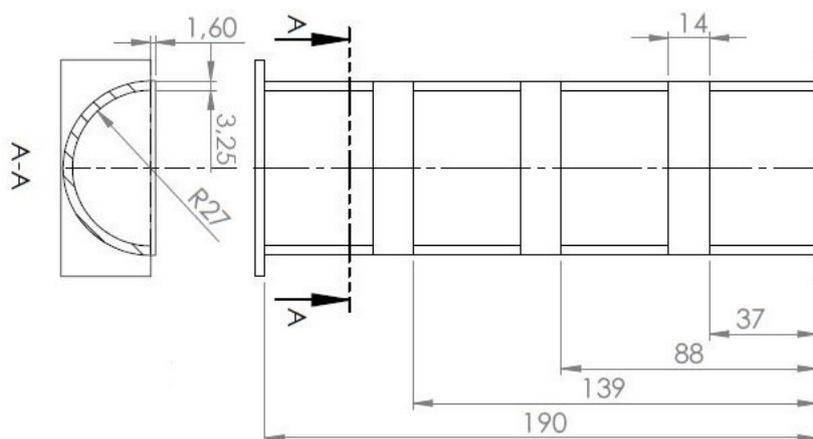


Abbildung 32: Zeichnung des Metalltrogs mit Abmessungen

Nach wie vor wurde reines Heptan zum Entzünden des Holzstapels verwendet. Schon in den ersten Versuchen zeigte sich eine Menge von 5 ml ausreichend. Sie blieb daraufhin über alle Versuche hinweg unverändert. Das Heptan brannte in der Regel zwischen 1:45 und 1:50 min lang.

Um externe Einflüsse gleichmäßiger auf den Brand wirken zu lassen, wurde auch weiterhin auf eine Rotation des Versuchsaufbaus über die ganze Vorbrenndauer gesetzt. Der Aufbau wurde innerhalb der Vorbrenndauer stets alle 20 s um 180° gedreht.

Gelöscht wurde stets mit einem Fingerdruckzerstäuber derselben Bauart, wie er in den vorherigen Versuchen verwendet wurde.

Das Löschkriterium wurde dahingehend abgeändert, dass der Löschprozess gestoppt wurde, sobald keine Flammen mehr auftraten. Der Ergebnisparameter war, wie in allen Versuchen bisher, der Löschmittelverbrauch, gemessen in Gramm. Dieser wurde durch Abwiegen des Fingerdruckzerstäubers vor und nach dem Löscheinsatz bestimmt. Daneben wurde die Zeit von Beginn des Versuchs bis zum Ende der Löschtätigkeit aufgezeichnet. Außerdem wurden subjektive Eindrücke festgehalten.

Die Vorbrenndauer, die genaue Handhabung des Löschprozederes und die Regeln für die Gültigkeit eines Versuchs waren Faktoren, die erst im Laufe der Versuchserarbeitung an die jeweilige Aufstellung angepasst wurden.

Insgesamt wurden vier verschiedene mögliche Aufbauten erprobt. Eine Übersicht ist in der nachstehenden Tabelle zu sehen. Die Vorbrenndauern wurden erst im Zuge der Versuchsentwicklung festgelegt.

Tabelle 13: Übersicht über die Konfigurationen

Konfiguration	durchschnittliche Holzmasse	Stückzahl der Stäbe	Vorbrenndauer
	g		
2a	116,1	9 Stk. 170x10x10 16 Stk. 50x10x10	3:00 2:45
2b	108,6	9 Stk. 170x10x10 16 Stk. 50x10x10	2:45
2c	86,7	6 Stk. 170x10x10 16 Stk. 50x10x10	2:30
2d	88,2 getrocknet: 87,0	6 Stk. 170x10x10 16 Stk. 50x10x10	2:45

Versuche dieser Größe erforderten angepasste Anweisungen über die Sorgfalt der Aufstellung, die Löschmethodik, sowie Regeln der Gültigkeit. Diese werden nachfolgend erklärt.

Danach werden die einzelnen Versuche näher beschrieben und die Resultate präsentiert.

4.3.1.1 Stapelaufstellung, Gültigkeit der Versuche und Löschmethode

Stapelaufstellung

Die deutliche Vergrößerung der Stapel machte es auch notwendig, sich genauer mit dem Aufbauen der Holzaufschichtung auseinanderzusetzen, um die Stabilität zu gewährleisten und gute Eigenschaften zu erzielen.

Es musste besonders beachtet werden, die Stapel möglichst gerade aufzubauen. Dazu wurde mit einer Wasserwaage gearbeitet. Bemerkte wurde, dass die im Handel erwerbenden Holzleisten natürlich nicht alle die exakt gleichen Maße besaßen. Das wurde beim Aufstellen der Stapel ebenfalls berücksichtigt und besonders dicke oder dünne Stäbe so positioniert, dass der Stapel möglichst gerade und stabil stand. Das galt sowohl für die 170 mm, als auch für die 50 mm langen Stäbe.

Auch wurde beobachtet, dass die Schale nie komplett eben aufgestellt werden konnte. Es sammelte sich ein unmerklicher Rest des brennenden Heptans stets auf einer Seite. Da dies jedoch für die Vollständigkeit und Gleichmäßigkeit des Brandes keine Rolle zu spielen schien, wurde diesem Detail keine weitere Beachtung geschenkt.

Während der Verbrennung konnte es vorkommen, dass sich die langen Holzstäbe entsprechend ihrer Maserung zu krümmen begannen. Kam es zur Krümmung nach oben und nicht etwa seitwärts, konnte der Stapel sehr instabil werden und sehr leicht auf eine Seite kippen. Ein solches Verhalten wurde bisher bei keinem der vorherigen Versuchsaufbauten beobachtet. Offensichtlich wurde der Effekt erst bei längeren Stäben bemerkbar. Es wurde darauf geachtet, die langen Hölzer stets mit der gemaserten Seite nach oben hinzulegen.

Regel bezüglich der Gültigkeit

Die in Kapitel 4.2.1.1 beschriebenen Vorgaben und Kriterien für die Gültigkeit behielten auch für die Versuche dieses Kapitels ihre Gültigkeit. Es wird daher auf sie verwiesen. Lediglich eine Regel musste hinzugefügt werden: Ab dem Zeitpunkt, an dem „Brand aus“ gegeben wurde, durfte es innerhalb der nächsten Minute zu keiner Rückzündung kommen. Kam es zu einer solchen, musste der Versuch als ungültig gewertet werden.

Löschmethode

Die Anforderungen an die Löschmethode wurde ebenfalls erweitert, um der deutlich vergrößerten Brandlast gerecht zu werden. Weiterhin wurde zum Löschen ein handelsüblicher Fingerdruckzerstäuber verwendet. Es handelte sich um dieselben aus den vorherigen Versuchen.

Wiederum gestaltete sich das Löschen durch schnelle und starke Sprühstöße, die aus einem Mindestabstand von rund 7 cm erfolgten. Um einen Stapel dieser Größe sinnvoll löschen zu können, musste sich die durchführende Person jedoch an eine speziellere Vorgehensweise halten.

Die Löschfähigkeit wurde an einem Ende des Stapels begonnen und der Länge nach bis zum anderen Ende weitergeführt. Der Winkel der Sprühstöße konnte dabei von der Person frei gewählt und gewechselt werden. Dabei wurde dem Brandschutzratgeber folgend, von vorne nach hinten und von unten nach oben gelöscht [20]. Erst wenn eine Stelle des Stapels sicher gelöscht war, konnte zur nächsten weitergegangen werden. Diese bestimmte Vorgehensweise war notwendig, da ein zu rasches Voranschreiten beim Löschen, die Gefahr barg, dass bereits gelöscht Gut wieder entflammte. Dadurch hätte der gesamte Löschprozess mehr Zeit und Löschmittel verbraucht. Die Abbildung 33 und Abbildung 34 verdeutlichen die beschriebene Vorgehensweise.



Abbildung 33: Anleitung aus dem Brandschutzratgeber [20]

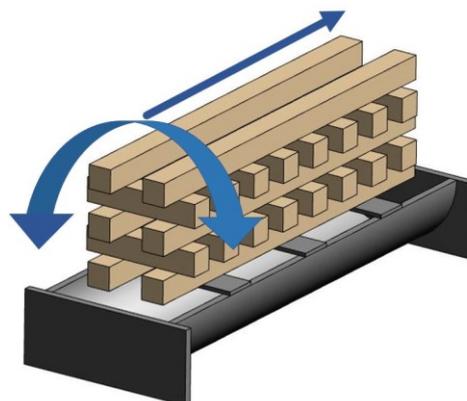


Abbildung 34: Richtige Vorgehensweise in der Löschphase des Experiments

4.3.1.2 2a

Für diese Formation wurden drei Lagen aus jeweils drei 170 mm langen Holzstäben, mit jeweils acht 50 mm langen Holzstücken dazwischen, aufgestapelt. Der Abstand der langen

Holzleisten zueinander war mit 5 mm festgelegt, der der kurzen mit jeweils 10 mm. Zu sehen ist die Aufstellung in Abbildung 35.

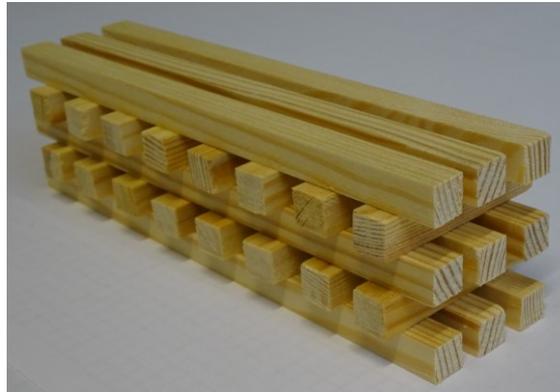


Abbildung 35: Aufbau 2a

Es wurden insgesamt sechs Einzelexperimente durchgeführt. Dabei zeigten sich schon bei den wenigen Versuchen große Schwierigkeiten.

Es konnte keine genaue Vorbrenndauer angegeben werden. Bis die Stapel mit starker Flammenausbildung und gleichmäßig in Brand standen, wurden unterschiedlich lange Vorbrenndauern benötigt. Sie lagen dabei zwischen 2:45 bis 3:00 min. Es war jedoch nicht möglich, sich auf eine bestimmte Zeit festzulegen. Dafür war das Verhalten der Stapel zu ungleichmäßig. Während manche längere Vorbrenndauern benötigten, um vollständig in Brand zu stehen, fielen andere in dieser Zeit schon in sich zusammen.

Ebenfalls war die benötigte Löschmittelmenge einer großen Schwankung unterworfen. In den wenigen durchgeführten Versuchen wurden Werte von 8 g bis zu annähernd 21 g gemessen.

Unmittelbar in Zusammenhang stand dies mit sehr unterschiedlich langen Löschzeiten. Die Zeit von Beginn der Löschtätigkeit bis zum „Brand aus“, reichte dabei von 23 s bis 68 s.

Ein wichtiger Punkt stellte auch die Stabilität des Stapels dar. Lange Löschzeiten hatten zur Folge, dass manche Stapel in dieser Zeit noch instabiler wurden und sogar zusammenbrachen.

Zuletzt wurde auch ein Wiederentzünden des bereits gelöschten Holzstapels beobachtet. Die Rückzündung fand etwa bei 40 s statt, was den Versuch trotz vorläufigen Löscherfolgs ungültig werden ließ.

Insgesamt zeigte dieser Aufbau jedoch kein zufriedenstellendes Verhalten, woraufhin auch keine weiteren Versuche durchgeführt wurden. Die Probleme waren dabei vielfältig. Die Werte für die Löschmittelmenge streute sehr stark. Es konnte keine eindeutig passende

Vorbrenndauer gefunden werden und es zeigten sich Probleme mit der Stabilität und möglichen Rückzündungen.

4.3.1.3 2b

Wie im Aufbau 2a wurden auch hier drei Lagen aus jeweils drei 170 mm langen Holzstäben, mit jeweils acht 50 mm langen Holzstücken dazwischen aufgestapelt. Allerdings betrug hier der Abstand zwischen den langen Stäben 10 mm. Die genaue Aufstellung ist in Abbildung 36 gezeigt.

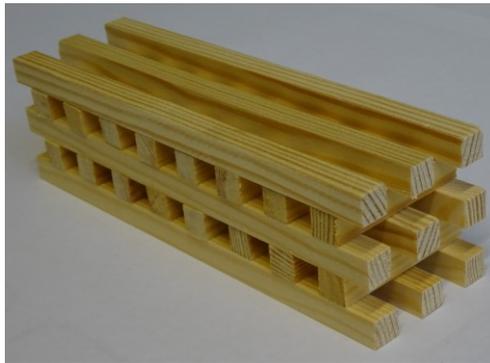


Abbildung 36: Aufbau 2b

Insgesamt wurden mit diesem Aufbau zehn Versuche durchgeführt. Anders als beim Aufbau 2a konnte hier mit 2:45 min eine passende Vorbrenndauer definiert werden. Hinsichtlich des Löschverhaltens wurden sehr ähnliche Beobachtungen wie im vorherigen Aufbau gemacht. Es konnten keine Probleme mit der Stabilität festgestellt werden.

Die Resultate für den Löschmittelverbrauch streuten sehr stark von ca. 9 bis 27 g.

Fünf der zehn Versuchen mussten für ungültig erklärt werden, da es innerhalb einer Minute nach Beendigung der Löscharbeiten zu einer Wiederentzündung des Stapels kam.

Letztendlich, musste dieser Aufbau aufgrund der sehr starken Streuung der Ergebnisse und der vielen ungültigen Versuche, die durch die Wiederentzündung entstanden, als ungeeignet für weiterführende Experimente bewertet werden.

4.3.1.4 2c

In dieser Formation wurden drei Lagen zu je zwei 170 mm langen Stäben, mit zwei Lagen zu je acht 50 mm langen Stäben aufgebaut. Der Abstand zwischen den langen Stäben betrug dabei 30 mm, der zwischen den kurzen 10 mm. Die Aufstellung ist in Abbildung 37 zu sehen.

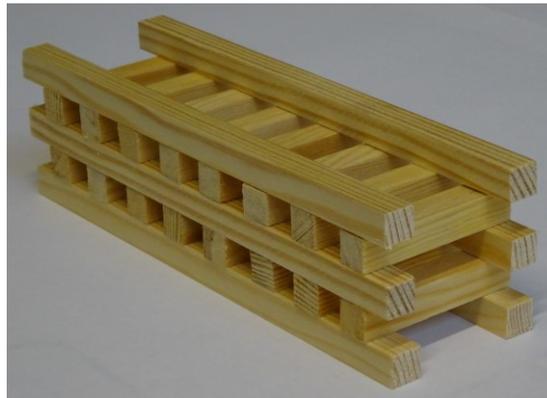


Abbildung 37: Aufbau 2c

Es wurden nur zwei Versuche mit diesem Aufbau durchgeführt. Dabei erwies sich eine Vorbrenndauer von 2:30 min als optimal. Obwohl der Stapel sehr gute Eigenschaften hinsichtlich der Stabilität, des Brand- und des Löschverhaltens zeigte, wurden Versuche mit dieser Konfiguration nicht weiterverfolgt. Der Grund dafür war die geringe Löschmittelmenge. Mit 5,3 und 7,5 g lag sie unter den Erwartungen, der Stapel war de facto zu einfach zu löschen.

4.3.1.5 2d

Ähnlich wie der Aufbau 2c wurden hier sechs Stäbe der Länge 170 mm in drei Lagen mit je acht kurzen, 50 mm langen Hölzern aufgestellt. Der einzige Unterschied war der Abstand der langen Stäbe zueinander, der auf 15 mm reduziert wurde. Abbildung 38 zeigt die Aufstellung.

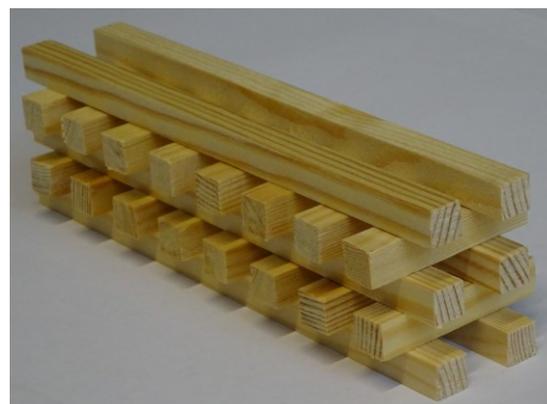


Abbildung 38: Aufbau 2d

Es wurden mit diesem Aufbau zehn Versuche durchgeführt, wovon zwei ungültig waren. Eine Vorbrenndauer von 2:15 min zeigte sich als optimal. Probleme mit der Stabilität des Stapels traten zu keinem Zeitpunkt auf. Auch das Verhalten des Stapels in der Vorbrennzeit,

als auch in der Löschphase, überzeugte durch gute Eigenschaften. Der Löschmittelbedarf lag im Durchschnitt bei ca. 12 g, was die ursprünglichen Erwartungen erfüllte. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind als W-0 in Tabelle 14 zu sehen.

Somit schien dieser Aufbau von allen vier Konfigurationen, am besten für weiterführende Versuche geeignet.

4.3.2 Weiterführende Versuche

Die Versuche des vorherigen Kapitels zeigten, dass Aufbau 2d am besten für weiterführende Tests geeignet war. In diesem Kapitel soll geklärt werden, ob der Aufbau auch bei weiterer Wiederholung reproduzierbare Ergebnisse liefern kann. Auch soll untersucht werden, inwieweit sich die Löschwirkung von Klasse-A-Schaummittel im Vergleich zu Wasser quantitativ auf den Löschmittelbedarf auswirkt.

Eine wichtige Einflussgröße wurde bisher noch nicht berücksichtigt: die Feuchtigkeit des Holzes. Um den Einfluss dieser beurteilen zu können, wurden Versuche mit nicht konditioniertem und mit getrocknetem Holz durchgeführt.

In diesem Kapitel werden die Versuche mit nicht konditioniertem Holz unter Verwendung von Klasse-A-Schaummittel und Wasser gezeigt.

Wie in Kapitel 4.2 bereits erörtert, zeigte das Vorgehen der Randomisierung keine wesentliche Verbesserung der Versuchsergebnisse. Daher fand sie in diesem Teil der Arbeit keine Anwendung. Es wurden stattdessen Versuchsreihen zeitnahe mit ein und derselben Konfiguration durchgeführt. Erst danach kam es zu einer Variation der Parameter.

4.3.2.1 Versuche mit nicht konditioniertem Holz

Um das Verhalten des Aufbaus 2d auch unter Einsatz von Löschmittelzusätzen beurteilen zu können, wurde eine Versuchsreihe zu zehn Einzelexperimenten mit einer 1 Vol.-% Klasse-A-Schaummittel-Lösung durchgeführt. Es handelte sich damit um eine sogenannte Netzmittellösung. Eine Versuchsreihe mit Wasser als Löschmittel wurde nicht gemacht. Hierfür konnten die Ergebnisse aus der Versuchsentwicklung, Kapitel 4.3.1.5, herangezogen werden.

Selbstverständlich wurde dazu wieder ein baugleicher Fingerdruckzerstäuber verwendet. Das Holz wurde wie in allen bisherigen Versuchen nicht konditioniert, sondern lediglich über mehrere Tage bei Laborbedingungen gelagert.

Die erzielten Ergebnisse zeigten eine deutlich bessere Löschwirkung des Klasse-A-Schaummittels im Vergleich zu reinem Wasser. Während mit Wasser im Durchschnitt an die 11,9 g benötigt wurden, um den Brand zu löschen, waren es mit dem Löschmittelzusatz lediglich 5,5 g.

Tabelle 14: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 2d mit nicht konditioniertem Holz und verschiedenen Löschmitteln

Versuch	Löschmittel	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
		g	g	%
W-0	Wasser	11,938	1,399	11,7
A-0	1 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel	5,468	0,258	4,7

Allerdings wurde die Versuchsreihe A-0 des Klasse-A-Schaummittels bereits nach sechs Versuchen abgebrochen, da drei von ihnen als ungültig gewertet werden mussten. Der Grund dafür war ein deutlich schlechteres und ungleichmäßigeres Brennverhalten in der Vorbrenndauer als bei den Versuchen aus Kapitel 4.3.1.5. Es konnte sich innerhalb der Vorbrenndauer kein vollständiger und gleichmäßiger Brand ausbilden.

Schließlich waren diese unerwarteten Ausfälle der Grund, den Einfluss des Material näher zu betrachten.

4.3.2.2 Versuche mit konditioniertem Holz

In diesem Kapitel soll der Einfluss des Brennmaterials auf das Experiment bewertet werden. Dazu wurde das Holz vollständig getrocknet. Dies stellte die einfachste Art einer Konditionierung dar. Um den Einfluss des Wassergehalts beurteilen zu können, mussten in einem dritten Schritt Versuche mit konditioniertem Holz durchgeführt werden, die mit den Ergebnissen der vorherigen Versuche unter sonst gleichbleibenden Bedingungen verglichen werden konnten.

Eine vollständige Arbeitsanweisung zur Verwendung des Aufbaus II (2d) findet sich im Anhang.

Trocknungsversuche

Als Konditionierung wurde eine vollständige Trocknung gewählt. Diese wurde in einem handelsüblichen Trockenschrank bei 105°C über eine Zeit von mindestens 24 h durchgeführt.

Aus der Massendifferenz vor und nach der Trocknung konnte der Wassergehalt, des Holzes berechnet werden. Dieser ist in Formel (5-1) definiert:

$$w = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Wasser}} + m_{\text{Trockensubstanz}}} \quad (5-1)$$

Für die Trocknung wurden Holzleisten, mit denen auch alle vorangegangenen Versuche durchgeführt wurden, mit einer Gesamtmasse von 2374,5 g eingewogen. Durch die Trocknung verringerte sich die Masse des Holzes auf 2226,1 g. Das Holz hatte demzufolge einen Wassergehalt von 6,3 Gew.-%.

Ein direkter Vergleich zu dem Holz, das in den früheren Versuchen verwendet wurde, konnte nicht angestellt werden. Es gab zum einen kein Holz mehr von diesen Versuchen. Zum anderen hätten veränderte Umgebungsbedingungen eventuell die Aussagekraft der Ergebnisse verfälschen können.

Es wurde auch untersucht, wie viel Wasser das getrocknete Holz über die Zeit einer typischen Versuchsreihe aus der Atmosphäre bei Laborbedingungen aufnahm. Dazu wurde das vollständig getrocknete Holz bei Laborbedingungen acht Stunden offen liegen gelassen, wieder eingewogen und anschließend wieder vollständig getrocknet. Es zeigte sich dabei, dass das Holz über diese Zeitspanne einen Wasseranteil von 1,5 Gew.-% annahm. In einem zweiten Versuch dieser Art zeigte sich eine Wasseraufnahme auf 2,3 Gew.-%.

Versuche und Ergebnisse

Es folgten nun Versuche, wie im Kapitel 4.3.1.5 beschrieben, mit der einzigen Änderung, dass vollständig getrocknetes Holz verwendet wurde. Natürlich wurde das Holz zuvor auf Raumtemperatur ausgekühlt. Die geringe Wasseraufnahme über die Zeit der Versuchsdurchführung wurde dabei in Kauf genommen.

Erste Experimente mit diesem Material zeigte, dass die für den Aufbau 2d definierte Vorbrenndauer nun zu lange war. Das getrocknete Holz begann wesentlich schneller zu brennen. Eine Vorbrenndauer von 2:00 min genügte nun. Das gute Verhalten des Versuchsaufbaus 2d zeigte sich auch hier.

Es wurden fünf Versuchsreihen zu je zehn Einzelerperimenten durchgeführt. Bei den ersten vier wurde Wasser als Löschmittel, bei der fünften eine Klasse-A-Schaummittellösung mit einer Konzentration von 1 Vol.-% verwendet. Zeitlich lagen die einzelnen Versuchsreihen jeweils etwa eine Woche auseinander. Es kam nur zu einer sehr geringen Zahl von ungünstigen Versuchen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 und in Abbildung 39 in Form von Box-Plots dargestellt. Zur Gegenüberstellung sind ebenfalls die Ergebnisse der Versuche mit nicht konditioniertem Holz, W-0 und A-0, eingetragen.

Tabelle 15: Ergebnisse der Versuche an Aufbau 2d

Versuch	Löschmittel	getrocknetes Holz	Mittelwert	Konfidenzintervall	Konfidenzintervall
			g	g	%
W-0		nein	11,938	1,399	11,7
A-0	1 Vol.-% Klasse-A-Schaummittel	nein	5,468	0,258	4,7
A-1	1 Vol.-% Klasse-A-Schaummittel	ja	7,195	0,714	9,9
W-1		ja	17,786	1,409	7,9
W-2		ja	13,115	1,615	12,3
W-3		ja	9,897	1,177	11,9
W-4		ja	11,725	1,221	10,4

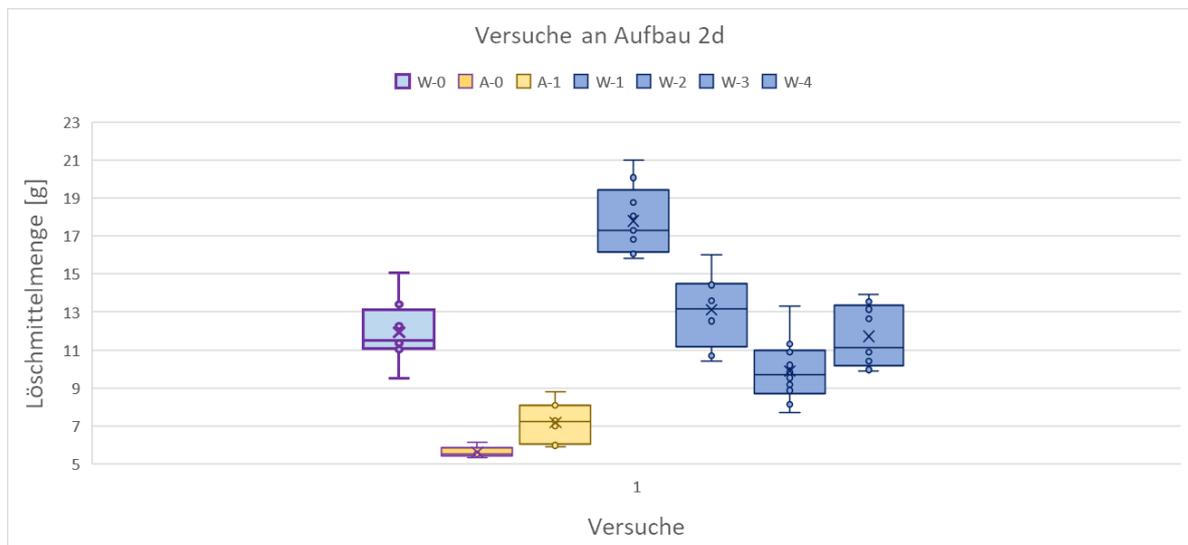


Abbildung 39: Übersicht Ergebnisse

Deutlich ersichtlich war, dass die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen zum Teil sehr stark voneinander abwichen. Besonders auffällig war die starke Abnahme der Löschmittelmenge über die ersten drei Versuchsreihen, in denen Wasser verwendet wurde. Alle diese Versuchsreihen wiesen ähnlich große Streuungen auf, ihre Mittelwerte unterschieden sich jedoch signifikant. So kam es zwischen der Versuchsreihe W-1 und W-2 zu einer Abnahme des Löschmittelverbrauchs um 26,3%. Zwischen W-2 und W-3 nahm diese weiter um 24,5% ab. Das bedeutete eine Abnahme von 44,4% zwischen W-1 und W-3. Die vierte mit Wasser durchgeführte Versuchsreihe, W-4, glich sich dem Ergebnis von W-2 an. Tatsächlich ließ sich auf einem Signifikanzniveau von 95% kein Unterschied der Mittelwerte von W-2, W-4 und der Versuchsreihe mit nicht konditioniertem Holz, W-0, feststellen.

Die Versuchsreihe A-1, in der als Löschmittel die Klasse-A-Schaummittellösung verwendet wurde, zeigte einen stark verringerten Verbrauch an Löschmittel, im Vergleich zu allen mit Wasser gelöschten Versuchen. Das Ergebnis glich jenem der Reihe A-0, die mit nicht konditioniertem Holz durchgeführt wurde. Die Ergebnisse aus A-0 waren jedoch nur wenig aussagekräftig, da sie nur aus drei gültigen Einzelexperimenten bestand.

Üblicherweise konnten die Brandversuche bei Verwendung von Wasser innerhalb von einer Minute gelöscht werden. Diese Werte korrelierten stark mit der benötigten Löschmittelmenge. In der Versuchsreihe W-3 reichte oftmals eine halbe Minute aus. Unter Verwendung der Klasse-A-Schaummittellösung, Versuchsreihe A-1, verringerte sich der

Wert weiter auf 19 bis 26 Sekunden. Lange Löschzeiten waren für den Probanden sehr anstrengend, wobei besonders der Finger beim Betätigen des Zerstäubers ermüdete.

4.3.3 Fazit

Bewertung der vergrößerten Brandlast und des Löschkriteriums

Diese Aufbauten verhielten sich aufgrund der großen verwendeten Brandlasten gänzlich anderes beim Löschen, als die vorherigen Versuche. Das in diesem Versuch erstmals eingesetzte Löschkriterium, wonach nur bis zum Erlöschen der Flammen, nicht jedoch der Glut, gelöscht wurde, konnte positiv beurteilt werden. Der Zeitpunkt für das Beenden der Löschfähigkeit war für die durchführende Person sehr leicht zu erkennen, da nicht nach verbleibenden Glutpunkten gesucht werden musste. Das ergab außerdem zum ersten Mal die Möglichkeit, die Dauer des Löschvorgangs sinnvoll zu messen.

Ein kritischer Punkt war die Tatsache, dass das Löschen einer so großen Brandlast zu einer schnellen Ermüdung der testenden Person führte. Es war zu befürchten, dass sich dies in einer ganzen Versuchsreihe negativ auf die Ergebnisse auswirken könnte. Mit zunehmender Ermüdung wäre es innerhalb einer Reihe zu einem steigenden Löschmittelverbrauch oder längeren Löschzeiten gekommen. Das konnte durch die durchführende Person in diesen Versuchen nicht bestätigt werden. Für andere Probanden müsste es prinzipiell in Betracht gezogen werden.

Ein bisher nicht beobachtetes Phänomen waren die Rückzündungen. Offensichtlich war es gelegentlich möglich, dass nachdem die Flammen erloschen waren, eine sehr starke Hitze im inneren des Stapels verblieb, die den Stapel nach kurzer Zeit wiederentzündete. In den betroffenen Versuchen geschah das immer innerhalb der ersten Minute nach Beendigung der Löschfähigkeit und machte die Versuche damit ungültig.

Neu war ebenfalls, dass auf die Schwankungen in der Dicke der Hölzer und auf deren Maserung geachtet werden musste, um die Stabilität des Stapels zu gewährleisten.

Schließlich mussten auch die Kriterien für die Gültigkeit eines Versuchs und die Anweisungen zur Durchführung der Löschfähigkeit spezifiziert werden.

Bewertung der Versuche mit verschiedenen Aufbauten

Von den vier erprobten Aufstellungen zeigte nur eine, nämlich 2d, günstige Eigenschaften, die ihn für weitere Versuche qualifizierten. Alle anderen hatten große Schwierigkeiten mit der Stabilität, der Wiederentzündung oder zu großen Schwankungen in der benötigten

Löschmittelmenge. Einer der Aufbauten wurde auch abgelehnt, weil er zu schnell gelöscht werden konnte.

Bewertung des Einflusses des Wassergehalts

Der Grund dem Einfluss des Wassergehalts im Holz nachzugehen, waren die in Kapitel 4.3.2.1 unerwartet auftretenden Probleme und die daraus resultierenden ungültigen Versuche. Für den wahrscheinlichsten Grund für die Serie an Ausfällen, wurde ein nicht gleichbleibender Wassergehalt des Holzes vermutet. Die Versuche dieser Reihe wurden mit einer anderen Charge Kiefernholz durchgeführt, das wesentlich kürzer den im Labor herrschenden Bedingungen ausgesetzt war. Darüber hinaus, erschien es naheliegend, dass die Qualität des Holzes einen unmittelbaren Einfluss auf das Abbrennverhalten des Stapels ausübte. Weitere Versuche mussten den Einfluss des Wassergehalts näher beleuchten.

Andere störende Einflüsse konnten trotzdem nicht ganz ausgeschlossen werden, da viele Parameter nicht explizit gemessen wurden. Dazu zählte beispielsweise die Luftfeuchtigkeit während der Versuchsdurchführung.

Um den Einfluss dieser Konditionierung besser beurteilen zu können, wurden Versuche mit getrocknetem Holz durchgeführt. Alle anderen Versuchsparameter, mit Ausnahme einer um 15 s verkürzten Vorbrenndauer, blieben dabei gleich.

Tatsächlich zeigten sich in den gemessenen Werten keine statistisch signifikanten Unterschiede. Allerdings verbesserten sich die Eigenschaften des Aufbaus in der Vorbrenndauer und der Löschphase deutlich. Die Versuche brannten noch gleichmäßiger und zuverlässiger an. Die Zahl an ungültigen Versuche nahm mit dem Einsatz von getrocknetem Holz stark ab.

Bewertung der Ergebnisse

Die Auswertung der einzelnen mit Wasser durchgeführten Versuchsreihen zeigte, dass trotz möglichst unveränderten Rahmenbedingungen kein einheitliches Ergebnis erzielt werden konnte. Beachtenswert war dabei besonders die annähernd gleichbleibende Streuung der einzelnen Versuchsreihen. Es ließ sich dadurch vielmehr auf einen systematischen, als einen zufälligen Fehler schließen.

Weiters sollen die Ergebnisse der mit Klasse-A-Löschmittel durchgeführten Versuche bewertet werden. Der bereits beschriebene, stark reduzierte Löschmittelverbrauch durch Verwendung der Löschmittellösung im Vergleich zu reinem Wasser, war ein starkes Indiz für die hohe Löschwirkung des Zusatzmittels. An dieser Stelle konnte die Löschwirkung jedoch nur qualitativ, nicht quantitativ beurteilt werden. Hierfür wäre ein geeigneter Referenzwert

eines anderen Löschmittels, im einfachsten Fall Wasser, nötig gewesen. Einen solchen konnten die inkohärenten Werte der Wasserversuche nicht bieten.

Menschlicher Einfluss und Lerneffekt

Zum Schluss soll noch das Phänomen, der mit den Versuchsreihen abnehmenden Löschmittelmenge, noch einmal diskutiert werden. Schon im Kapitel 4.2.3 wurden ein solches Verhalten beobachtet und diskutiert, woran hier nun angeknüpft werden soll.

Für die wahrscheinlichste Einflussgröße wurde hier wieder die durchführende Person selbst gesehen. Wie bereits zuvor argumentiert, könnte der abnehmende Verlauf der Löschmenge auf eine besser werdende Löschmethodik, also auf einen Lerneffekt der Person hinweisen. Allerdings wäre es auch denkbar, dass sich der menschliche Einfluss nicht direkt in einem sichtbaren Lernverhalten zeigt, sondern anderen Regeln, die noch nicht verstanden wurden, gehorcht oder gar zufällig passiert.

Der menschliche Einfluss war in jedem Fall sehr schwer festzuhalten. Zwar ließ die Betrachtung der Ergebnisse die Existenz eines solchen Lerneffekt plausibel erscheinen, doch sprachen auch Indizien dagegen.

Erstens, lagen zwischen den einzelnen Versuchsreihen jeweils ca. eine Woche. Wie sich eine solche lange Zeit auf einen etwaigen Lerneffekt ausübte, konnte an dieser Stelle nicht seriös beantwortet werden.

Zweitens, war schwer zu argumentieren, warum sich der besagte Lerneffekt zwischen W-1 und W-2, bzw. W-3 so stark bemerkbar machte. Schließlich war W-1 keinesfalls die erste Versuchsreihe, die an diesem Aufbau durchgeführt wurde. Zuvor fanden schon zwei mit nicht getrocknetem und eine mit getrocknetem Holz statt. W-1 stellte lediglich die erste Reihe an getrocknetem Holz unter Einsatz von reinem Wasser dar. Die agierende Person war zu diesem Zeitpunkt bereits in gewissem Maße an den Versuchsaufbau, den Brennstoff und das Löschmittel gewöhnt.

Drittens, war nicht ersichtlich, warum die Löschmittelmenge von W-1 über W-2 bis zu W-3 kontinuierlich abnahm, bei der Reihe W-4 jedoch wieder das Niveau von W-2 erreicht wurde. Natürlich könnte es sich bei W-3 um einen Ausreißer nach unten, also ein einmalig geringes Einzelereignis gehandelt haben. Genauso wäre es möglich, dass es sich bei W-4 selbst um einen Ausreißer nach oben handelte, also ein einmalig schlechteres Ergebnis. Das konnte selbstverständlich auch nicht bei Reihe W-1 ausgeschlossen werden.

Da die einzelnen Versuchsreihen aus jeweils zehn Einzelerperimenten bestanden und sehr ähnlich große Streuungen aufwiesen, handelte es sich wahrscheinlich um einen systematischen Fehler. Dabei sprachen einige Indizien auch gegen einen menschlichen

Lerneffekt. Sollte ein solcher nicht existiert haben, wäre die Frage der Veränderung der Messwerte um nichts leichter zu beantworten. Demnach mussten andere Einflüsse auf die Versuche gewirkt haben, die nicht gemessen oder beobachtet wurden. Diese Frage konnte nicht abschließend beantwortet werden.

Abschließende Bewertung und Ausblick

Schlussendlich konnte auch mit diesem Versuchsaufbau kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. An diesem Punkt der Entwicklung war die Versuchsmethodik nicht geeignet, die Löschwirkung von Löschmittelzusätzen quantitativ zu bewerten.

Es wurden alle zuvor erörterten Einflussfaktoren auf verschiedene Art präzisiert und definiert. Trotzdem scheiterte der Versuche daran, konstante Ergebnisse zu erzielen, die jedoch für eine quantitative Bewertung notwendig wären.

Als größtes Problem wurde der Faktor Mensch gesehen. Die Vorgehensweise dieser Versuchsmethode war sehr stark von der durchführenden Person und dem richtigen Einsatz des Fingerdruckzerstäubers beim Löschen abhängig. Um diesen Einfluss in Zukunft besser beurteilen zu können, sollten die Versuche von weiteren Personen durchgeführt werden.

Langfristig wird es jedoch unumgänglich sein, den Einfluss des Menschen in der Versuchsmethodik zu minimieren. Überlegungen dazu könnten etwa dahingehen, den Fingerdruckzerstäuber durch ein kontinuierlich förderndes Gerät zu ersetzen und in weiterer Folge schließlich den gesamten Löschprozess zu automatisieren.

Obwohl die in dieser Arbeit entwickelte Versuchsmethodik schließlich nicht geeignet war, die Löschwirkung von Löschmittelzusätzen quantitativ zu bewerten, konnten viele wichtige Erkenntnisse über Einflussfaktoren gewonnen werden. Auch zeigten die erzielten qualitativen Ergebnisse, dass der Ansatz der Versuchsmethodik grundsätzlich in die richtige Richtung zu gehen schien. Für die Weiterentwicklung der Versuchsmethodik bietet diese Arbeit die geeignete Ausgangsbasis.

5 Zusammenfassung

Die Arbeit gliedert sich in zwei Abschnitte, einen theoretischen und einen praktischen. Im ersten Abschnitt wird zunächst auf die Definition der Brandklassen eingegangen und eine Übersicht über die heute gebräuchlichen Löschmittel gegeben. Im Weiteren werden Löschversuche an Feststoffbränden beschrieben und diskutiert, die weltweit von Feuerwehrorganisationen, privaten, sowie öffentlichen Forschungseinrichtungen betrieben wurden. Für Details soll an dieser Stelle an die entsprechenden Kapitel verwiesen werden.

Der zweite, praktische Teil der Arbeit behandelt die Entwicklung einer Versuchsmethodik, die leicht im Labor durchgeführt werden kann und mit der es möglich sein soll, die Löschwirkung von Löschmittelzusätzen zu quantifizieren. Diese Entwicklung zog sich über vier Phasen. In der ersten wurden grundsätzliche Überlegungen zu den Ergebnisparametern, entscheidenden Faktoren und Einflussgrößen angestellt. Im zweiten Schritt fanden Vorversuche statt, mit denen erste praktische Erfahrungen gesammelt wurden. In den Abschnitten drei und vier wurden zwei Versuchsaufbauten entwickelt, getestet und schließlich bewertet.

Grundlegende Gedanken

Der Anspruch an die Versuchsmethodik war, einfach und schnell im Labor durchführbar zu sein und dabei aussagekräftige und reproduzierbare Ergebnisse generieren zu können.

Alle Versuche sollten mit einem handelsüblichen Fingerdruckzerstäuber gelöscht werden. Die zum Löschen gebrauchte Löschmittelmenge war der entscheidende Ergebnisparameter. Um zu einer anwendbaren Versuchsmethodik zu gelangen, mussten folgende Faktoren im Laufe der Entwicklung abgeklärt werden: das Brennmaterial, der physische Versuchsaufbau,

die Entzündungsmöglichkeit, die Vorbranddauer, auch Vorbrennzeit genannt, externe Einflüsse, die Löschmethode und die Handhabung, das Löschkriterium, der menschliche Einfluss, die Regeln für die Gültigkeit und die Versuchsauswertung.

Vorversuche

In dieser Phase wurde untersucht, wie sich eine solche Versuchsmethodik gestalten ließ und welche Materialien am besten geeignet waren. Optimal zeigten sich Kiefernholzstäbe als Brennstoff, die auf einer drehbaren Metallschale unter einem Rauchabzug positioniert waren. Der Brandversuch wurde mit Heptan initiiert.

Es wurden darauf zwei Versuchsaufbauten entwickelt, deren wesentlicher Unterschied im angewendeten Löschkriterium lag. Versuchsaufbau I wurde so gestaltet, dass die Löschtätigkeit fortgeführt wurde, bis keine Glut mehr erkennbar war. Bei Versuchsaufbau II dagegen wurde das Experiment bei Erlöschen der Flammen beendet.

Versuchsaufbau I

Es wurden sieben verschiedene Konfigurationen von Holzaufbauten mit Wasser als Löschmittel getestet.

Mit der vielversprechendsten Konfiguration wurden Versuche mit Löschmittelzusätzen durchgeführt. Dabei kamen unverschäumte Lösungen, sogenannte Netzmittellösungen, mit einer Konzentration von 0,3 Vol.-% zum Einsatz. Verwendet wurden ein Klasse-A-Schaummittel und ein Biotensid. Als Referenz dienten Versuche mit Wasser.

In diesem Kapitel wurde untersucht, welchen Einfluss die Art der Versuchsabfolge spielte. Dazu wurden einerseits randomisierte Versuchsreihen mit den drei Löschmitteln durchgeführt. Ein Zufallsgenerator entschied über die Reihenfolge der Einzelexperimente. Andererseits wurden mehrere Reihenversuche durchgeführt, bei denen das Löschmittel erst nach Vollendung einer Reihe variiert wurde.

Versuchsaufbau II

In diesem Versuchsaufbau kam das Erlöschen der Flammen als Löschkriterium zur Anwendung. Die Brandlast musste folglich stark erhöht werden.

Vier Konfigurationen wurden erarbeitet und mit Wasser als Löschmittel getestet.

Die erfolgversprechendste Variante wurde in nicht randomisierten Versuchen mit Wasser und einer 1 Vol.-% Klasse-A-Schaummittellösung weiterverwendet.

Im Näheren wurde der Einfluss des Wassergehaltes des Holzes näher betrachtet. Während bisher nur Holz verwendet wurde, das nicht speziell konditioniert war, kam nun auch vollständig getrocknetes Holz zur Anwendung.

Fazit

Mit den Versuchsaufbauten I und II konnten zwei vielversprechende Experimentkonfigurationen entwickelt werden. Es wurden wichtige Erkenntnisse über alle zuvor erwogenen Einflussgrößen und Parameter gewonnen. Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind hier noch einmal dargestellt:

Die Randomisierung brachte gegenüber einer reihenweisen Vorgehensweise keine Vorteile. Es konnten keine verbesserten Mittelwerte und keine geringeren Streuungen beobachtet werden. Im Gegenteil, die Randomisierung verschlechterte sogar die Ergebnisse bei den Biotensidversuchen.

Durch die Trocknung des Holzes konnten keine signifikanten Verbesserungen der Ergebnisse erzielt werden. Allerdings verbesserte sich das Brandverhalten des Aufbaus deutlich. Die Zahl der ungültigen Versuche nahm stark ab.

Die Wahl des Löschkriteriums war schwieriger zu beurteilen, da Versuche kaum vergleichbar waren. Bei Betrachtung der Ergebnisse, zeigte der Wechsel hin zum Löschen, bis keine Flammen mehr sichtbar waren, keine Verbesserung der Streuung. Subjektiv war dieses Kriterium in der Anwendung jedoch weit praktikabler.

Vielfach wurde im Zuge dieser Arbeit beobachtet, dass die benötigte Löschmittelmenge über die Zeit mehrerer Versuchstage bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen abnahm. Erklärt wurde dieses Phänomen mit einem menschlich bedingten Lerneffekt. Dabei gewöhnte sich der Proband bei der Versuchsdurchführung an den Aufbau und das Löschmittel. Das führte zu einer Verbesserung der Resultate. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde davon stark beeinträchtigt. Da sich jedoch auch Ausnahmen zeigten, konnte dieser Effekt nicht restlos erklärt werden.

Mit keiner der beiden Aufbauten konnten belastbare, reproduzierbare Ergebnisse für die getesteten Löschmittelzusätze gewonnen werden. Eine quantitative Bewertung ließen die schwankenden Referenzwerte nicht zu. Qualitativ konnte gezeigt werden, dass auch eine geringe Beimischung von Klasse A Schaummittel die Löschwirkung des Wassers wesentlich steigern konnte. Dagegen verschlechterte die Zugabe von Biotensid tendenziell sogar die Löschwirkung des Wassers.

Eine Weiterentwicklung dieser Versuchsmethodik sollte vor allem darauf abzielen, den menschlichen Einfluss zu verkleinern, etwa durch automatische Löscheinrichtungen.

Literaturverzeichnis

- [1] VRIES, Holger de: *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum : Technik und Taktik*. 1. Aufl. Landsberg : Ecomed, 2000 (Einsatzpraxis)
- [2] ÖNORM EN 2. 2004-12-01. *Brandklassen*
- [3] ÖSTERREICHISCHER FEUERWEHRVERBAND: *Die Löschmittel*. 2. überarbeitete Auflage für Österreich. Bern : Verlag Schweiz. Feuerwehr-Kalender, 1998
- [4] HENRY PORTZ: *Brand- Und Explosionsschutz Von A-Z*. 1. Auflage. Wiesbaden : Fried. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2005
- [5] BVFA - BUNDESVERBAND TECHNISCHER BRANDSCHUTZ E.V.: *Pulver*. URL <http://www.bvfa.de/de/63/mobile-loeschtechnik/loeschmittel/pulver/> – Überprüfungsdatum 2017-03-10
- [6] SU, Chung-Hwei ; CHEN, Chan-Cheng ; LIAW, Horng-Jang ; WANG, Shiu-an-Cheng: *The Assessment of Fire Suppression Capability for the Ammonium Dihydrogen Phosphate Dry Powder of Commercial Fire Extinguishers*. In: *Procedia Engineering* 84 (2014), S. 485–490. URL http://ac.els-cdn.com/S1877705814017809/1-s2.0-S1877705814017809-main.pdf?_tid=f2856b34-0577-11e7-89ed-00000aab0f02&acdnt=1489140018_4606bd9d8b1f969ffc90b4ecd1a7d64d – Überprüfungsdatum 2017-03-10
- [7] ORCHIDEE EUROPE BVBA: *Unsere Löschpulver*. URL <http://www.orchidee-fire.com/de/powders/> – Überprüfungsdatum 2017-03-11
- [8] AERO-X AG: *Produktinformation Stat-X*. URL <http://www.aero-x.ch/sites/default/files/documents/Produktbeschreibung%20StatX%20DE.pdf> – Überprüfungsdatum 2017-03-08
- [9] GAMA-TRONIK BRANDSCHUTZSERVICE GMBH: *Gaslöschanlagen Sapphire mit 3M™ Novec™ 1230 Feuerlöschmittel*. URL <http://www.gama-tronik.de/de/Gasloeschanlagen->

- Sapphire-mit-NOVEC-1230.php. – Aktualisierungsdatum: 2017-01-01 –
Überprüfungsdatum 2017-03-20
- [10] K.A. BLÖCHLIGER AG: *Kohlendioxid-Löschmittel | Fettbrand-Löschmittel*. URL
https://www.k-a-b.ch/fileadmin/user_upload/bilder/5_PRODUKTE/5_2_Feuerloescher/5_2_1_Wissenswertes/5_2_1_6_Loeschmittel/KAB_C06_FINAL.pdf – Überprüfungsdatum 2017-03-19
- [11] KARWEL FEUERLÖSCHSYSTEME: *Fettbrandlöscher F6*. URL
<https://www.karwel.de/karwel-haushaltloescher-fettbrandloescher-f6-ka/> –
Überprüfungsdatum 2017-03-19
- [12] *Fettbrandlöscher*. URL <http://feuerloescher-ratgeber.de/fettbrand-feuerloescher/> –
Überprüfungsdatum 2017-03-19
- [13] EN 1568. 2008-06. *Feuerlöschmittel - Schaummittel*
- [14] ÖNORM EN 3-7. 2004. *Tragbare Feuerlöscher*
- [15] NFPA 18. 2017. *Standard on Wetting Agents*
- [16] UL 711. 2013-12-18. *Standard for Safety Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers*
- [17] DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY GRANT 2006: *Performance of Special Extinguishment Agents for Firefighter Use*. URL
https://www.ul.com/global/documents/offerings/industries/buildingmaterials/fireservice/extinguishingagents/DHS%20Grant%20Final%20Report%20-%20Project%2007CA42526%20-%20Performance%20of%20Special%20Extinguishment%20Agents%20for%20Fire%20Fighter%20Use%20-%20Sept.%2030_2008.pdf – Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [18] Österreichischer Bundesfeuerwehrverband Richtlinie GP-03. Dezember 2007. *Prüfung von Sonderlöschgeräten und Sonderlöschmitteln*
- [19] AXEL FÖHL: *Bewertung des DLS-Löschverfahrens*. URL
<https://www.ffb.kit.edu/download/DLS2003.pdf>. – Aktualisierungsdatum: Juni 2003 –
Überprüfungsdatum 2017-11-09
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR INNERES: *Brandschutzratgeber: Brandschutzratgeber*. Mai 2005

Anhang

- Übersicht über alle Versuche, die in dieser Arbeit behandelt wurden S. 95
 - Versuchsaufbau I, alle Daten der Experimente im Detail S. 97
 - Versuchsaufbau II, alle Daten der Experimente im Detail S. 106
- Arbeitsanweisung zu Versuchsaufbau II S. 109

Übersicht über alle Versuche

Versuchsaufbau I

Versuchs- bezeichnung	verwendete Konfiguration	Löschmittel*	randomisiert**	getrocknetes Holz***	Vorbrenndauer mm:ss
Versuchsaufbau I					
1a-1, 1a-2, 1a-3, 1a-4	1a				04:00
1b-1, 1b-2	1b				04:00
1b-3,	1b				03:45
1b-4	1b				03:30
1c-1	1c				03:30
1d-1, 1d-2	1d				03:30
1d-3	1d				03:00
1d-4	1d				02:45
1e-1	1e				03:00
1e-2	2e				02:30
1f-1	1f				2:15-2:30
1g-1	1g				03:00
1g-2	1g				02:45
1g-3, 1g-4, 1g-5, 1g-6	1g				02:30
a-1	1g	0,3 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel			02:30
b-1	1g	0,3 Vol.-% Biotensid			02:30
w-R-1, w-R-2,	1g		ja		02:30

w-R-3					
a-R-1, a-R-2, a-R-3	1g	0,3 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel	ja		02:30
b-R-1, b-R-2, b-R-3	1g	0,3 Vol.-% Biotensid	ja		02:30
w-1	1g				02:30
Versuchsaufbau II					
2a-1	2a				2:45 - 4:15
2b-1	2b				02:45
2c-1	2c				02:30
W-0	2d				02:15
A-0	2d	1 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel			02:15
A-1	2d	1 Vol.-% Klasse-A- Schaummittel		ja	02:00
W-1	2d			ja	02:00
W-2	2d			ja	02:00
W-3	2d			ja	02:00
W-4	2d			ja	02:00

* freie Felder: Versuche wurden mit Wasser gelöscht

** freie Felder: Versuche wurden nicht randomisiert

*** freie Felder: Versuche wurden mit nicht konditioniertem Holz durchgeführt

Versuchsaufbau I

Versuchs- bezeichnung	Vorbrenndauer	Holzmasse	verbrauchte Löschmittelmenge	Grund der Ungültigkeit
	mm:ss	g	g	
1a-1	04:00	25,986	2,658	
		26,941	2,425	
		25,935	6,669	
		23,293	2,647	
		24,571	4,439	
		25,273	4,267	
		30,371	6,008	
1a-2	04:00	28,977	2,168	
		27,462	2,23	
		27,952	1,584	
		29,298	2,144	
		26,84	1,496	
		27,81	2,44	
		26,765	1,901	
		29,513	1,691	
		28,116	1,555	
		28,982	-	obere Stücke nicht vollständig in Brand
1a-3	04:00	26,589	1,922	
		27,686	1,984	
		30,285	2,686	
		28,031	-	nur einseitig angebrannt
		28,404	2,197	
		28,21	1,647	
		28,344	2,185	
		27,565	-	noch nicht in Vollbrand
1a-4	04:00	29,317	1,545	
		28,258	1,639	
		25,753	1,327	
		26,761	1,52	
		26,83	4,454	
		26,326	2,341	
		26,636	2,564	
		25,517	2,655	
25,696	2,476			
26,053	2,942			

		26,079	2,899	
		26,399	2,477	
1b-1	04:00	20,557	4,029	
		18,646	4,252	
		20,5	2,036	
		20,053	3,976	
		20,253	3,891	
		20,206	1,233	
		20,687	2,645	
		20,679	2,107	
		20,739	2,11	
		20,969	1,718	
1b-2	04:00	18,258	3,069	
		18,165	-	ein Stab zerbrochen und herausgefallen
		18,463	2,742	
		18,457	1,894	
		18,514	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		18,2	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		18,653	2,076	
		18,32	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		18,946	0,979	
		18,614	2,336	
1b-3	03:45	18,748	3,216	
		20,178	1,779	
		19,655	1,324	
		18,587	1,025	
		18,482	2,352	
		18,767	2,625	
		19,271	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		18,692	1,824	
		18,707	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		18,878	1,71	
1b-4	03:30	18,741	2,055	
		19,28	2,088	
		18,21	1,324	
		18,887	1,639	

		18,96	1,256	
		18,012	-	Stab beim Löschen verrutscht
		19,314	-	nur einseitig angebrannt, da schlecht gedreht
		19,079	0,979	
		18,587	2,19	
		18,265	1,796	
1c-1	03:30	33,525	6,886	
		35,115	7,404	
		34,483	8,299	
		35,018	8,09	
		36,11	8,235	
		35,94	8,129	
		36,438	10,111	
		36,045	9,284	
		35,395	7,02	
		37,082	8,503	
1d-1	03:30	29,75	-	zu wenig Wasser in Sprühflasche, schlecht gelöscht
		29,448	-	Stab herausgesprungen
		30,162	10,157	
		29,273	-	zwei Stäbe herausgesprungen
		28,91	6,741	
		30,104		Stab herausgesprungen
		29,613		Stab herausgesprungen
		28,428	7,748	
		29,545	8,622	
1d-2	03:30	28,417	-	Teile herausgefallen und Stapel zusammengebrochen
		28,741	11,088	
		28,704	-	Stab beim Löschen zerplatzt
		28,833	7,339	
		30,564	7,842	
		29,179	6,565	
		28,823	7,752	
		28,943	-	zwei Stäbe beim Löschen zersprungen
		28,456	-	ein Stab in der Vorbrenndauer herausgebrochen
		29,594	5,037	

1d-3	03:00	29,475	8,23	
		29,589	-	Stapel beim Löschen zerfallen
		31,327	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		29,858	7,117	
		29,57	4,755	
		31,159	5,849	
		30,419	-	in der Vorbrenndauer ein Stab herausgefallen
		30,452	8,023	
		30,642	-	Stapel beim Löschen zerfallen
		30,108	6,013	
1d-4	02:45	30,399	4,772	
		29,116	4,64	
		29,313	4,967	
		29,387	-	eine Ecke viel zu wenig angebrannt
		31,292	5,984	
		30,785	-	eine Ecke viel zu wenig angebrannt
		29,0547	7,915	
		30,883	-	eine Ecke viel zu wenig angebrannt, Stäbe beim Löschen verrutscht
		28,65	7,07	
		29,764	-	ungleichmäßig angebrannt, Stäbe beim Löschen verrutscht
1e-1	03:00	20,062	5,651	
		21,101	7,085	
		20,649	-	ein Stab beim Löschen heruntergefallen
		20,646	4,062	
		19,766	-	Stapel beim Löschen zerfallen
		22,15	-	zwei Stäbe beim Löschen herausgefallen
		21,4	7,834	
		21,803	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		20,79	-	Brand war schon sehr abnehmend, Stapel kurz vorm Zusammenbrechen
		21,453	-	Stapel beim Löschen zerfallen

1e-2	02:30	23,84	-	sehr ungleich angebrannt
		21,871	4,016	
		22,077	3,367	
		22,585	-	eine Ecke viel zu wenig angebrannt, Stäbe beim Löschen verrutscht
		20,839	4,216	
		21,282	-	eine Ecke viel zu wenig angebrannt, Stäbe beim Löschen verrutscht
		24,015	3,394	
		22,744	3,345	
		21,22	3,76	
		22,029	-	ungleich angebrannt
1f-1	2:15 - 2:30	28,978	4,373	
		28,967	3,873	
		28,831	3,447	
		29,057	2,487	
		28,53	5,315	
		28,929	3,677	
		28,733	5,49	
		28,149	3,013	
		28,486	4,264	
		27,707	2,835	
1g-1	03:00	25,934	6,169	
		27,727	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		25,482	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		29,563	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		28,212	6,592	
		28,597	-	Stab beim Löschen zersprungen
		29,087	-	Stab beim Löschen zersprungen
		28,506	5,55	
		30,088	-	Stab beim Löschen zersprungen
		27,782	6,441	
1g-2	02:45	27,284	6,233	
		26,887	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		28,212	6,032	

		27,675	-	Stab beim Löschen zersprungen
		26,658	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		27,175	-	Stab beim Löschen zersprungen
		29,537	3,699	
		28,483	5,901	
		25,651	5,79	
		28,471	4,782	
1g-3	02:30	26,534	5,474	
		26,769	4,512	
		25,114	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		28,084	5,232	
		25,405	4,661	
		27,068	4,641	
		28,198	4,732	
		27,395	6,059	
		26,464	4,751	
		27,381	4,195	
1g-4	02:30	28,066	3,613	
		27,448	4,4098	
		28,426	3,946	
		28,114	-	Stab beim Löschen zersprungen
		28,679	3,464	
		26,225	4,332	
		28,195	3,854	
		28,538	3,994	
		27,631	4,028	
		26,81	4,026	
1g-5	02:30	25,888	6,142	
		27,334	4,387	
		27,236	5,056	
		27,031	-	Stab beim Löschen zersprungen
		26,795	5,316	
		27,973	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		26,52	4,606	
		26,883	4,19	
		27,524	4,104	
		27,034	4,491	

1g-6	02:30	27,37	4,449	
		26,005	4,746	
		25,001	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		25,905	5,502	
		26,717	3,834	
		26,183	6,791	
		26,411	4,918	
		25,888	4,527	
			4,591	
		26,873	3,79	
a-1	02:30	25,602	-	ungleich angebrannt
		26,874	2,761	
		27,665	2,947	
		26,644	2,692	
		26,011	2,215	
		26,1725	3,111	
		26,258	2,475	
		27,078	3,198	
		26,321	1,7	
		27,622	4,612	
		25,833	4,773	
b-1	02:30	27,402	-	ungleich angebrannt
		27,063	4,938	
		26,891	5,272	
		27,428	5,79	
		26,903	5,782	
		25,952	-	außergewöhnlich schwierig zu löschender Glutpunkt
		27,344	5,227	
		27,602	-	außergewöhnlich schwierig zu löschen
		27,639	5,149	
		27,514	5,281	
		26,302	5,443	
w-r-1	02:30	28,115	4,884	
		27,524	5,856	
		27,077	2,598	
		25,262	6,506	
		26,017	4,138	
		26,029	4,983	
		27,288	-	sehr ungleichmäßig angebrannt

		26,988	4,142	
w-r-2	02:30	25,709	-	Stapel beim Löschen zusammengebrochen
		25,991	4,106	
		25,294	3,493	
		25,592	4,736	
		26,014	3,114	
		25,444	3,009	
		26,815		sehr ungleichmäßig angebrannt
		25,604	3,539	
w-r-3	02:30	24,508	4,842	
		25,465	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		25,492	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		25,34	5,067	
		26,07	2,963	
		26,748	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		25,44	3,053	
		26,694	4,879	
a-r-1	02:30	26,957	3,9753	
		27,83	2,519	
		26,968	3,929	
		27,275	2,655	
		27,421	3,371	
		26,049	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		27,332	3,005	
		26,181	4,396	
a-r2	02:30	25,423	2,805	
		25,277	-	Stab beim Löschen zersprungen
		25,186	4,063	
		26,29	2,435	
		26	2,839	
		25,733	-	Stab beim Löschen zersprungen
		27,841	3,55	
		25,699	3,423	

a-r-3	02:30	25,571	3,912	
		27,398	3,281	
		25,929	3,929	
		26,145	3,936	
		28,31	3,13	
		26,318	4,479	
		26,06	3,732	
		26,722	2,204	
b-r-1	02:30	26,893	8,578	
		27,711	7,171	
		27,294	6,773	
		25,512	-	Stab beim Löschen zersprungen
		25,831	7,554	
		25,449	8,414	
		26,392	-	außergewöhnlich schwer zu löschen
		26,593	5,116	
b-r-2	02:30	25,727	7,201	
		26,174	7,475	
		26,615	4,827	
		25,177	5,254	
		26,915	6,136	
		25,617	6,172	
		26,647	4,345	
		26,493	-	Stäbe beim Löschen zersprungen
b-r-3	02:30	25,999	-	Stab beim Löschen zersprungen
		25,682	7,789	
		24,319	-	Stab beim Löschen zersprungen
		27,123	9,71	
		26,432	6,866	
		24,236	8,699	
		25,896	5,333	
		25,183	-	außergewöhnlich schwer zu löschen
		26,362	4,162	
		25,553	-	zu wenig Wasser in Sprühflasche, schlecht gelöscht

w-1	02:30	26,103	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		23,765	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		26,283	4,297	
		24,312	4,638	
		23,671	4,681	
		24,877	4,468	
		24,107	3,72	
		26,541	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		23,525	3,391	
		25,894	5,028	
		25,625	3,649	
		25,111	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		27,229	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		25,687	4,827	
		25,222	2,677	
		25,117	-	sehr ungleichmäßig angebrannt
		24,642	3,664	
		24,545	-	Stäbe beim Löschen verrutscht
		24,342	-	Stab beim Löschen zersprungen
		26,012	3,24	
		23,979	3,321	
		23,857	4,3	

Versuchsaufbau II

Versuchsbezeichnung	Vorbrenndauer	Holzmasse	verbrauchte Löschmittelmenge	Löschzeit	Grund der Ungültigkeit
	mm:ss	g	g	s	
2a-1	04:15	143,417	18,885	25	
	03:00	113,166	21,562	68	
	03:00	108,667		-	Stapel zusammengebrochen
	02:45	109,425	18,673	51	Stapel sehr instabil
	03:00	113,762	13,013	40	lange Stäbe krümmen sich
	02:45	108,071	8,093	23	Rückzündung
2b-1	02:45	108,589	12,66	36	
		109,518	20,332	63	

		112,922	18,231	55	Rückzündung
		116,482	26,803	83	Rückzündung
		112,399	8,967	26	Rückzündung
		109,24	17,139	55	Rückzündung
		112,577	22,395	71	Rückzündung
		109,38	11,201	32	
		120,577	9,563	33	
		111,165	18,752	65	
2c-1	02:30		7,468		
		86,705	5,346		
W-0	02:15	81,985	12,263	35	
		88,43	11,372	35	
		87,144	11,04	31	
		87,488	11,612	37	
		87,965	15,048		
		87,063	9,492	28	
		85,766	-	57	fehlerhafte Handhabung der Löschtechnik
		85,948	11,264	35	
		86,965	-	25	unvollständig angebrannt
		89,872	13,409	40	
A-0	02:15	88,978	5,519	17	
		85,056	5,536	21	
		93,768	-		Zeit übersehen
		94,56	-		noch nicht vollständig in Brand
		91,45	5,348		
		90,097	-		sehr ungleichmäßig angebrannt
A-1	02:00	85,301	8,221	26	
		88,489	6,093	20	
		88,992	8,822	23	
		88,648	6,978	23	
		91,009	7,291	23	
		83,678	7,214	22	
		84,308	5,892	19	
		90,742	7,399	24	
		86,59	5,973	19	
		86,199	8,069	26	
W-1	02:00	87,99	20,066	57	
		86,352	17,284	50	

		87,778	16,062	48	
		86,221	-	68	Löschtechnik nicht konsequent eingehalten
		87,85	15,843	50	
		87,461	18,042	52	
		86,569	16,212	49	
		88,985	16,811	49	
		84,884	18,78	59	
		88,358	20,978	63	
W-2	02:00	88,196	16,036	48	
		85,813	-	43	Probleme mit auslaufendem Fingerdruckzerstäuber
		91,221	14,514	43	
		89,673	10,71	32	
		86,797	14,424	43	
		86,668	10,399	31	
		88,84	-	54	Löschtechnik nicht konsequent eingehalten
		88,677	13,604	42	
		88,661	12,528	39	
		86,91	12,708	41	
W-3	02:00	84,26	13,302	37	
		86,978	10,197	28	
		89,084	9,854	29	
		86,068	9,169	27	
		85,595	9,535	26	
		90,462	10,876	31	
		87,264	7,687	23	
		86,517	8,149	26	
		86,726	8,87	26	
		83,162	11,329	36	
W-4	02:00	83,275	13,138	39	
		84,955	12,637	39	
		86,556	-	26	sehr ungleichmäßig angebrannt
		84,76	13,925	41	
		90,258	11,115	41	
		77,856	13,539	44	
		88,836	9,884	35	
		89,29	10,419	35	
		86,016	10,902	36	
		81,947	9,967	32	

Arbeitsanweisung

Aufbau

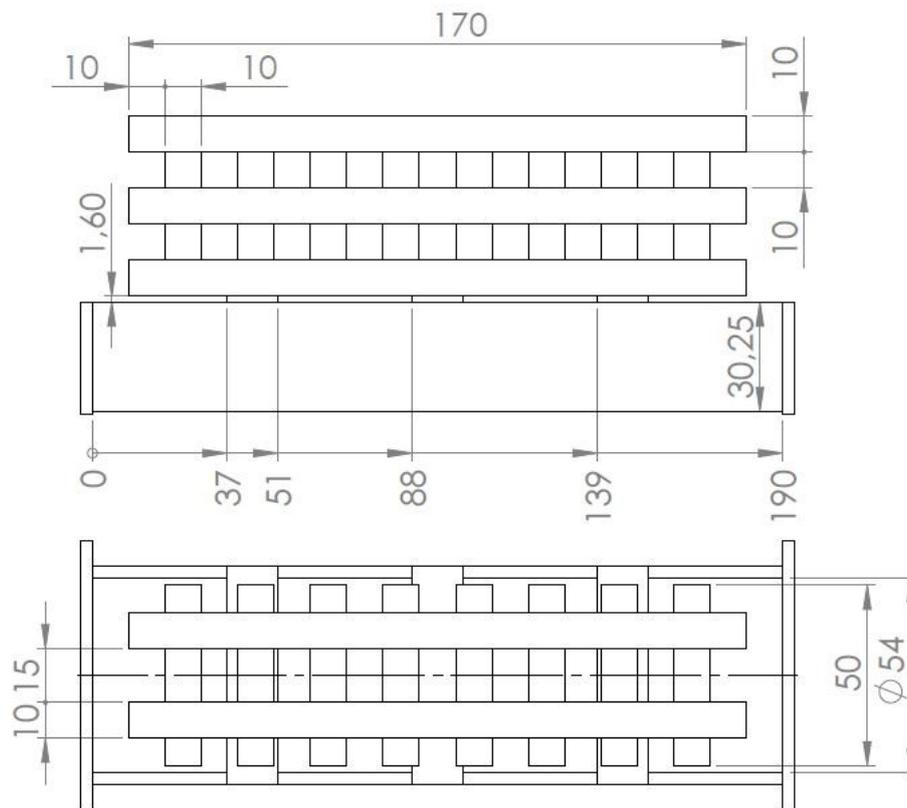
Die vorgestellte Versuchsmethodik sieht Löschversuche an Kiefernholzstapeln vor. Es werden handelsübliche Holzleisten im Profil 10x10 verwendet. Es kommen für die Aufstellung zwei Längen zu Anwendung: 50 und 170 mm. Dabei werden 16 kurze und sechs lange Stücke benötigt.

Das Holz muss vor dem Versuch über 24 Stunden bei 105°C im Trockenschrank gelagert werden. Es darf erst für das Experiment verwendet werden, wenn es auf Raumtemperatur abgekühlt ist. Über die Zeit bis zu Verwendung sollte es vor einer erneuten Aufnahme von Wasser aus der Atmosphäre geschützt werden.

Die Grundlage des Versuchsaufbaus besteht aus einem Metalltrog, der aus einem halbiertem Rohr geschweißt wurde. Praktische Bedeutung hat der Innendurchmesser von 54 mm und eine Innenlänge von 190 mm. Auf den Trog werden drei Metallelemente der Breite 14 mm gelegt. Sie sollen einem Abstand von 37 mm zueinander haben. Der Versuch selbst wird auf einem Drehteller positioniert. Dazwischen kann optional eine Metallunterlage eingesetzt werden.

Der Aufbau des Holzstapels erfolgt auf den querliegenden Metallelementen. Die unterste, die mittlere und die oberste Lage bestehen aus jeweils zwei 170 mm langen Leisten mit einem Abstand von 15 mm zueinander. Dazwischen werden je acht 50 mm lange Stäbe im Abstand von 10 mm gelegt. Der Aufbau ist in den nachstehenden Abbildungen skizziert.

Es ist darauf zu achten, dass der Stapel gerade aufgebaut wird. Die Verwendung einer Wasserwaage wird nahegelegt. Es soll auch auf die produktionsbedingten Unregelmäßigkeiten der Hölzer geachtet werden. Ebenso kann die Maserung der längeren Leisten im Brandversuch zu Instabilitäten führen. Diese Leisten mit der Maserung nach oben zu legen, verhindert das Problem im Regelfall.



Zum Löschen wird ein handelsüblicher Fingerdruckzerstäuber verwendet. Dieser hat ein Fassungsvermögen von ca. 200 ml und gibt in jedem Sprühstoß durchschnittlich 126,6 mg Löschmittel ab. Die Flasche sollte vor Versuchsbeginn zumindest halb voll sein. Bei Verwendung von Löschmittelzusätzen, ist auf besondere Sauberkeit zu achten, da bereits geringe Verunreinigungen starke Auswirkungen haben können.

Versuchsumgebung

Die Löschversuche werden stets unter einem Rauchabzug durchgeführt. Luftströmungen im Bereich des Brandversuchs können diesen wesentlich beeinflussen. Abzüge die ausschließlich nach oben hin Luft anziehen, sind zu bevorzugen. Die Rauchentwicklung macht es im Normalfall nicht notwendig, den Abzug komplett zu schließen. Ihn zu schließen kann gegebenenfalls zu starken Luftströmungen und einer negativen Beeinflussung des Experiments führen.

Der Versuch ist im Labor bei möglichst gleichbleibenden Raumbedingungen durchzuführen. Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit werden hier jedoch nicht konkret vorgegeben.

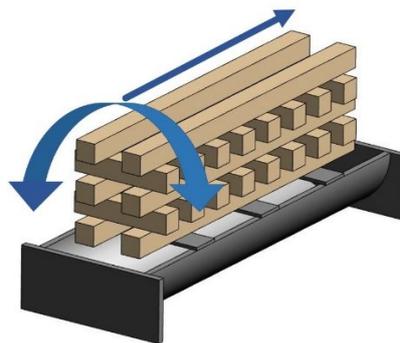
Versuchsdurchführung

Die Masse des Holzes wird gewogen, bevor es für den Aufbau verwendet wird. Ist der Versuch im dafür vorgesehenen Abzug aufgebaut, werden in den Trog 5 ml Heptan gefüllt.

Der Versuch beginnt mit der Entzündung des Heptans. Dieses brennt in der Regel um die 1:45 bis 1:50 min lang.

Die Zeitspanne von der Entzündung des Heptans bis zum Beginn der Löschfähigkeit wird Vorbrenndauer oder Vorbrennzeit genannt. Sie beträgt für diesen Versuch genau 2:00 min. In dieser Zeit muss der Aufbau alle 20 s um 180° weitergedreht werden.

Nach Ablauf der Vorbrenndauer wird mit der Löschfähigkeit begonnen. Dazu wird der Zerstäuber auf den brennenden Stapel gerichtet und aus einem Abstand von mindestens 7 cm mit kräftigen Sprühstößen das Löschmittel auf den Brand verteilt. Das Löschen ist an einem Ende des Stapels zu beginnen und soll dann der Länge nach bis zum anderen Ende weitergeführt werden. Es soll prinzipiell von vorne nach hinten und von unten nach oben gelöscht werden. Der Winkel der Sprühstöße kann vom Probanden frei gewählt und gewechselt werden. Oft empfiehlt es sich zusätzlich den Drehteller in die gewünschten Positionen zu drehen. Die Löschfähigkeit wird eingestellt, sobald keine Flammen mehr aus dem Stapel treten. Die nachstehende Abbildung illustriert die richtige Vorgehensweise.



Durch Wiegen des Fingerdruckzerstäubers vor und nach dem Löschversuch lässt sich die benötigte Löschmittelmenge errechnen. Das verwendete Holz soll ebenfalls gewogen werden. Die Dauer der Löschphase ist auch zu dokumentieren, ebenso wie etwaige subjektive Eindrücke.

Für eine gewissenhafte Auswertung der Ergebnisse ist es notwendig, zumindest zehn Einzelerperimente pro Versuchsreihe durchzuführen. Ein Experiment dauert in etwa 20 min.

Regeln für die Gültigkeit

Ein Versuch muss gewisse Kriterien erfüllen, um als gültig gewertet zu werden. Dazu muss er am Ende der Vorbrenndauer gleichmäßig und vollständig in Brand stehen. Das heißt der Brand sollte seine maximale Intensität erreicht aber noch nicht überschritten haben. Alle Seiten des Stapels sollten gleichmäßig angebrannt sein. Gleiches gilt für die unten- und oben liegenden Stäbe.

Am Ende des Versuchs darf es zu keiner Rückzündung innerhalb der ersten Minute nach Beendigung der Löschtätigkeit kommen. Für diesen Fall muss der Versuch als ungültig gewertet werden.

Ein wesentlicher Ausschlussgrund ist die Stabilität des Stapels. Dieser muss von der Brandinitiierung bis zum Beenden der Löschtätigkeit seine Aufstellung im Wesentlichen beibehalten. Einzelne Stäbe dürfen weder zerplatzen noch verrutschen. Der Stapel darf sich nicht neigen oder zusammenbrechen. Solche Veränderungen der Stapelstruktur können maßgeblichen Einfluss auf das Resultat haben. Die Entscheidung über die Gültigkeit eines Versuchs obliegt letztendlich der durchführenden Person.