



Erstellung eines Normungsvorschlages zur Bestimmung des Löschvermögens von Löschschaum bei Feststoffbränden

Bachelorarbeit

im Studiengang

Hazard Control / Gefahrenabwehr

vorgelegt von

Sören Waltemathe

am 21. März 2011

Gutachter:

Prof. Dr. Bernd Kellner (HAW Hamburg)

Dr. Matthias Prall (Fa. Dr. Sthamer Hamburg)



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich im Besonderen bei Herrn Dr. Matthias Prall bedanken, der sich fachkundig mit der Thematik, oftmals aus seiner Freizeit heraus, auseinandergesetzt hat. Die vielseitige und kompetente Beratung und Betreuung hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Bernd Kellner danke ich ebenfalls für seine Unterstützung mit zahlreichen Tipps und Hinweisen bei der Begleitung dieser Arbeit.

Vielen Dank auch an Frau Karin Heyer vom Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, die mich bei der Literaturrecherche sehr unterstützt hat.

Herrn Dieter Brein, Herrn Jürgen Dittrich, Herrn Henry Persson und Herrn Dr. Georg Pleß möchte ich für die Beantwortung zahlreicher fachspezifischer Fragen danken.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die Art sowie die Abmessungen eines geeigneten Feststoffprüfkörpers festgelegt, um das Löschvermögen von Schaum zu bestimmen. In Abhängigkeit zum Prüfkörper werden die weiteren Anforderungen an die zur Prüfung verwendeten Geräte und Materialien, an die Umgebung und den Prüfungsablauf begründet und festgelegt. Eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse soll durch eine weitgehende Automatisierung der Prüfung erreicht werden.

Am Anfang der Arbeit werden die grundsätzlichen Vorgänge der Feststoffverbrennung unter Glutbildung am Beispiel von Holz erläutert.

Zudem werden die Funktionsweise von Schaum als Löschmittel sowie die momentanen normativen Anforderungen an Schaummittel erläutert. Es ist zu klären, welche dieser Anforderungen für die Schaummittel zur Feststoffbrandbekämpfung übernommen werden können.

Abstract

This paper defines the nature and dimensions of an adequate test specimen in order to assay the quenching capacity of Class-A-foam. Depending on the test specimen further requirements on the equipment and material, test setting and procedure will be founded and determined. A high reproducibility of the results shall be achieved through an automation of the testing.

In the beginning the paper deals with the fundamental process of solid fuel combustion with embers employing the example of wood.

Furthermore, the operating mode of foam as an extinguishing media and the current standardization of foam will be explained. It must be clarified which of these requirements can be taken for solid fire fighting standards.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches gekennzeichnet.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Formelverzeichnis	6
1. Einleitung	8
2. Holz	10
1.1. Aufbau	11
1.2. Verbrennung	13
1.2.1. Aufheizung und Trocknung	13
1.2.2. Pyrolytische Zersetzung der Holzmasse	13
1.2.3. Homogene Verbrennung der flüchtigen Zersetzungsprodukte	14
1.2.4. Heterogene Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Rückstandes	15
3. Löschschaum	17
3.1. Verwendung	18
3.2. Aufbau	23
3.2.1. Schaumbildner	24
3.2.2. Fluortenside und –polymere	25
3.3. Funktion	27
3.4. Normung	28
3.4.1. Sediment des Schaummittels	28
3.4.2. Viskosität des Schaummittels	29
3.4.3. pH-Wert des Schaummittels	29
3.4.4. Oberflächenspannung der Schaummittellösung	30
3.4.5. Spreitungskoeffizient der Schaummittellösung	30
3.4.6. Bestimmung von Verschäumung und Wasserabscheidung	31
3.5. Zusammenfassung	32
4. Dimensionierung des Prüfkörpers	33
4.1. Geometrie des Prüfkörpers	35
5. Prüfungsgeräte und Material	39
5.1. Zündung des Prüfkörpers	39
5.2. Prüfungsplattform	43
5.1. Umdrehungsgeschwindigkeit	46
5.2. Schaumrohrhalterung	47
5.3. Löschmittelmenge	47

5.4. Zumischung und Verschäumung	50
6. Prüfungsumgebung	51
6.1. Holzfeuchte	51
6.2. Harzgehalt	52
6.3. Holzdichte.....	53
6.4. Windverhältnisse.....	53
6.1. Luftversorgung	55
6.2. Prüfungstemperaturen.....	55
6.3. Luftdruck und Luftfeuchtigkeit.....	56
6.4. Wasserqualität	56
6.5. Vorbrennzeit.....	57
6.6. Wärmestrahlung.....	63
6.7. Prüfungsumgebung	71
7. Prüfungsdurchführung	72
7.1. Versuchsvorbereitungen und Prüfungsanordnung.....	72
7.2. Vorbrennzeit.....	74
7.3. Schaumaufgabe	74
7.4. Rückbrandbeständigkeit.....	75
7.5. Bestimmung der Löschwirkung	75
8. Zusammenfassung.....	78
9. Fazit	81
10. Glossar	82
11. Literaturverzeichnis.....	84
Anhang	89
I. Winkelverhältnis.....	90
II. Prüfungsplattform-Unterkonstruktion nach SS1192.....	91
III. Berechnung Löschmitteleffektivität	92
IV. Prüfungsplattform mit Prüfkörper	93
V. Normungsvorschlag als Ergänzung zur EN 1568-3, 2008.....	98

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Absatzentwicklung eines Schaummittels zur Feststoffbrandbekämpfung [74]</i>	8
<i>Abb. 2: Holzbauquote in Deutschland [73]</i>	10
<i>Abb. 3: Holzaufbau [4]</i>	11
<i>Abb. 4: Thermische Zersetzung von Holz und seinen Komponenten bei verschiedenen Pyrolysetemperaturen nach [10]</i>	12
<i>Abb. 5: Räumliche Aufteilung der Verbrennungszone</i>	14
<i>Abb. 6: Herstellung von 3%igen Schwerschaum, Mittelschaum bzw. Leichtschaum [26]</i>	18
<i>Abb. 7: Funktionsweise Schwer- und Mittelschaumstrahlrohr [1]</i>	18
<i>Abb. 8: Druckverhältnisse im Zumischer [1]</i>	20
<i>Abb. 9: Schematischer Aufbau einer CAFS-Anlage [1]</i>	21
<i>Abb. 10: Tenside, Struktur und Funktion [25]</i>	24
<i>Abb. 11: Orientierung der Tenside im Wasser sowie der mikroskopische Aufbau einer Schaumblase [25]</i>	24
<i>Abb. 12: Gelöstes Öl/Fett im Wasser [25]</i>	25
<i>Abb. 13: Aufbau Fluortensid (Bsp.) [25]</i>	25
<i>Abb. 14: Orientierung der Kohlenwasserstofftenside auf unpolaren flüssigen Brennstoffen [25]</i>	25
<i>Abb. 15: Ausbildung des Wasserfilms durch Fluortenside auf unpolaren flüssigen Brennstoffen [25]</i> .	26
<i>Abb. 16: Schematische Darstellung des Polymerfilms auf einem unpolaren flüssigen Brennstoff [25]</i>	26
<i>Abb. 17: Verbrennungsdreieck [75]</i>	27
<i>Abb. 18: Schematische Darstellung der Kohäsionskräfte [22]</i>	30
<i>Abb. 19: Beispiel für die Wasserabscheidung von Schwerschaum; Schaumhöhe 30 cm [3]</i>	32
<i>Abb. 20: Größenvergleich des kleinsten und des größten Holzprüfkrippenkörpers nach DIN EN 3, 2007 [30] (Höhe & Breite 0,5m)</i>	34
<i>Abb. 21: Strömungsverhältnisse in der Holzprüfkrippe und den Spalten nach [7]</i>	36
<i>Abb. 22: Prüfkörperabmessungen</i>	37
<i>Abb. 23: Zeitlicher Masseverlust bei einer Holzprüfkrippe [36]</i>	38
<i>Abb. 24: Schematischer Aufbau der Prüfungsplattform</i>	45
<i>Abb. 25: Prüfkörper auf dem Untergestell mit Zündwanne und Prüfungsplattform</i>	46
<i>Abb. 26: Schematischer Aufbau der Schaumrohrhalterung (ohne Schlauch)</i>	47
<i>Abb. 27: Löschvermögen versch. Handfeuerlöscher bezogen auf die Holzprüfkrippenoberfläche</i>	49
<i>Abb. 28: Steigerung der Gluttemperatur bei Zuführung von Luft [44]</i>	54
<i>Abb. 29: Schematische Unterteilung der Holzstäbe in vier Teilbereiche</i>	57
<i>Abb. 30: Schematische Darstellung der längs auf die quer gelegten Holzstäbe</i>	59
<i>Abb. 31: Schematische Darstellung der auf das Holz wirkenden Kräfte</i>	60
<i>Abb. 32: Schematische Darstellung der räumlichen Flächenanordnung</i>	67
<i>Abb. 33: Parallele Rechteckfläche mit einer Ecke in der Mittelsenkrechten des Flächenelementes</i>	68
<i>Abb. 34: Vorstellung und Anordnung der Viertelflächen</i>	69
<i>Abb. 35: Wärmefluss in Abhängigkeit der Entfernung zum Prüfobjekt</i>	71
<i>Abb. 36: Aufbauskizze Prüfkörper parallel zu Schaumrohrhalterung</i>	72

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Funktionen und Komponenten der Holzbestandteile [6]</i>	12
<i>Tab. 2: Brandklassen nach EN 2</i>	17
<i>Tab. 3: Eigenschaften von Schwer-, Mittel- und Leichtschaum</i>	19
<i>Tab. 4: Schaummitteltypen</i>	22
<i>Tab. 5: Class-A-Foams [2]</i>	23
<i>Tab. 6: Zusammensetzung künstliches Meerwasser [27]</i>	31
<i>Tab. 7: Heptanbrennzeit in Abhängigkeit von der Wannengröße</i>	40
<i>Tab. 8: Anforderungen an der zu verwendende Heptan</i>	42
<i>Tab. 9: Übersicht über die verschiedenen Konstruktionsmöglichkeiten der Plattform</i>	44
<i>Tab. 10: Prüfkörperoberflächen</i>	48
<i>Tab. 11: Bestimmung von k_0 für ungeschützte Oberflächen mit t in Minuten</i>	62
<i>Tab. 12: Kohleschicht, Abbrand und Restquerschnitt über die Zeit</i>	63
<i>Tab. 13: Kritische Bestrahlungswerte für verschiedene Stoffe [66]</i>	70
<i>Tab. 14: Übersicht Prüfungsablauf</i>	74
<i>Tab. 15: Klassifizierung der Löschmittel</i>	77
<i>Tab. 16: Übersicht Materialanforderungen / Grenzwerte</i>	79
<i>Tab. 17: Übersicht Prüfungsablauf</i>	79

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
bsp.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
d.h.	das heißt
FP	Feuerlöschkreiselpumpe
ggf.	gegebenenfalls
o.ä.	oder ähnliches
SM	Schaummittel
u.a.	unter anderem
VZ	Verschäumungszahl
>>	sehr viel größer als
Vol%	Volumenprozent
MPA	Materialprüfanstalt

Formelverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A	$[m^2]; [dm]$	Fläche
a	$[m]$	Abstand zweier Flächen
B	$[\]$	Geometrisches Seitenverhältnis
b'	$[m]$	Kantenlänge
b	$[m]; [mm]$	Kantenlänge
C	$[\]$	Geometrisches Seitenverhältnis
c	$[m]$	Kantenlänge
c	$\frac{g}{cm^{3/2} \cdot sec}$	spezifische Abbrandgeschwindigkeit
D_f	$[m]$	Branddurchmesser
$d_{char,n}$	$[mm]$	Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe
d_{ef}	$[mm]$	ideelle Abbrandtiefe
d_0	$[mm]$	Dicke der nicht mehr tragenden Schicht
F	$[N]$	Kraft
$f(P)$	$[\]$	Porositätsfaktor
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
H	$[MJ/m^3]; [MJ/kg]$	Heizwert
h_H	$[dm]; [mm]$	Höhe
I		Flächenträgheitsmoment für quadratische Querschnitte
k_0	$[Min.]$	Bemessungswert zur Anpassung von d_0 bei einer noch nicht voll entwickelten Kohleschicht
l	$[m]$	Länge
M	$[Nm]$	Drehmoment
M_L	$[l]$	Löschmittelmenge
M_H	$[l/m^2]$	Menge Heptan
m	$[kg]$	Masse

\dot{m}	$[kg/Min]; [g/s]$	Massenfluss
N	$[\]$	Anzahl der horizontal gestapelten Holzstäbe
n	$[\]$	Anzahl der nebeneinander liegenden Holzstäbe
P	$[cm]$	Porosität
P_S	$[W]$	Strahlungsleistung des Körpers
\dot{Q}	$[MJ]$	Wärmefluss
\dot{Q}_{12}	$[W]$	Wärmestrahlung von Fläche 1 zur Fläche 2
q	$[N/m]$	Streckenlast
q	$[N/m^2]$	Flächenlast
\dot{q}	$[W/cm^2]$	Wärmestrahlung von Fläche 1 zur Fläche 2
\dot{Q}	$[kW]$	Energiefreisetzung eines realen Brandherdes
s	$[m]$	Abstand der Holzstäbe zueinander
t	$[s]; [Min]$	Zeitdauer
T	$[K]$	Temperatur
u	$[\%]$	Holzfeuchte
V	$[m^3]; [dm]; [l]$	Volumen
\dot{v}	$[l/m^2]$	Aufgabemenge
Z_f	$[m]$	mittlere Flammenhöhe
z		Abstand zur neutralen Faser
σ	$[W/m^2]$	Strahlungskonstante
β_n	$[mm/Min]$	Bemessungswert der ideellen Abbrandrate
ε	$[\]$	Emissionsgrad der strahlenden Fläche
ρ	$[g/cm^3]; [kg/dm]$	Dichte
φ_{12}	$[\]$	Winkelverhältnis von Fläche 1 zur Fläche 2
σ_{zul}	$80 N/mm^2$	Zulässige Maximalspannung

1. Einleitung

Löschschaum wird in der Petrochemie seit dem zweiten Weltkrieg zur Brandbekämpfung von Tankbränden eingesetzt und ist seitdem kontinuierlich weiterentwickelt worden. Mit keinem anderen Löschmittel können bis heute die Brände großer Mengen brennender Flüssigkeit so schnell und effektiv bekämpft werden.

Schaummittel für die Bekämpfung von Feststoffbränden sind seit der Mitte der 1990er Jahre erhältlich [1] [2]. Aufgrund der dreidimensionalen Form und des höheren Fließwiderstands an den mitunter porösen und zerklüfteten Oberflächen des Brandguts, werden an diese andere Anforderungen zur erfolgreichen Brandbekämpfung gestellt.

In der bisherigen Normung werden alle Schaumlöschmitteltypen für die Prüfung des Löschvermögens auf brennende Flüssigkeiten aufgegeben. Eine Prüfung an einem brennenden Feststoff ist nicht vorgesehen. Eine Übertragung der Löschwirkung von einem eindimensionalen Flüssigkeitsbrand auf einen Feststoffbrand ist aufgrund der grundsätzlich anderen Anforderungen nur eingeschränkt möglich.

Die Käufer dieser Schaummittelprodukte konnten die Effektivität daher nur durch eigene Versuche bestimmen. Zusammen mit der zunehmenden Verbreitung dieses Schaumtyps wird der Bedarf einer genormten Prüfung des Löschvermögens für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Schaummittelprodukte an brennenden Feststoffen deutlich (*Abb. 1*).

Absatz STHAMEX-class A

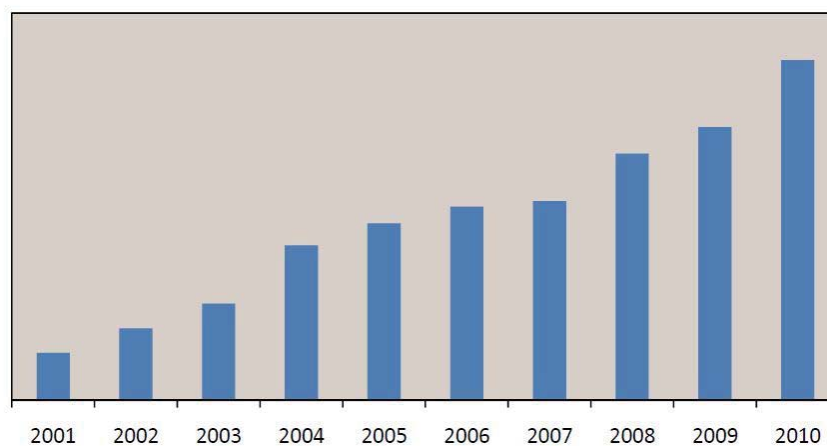


Abb. 1: Absatzentwicklung eines Schaummittels zur Feststoffbrandbekämpfung [74]

Am Anfang der Arbeit werden die grundsätzlichen Vorgänge der Feststoffverbrennung unter Glutbildung am Beispiel von Holz erläutert.

Anschließend werden die Funktionsweise von Schaum als Löschmittel sowie die momentanen normativen Anforderungen an Schaummittel erläutert. Es ist zu klären, welche dieser Anforderungen für die Schaummittel zur Feststoffbrandbekämpfung übernommen werden können.

Im Hauptteil werden die Art sowie die Abmessungen eines geeigneten Feststoffprüfkörpers festgelegt, um das Löschvermögen von Schaum zu bestimmen. In Abhängigkeit zum Prüfkörper werden die weiteren Anforderungen an die zur Prüfung verwendeten Geräte und Materialien, an die Umgebung und den Prüfungsablauf begründet und festgelegt. Eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse soll durch eine weitgehende Automatisierung der Prüfung erreicht werden.

2. Holz

Aufgrund der hohen Verfügbarkeit, seiner Eigenschaften und des Mangels an Alternativen hat der Werkstoff Holz in der Vergangenheit eine weite Verbreitung in der Bautechnik gefunden. In den letzten Jahren konnte dieser Werkstoff im Rahmen des ökologischen Bauens wieder Marktanteile gegen moderne Konkurrenzbaustoffe wie Stahlbeton gewinnen (Abb. 2). In der Inneneinrichtung von Wohngebäuden ist Holz bis heute ein beliebtes Material.

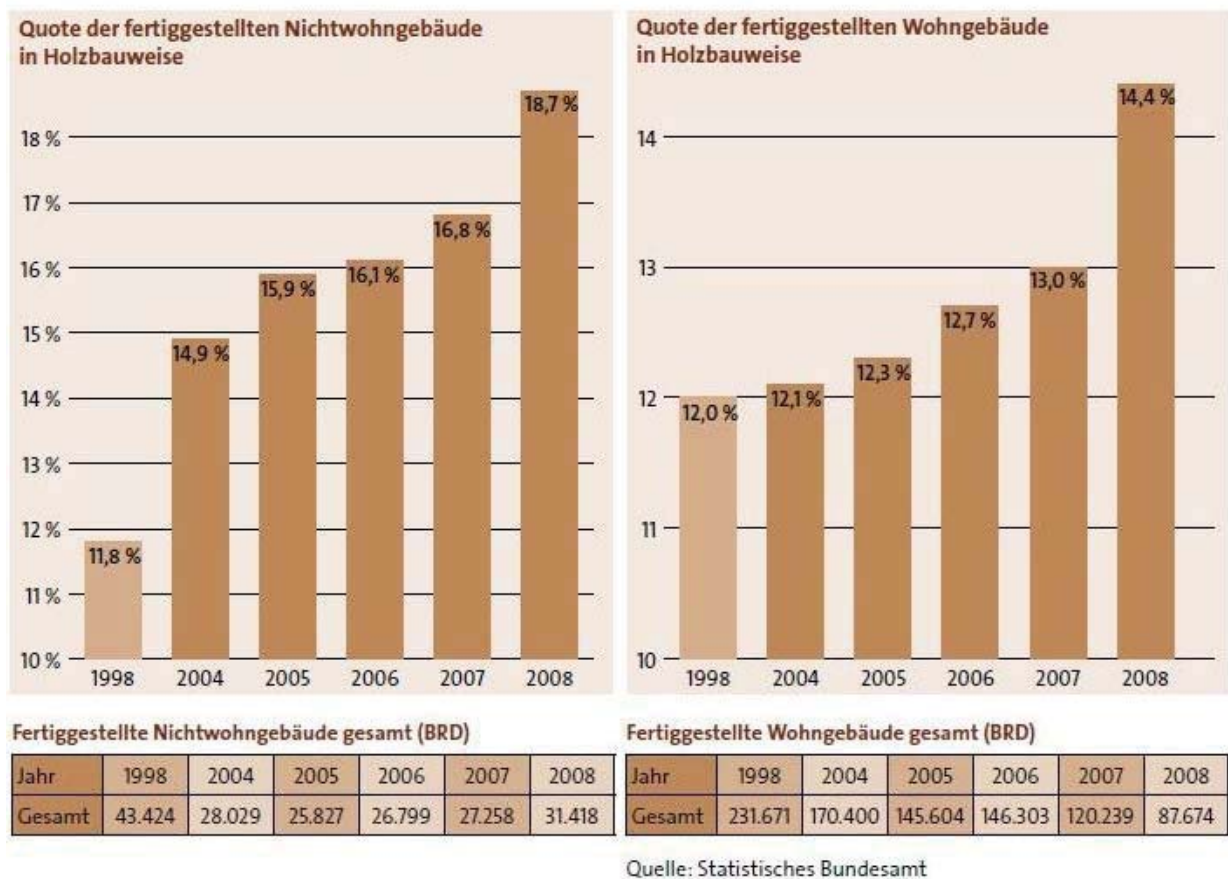


Abb. 2: Holzbauquote in Deutschland [73]

Abhängig von der Intention der Nutzung ist die Eigenschaft der Brennbarkeit des unbehandelten Holzes zu betrachten. Für Baustoffe ist diese Eigenschaft als negativ zu bewerten.

Die grundsätzliche Brennbarkeit ist in der Vergangenheit für schwere Schadensereignisse ursächlich gewesen. Es wurde versucht durch die Entwicklung vorbeugender Maßnahmen (z.B. Oberflächenbehandlungen durch Brandschutzanstriche) und abwehrende Maßnahmen das Eintreten bzw. das Ausmaß eines Schadensereignisses zu begrenzen. Die Entwicklung von Feuerlöschschaum zur Bekämpfung von Feststoffbränden mit Glutbildung kann zu diesen gezählt werden.

Die Verbrennungseigenschaften begünstigen die Prüfung der Löschwirkung von Feuerlöschschaum an Holzprüfkörpern. Die räumliche Anordnung eines Holzprüfkörpers bleibt aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung und der Steifigkeit von Holz bei Erwärmung erhalten. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit bedingt die Ausbildung unterschiedlicher Temperaturzonen und eine räumliche Zerklüftung der Holzoberfläche mit zunehmendem Abbrand [3]. Die Oberfläche behindert damit

zusätzlich die Ausbreitung des Löschmittels. Der Brennstoff selbst ist kostengünstig zu beschaffen, einfach zu lagern und in die benötigte Form zu bringen. Das Material ist ungiftig und der Gefahr durch entstehende Atemgifte kann mit einfacher Schutzausrüstung begegnet werden.

Die Kenntnisse über den Holzaufbau und die Verbrennung bilden die Grundlagen für das Verständnis der Wirkung von Löschmitteln und die in einer Prüfung gestellten Anforderungen.

1.1. Aufbau

Der Holzkörper ist aus Millionen kleiner Zellen von größtenteils langgestreckter Form aufgebaut. Eine Zellwand umschließt jede Zelle in einem Hohlraum.

Unterschiede bzgl. der Holzzellen bestehen zwischen der Aufgabe im Holz, der Holzart sowie besonders zwischen Laubhölzern und Nadelhölzern. Diese Unterschiede betreffen besonders die Zellarten, ihre Formen und Größen. Nadelhölzer bestehen zu etwa 95 % aus einem Hauptzelltyp (sog. Tracheiden) und weisen daher eine größere Homogenität als die komplizierter und differenzierter aufgebauten Laubhölzer [5].

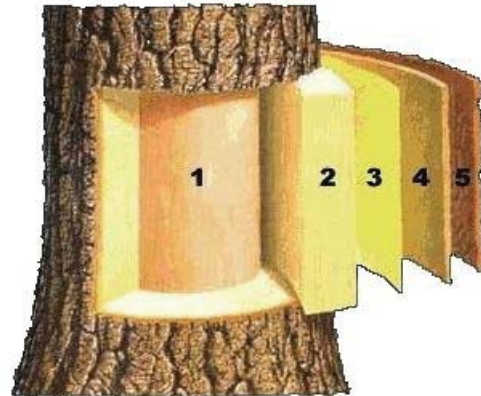
Die einzelnen Holzkomponenten sind nicht gleichmäßig im Holz verteilt. Ein großer Anteil der Bestandteile befindet sich in den einzelnen Zellwänden des Holzes (Tab. 1) [6].

Die Holzzellen verlaufen überwiegend in Stammrichtung [6]. Eine unterschiedliche räumliche Ausdehnung der Fasern in Längs- und Querrichtung begründet auch die unterschiedliche Ausdehnung des Holzes bei Erwärmung.

Die chemische Zusammensetzung der Zellwände ist jedoch immer annähernd gleich [5]. Nach einer von KRAUS, 2008 [7] angeführten Vorlesungsreihe von SPECHT [8] zeigt Holz folgenden chemischen Aufbau (in Massenvolumenprozent):

- Kohlenstoff 47 % - 53 %
- Sauerstoff 42 % - 46 %
- Wasserstoff 5 % - 7 %
- Stickstoff 0 % - 0,7 %
- Schwefel 0 % - 0,3 %

Es wird eine deutliche Dominanz von Kohlenstoff und Sauerstoff ersichtlich. Diese beiden Stoffe sind Hauptbestandteil der Zellwände [5].



Bezeichnung	Aufgabe
1. Kernholz	Stützende Säule des Baumes; der Nährstofftransport ist eingestellt
2. Splintholz	Nährstoffleitung
3. Kambium	Wachstumsgewebe bildet nach außen Bast- und innen Holzzellen
4. Bast	Versorgungsleitung für die Aufbaustoffe in die übrigen Baumteile
5. Borke	Bildet zusammen mit dem Bast die Rinde

Abb. 3: Holzaufbau [4]

Dieser hohe Kohlenstoff- und Sauerstoffanteil begründet die niedrigen Zündtemperaturen und die gute Brennbarkeit des Materials [8].

Die oben genannten verschiedenen Holzkomponenten reagieren unterschiedlich auf Wärmeeinwirkung. HELLWIG, 1988 [9] fasst dazu verschiedene Autoren zusammen [10] [11] [12] und beschreibt die vollständige Umwandlung der Zellulose und der Hemizellulosen in unbrennbare und brennbare Gase. Lignin ist demnach haltbarer und verbleibt mit ca. 55 % der Anfangsmasse in der Holzkohle und stellt damit den Hauptanteil dar.

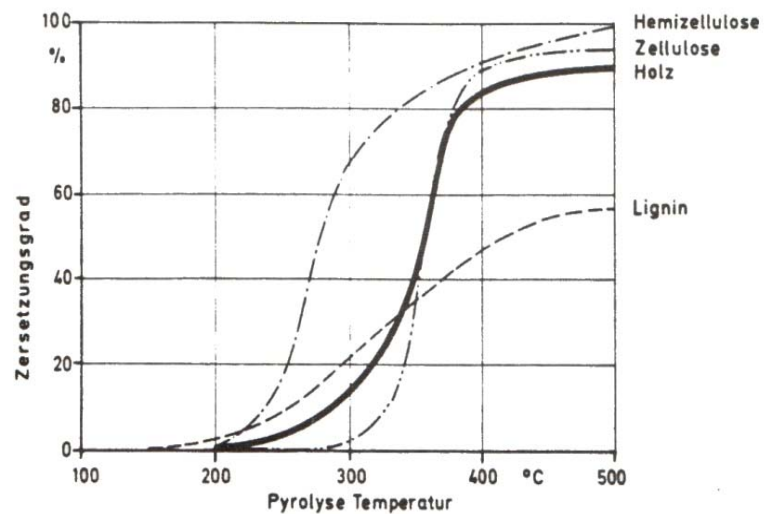


Abb. 4: Thermische Zersetzung von Holz und seinen Komponenten bei verschiedenen Pyrolysetemperaturen nach [10]

	Funktion	Komponente
Hauptbestandteile	<u>Zellulose und Hemizellulosen</u> Gerüstsubstanz der Zellwand (Anteil: 46 % - 87 %)	Zellulose: Langkettiges Makromolekül (Anteil: 40 % – 55 %)
		Hemizellulosen: Kurz-kettiges, verzweigtes Makromolekül (Anteil: 15 % – 35 %)
	<u>Lignin</u> Verleiht dem Zellgerüst Stabilität und bewirkt damit die Verholzung der Zellwände (Anteil: Nadelholz ≈ 28 % – 41 % Laubholz ≈ 18 % – 25 %)	Dreidimensionales Makromolekül
	<u>Pektin</u> Verbindungssubstanz in der Mittellamelle, welche den Gewebeverband zusammen hält	Dreidimensionales Makromolekül
Begleitbestandteile	Extraktstoffe (anorganische und organische Inhaltsstoffe): beeinflussen und bedingen oft die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften z.B. Lichtbeständigkeit, Brennbarkeit, Schädlingsresistent	Fette, Öle, Harze, Wachse
		Eiweiße, Stärke, Zucker, Holzgummi
		Alkaloide, Gerbstoffe, Farbstoffe, Bitterstoffe, Riechstoffe, Kapfer
		Anorganische und organische Säuren, Salze
		Mineralstoffe

Tab. 1: Funktionen und Komponenten der Holzbestandteile [6]

Insgesamt besteht Holz bei der Verbrennung zu $\approx 85\%$ aus flüchtigen Bestandteilen, zu $\approx 14\%$ aus festem Kohlenstoff sowie zu $\approx 1\%$ aus Asche. In Abhängigkeit von der Holzfeuchte kommt Wasser hinzu [9].

1.2. Verbrennung

Nach einer in zwei Phasen untergliederten thermischen Aufbereitung des Holzes beginnt der ebenfalls in zwei Phasen untergliederte Verbrennungsprozess.

1.2.1. Aufheizung und Trocknung

Erste irreversible thermische Veränderungen treten bereits ab einer Erwärmung des Holzes auf ca. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf [9] [7] [5].

Durch die Wärmezuführung verlassen freies und chemisch gebundenes Wasser sowie Terpene das Holz [5].

Das gebundene Wasser verdampft und sprengt bei extrem hohen Erwärmungsgeschwindigkeiten durch den Druck seiner Raumexpansion die umgebenden Zellstrukturen BAEMEL, 1980 [13] nach HELLWIG, 1988 [9]. Die quer und längs zur Holzfaser unterschiedliche Raumausdehnung führt zu kleinsten Rissbildungen im Holz. Aufgrund der somit vergrößerten Oberfläche kann sich der Temperatureausgleich und der Trocknungsprozess schneller einstellen PATZAK, 1972 [14] und SCHÜTT 1963 [15] nach HELLWIG, 1988 [9].

Oberhalb von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ erweichen die Holzharze und verlegen die radialen Leitungsbahnen, die vorher für den Sauerstofftransport aus dem Inneren zur Verfügung standen. Aufgrund des höheren Harzanteils entsteht dadurch besonders in Nadelhölzern ein hoher Druck KOLLMANN, 1951 [16] nach HELLWIG, 1988 [9]. Die leicht siedenden Bestandteile des Harzes verdampfen und verlassen das Holz [7].

Die Geschwindigkeit dieser Prozesse ist bei konstanter Temperatur von den Eigenschaften des Holzes abhängig (Dichte, Feuchte und Faserrichtung) [7].

1.2.2. Pyrolytische Zersetzung der Holzmasse

Erreicht das Holzmaterial eine Temperatur von ca. $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ setzt die irreversible pyrolytische Zersetzung ein [9] [5]. Nach KRAUS, 2008 [7] beginnt eine endotherme Pyrolyse bereits ab ca. $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, welche ab ca. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ in eine exotherme Reaktion übergeht. Demnach werden erst ab Beginn der exothermen Reaktion, neben den unbrennbaren flüchtigen Bestandteilen, auch die brennbaren gebildet.

Die Reaktion der pyrolytischen Umsetzung bezeichnet das Ablaufen der Reaktion, wenn kohlenstoffhaltige Substanzen unter Sauerstoffabschluss, d.h. ohne Oxidationsmittel, erhitzt werden. Dabei werden flüchtige Gase und Dämpfe, vor allem aus Kohlenwasserstoffverbindungen, Kohlenstoffmonoxid, Wasserdampf, Teer und Benzol gebildet [9]. Nach AUTORENKOLLEKTIV, 2010 [5] können weiterhin Reaktionswasser, Kohlenstoffdioxid, Methanol, Formaldehyd, Methan und andere flüchtige Fragmente entstehen und austreten. Der zurück bleibende feste Holzanteil besteht aus mineralstoffhaltigen Rückständen (Asche) und vor allem aus reinem Kohlenstoff (Holzkohle) KOLLMANN, 1960 [17] nach HELLWIG, 1988 [9].

Das Verhältnis zwischen den festen und flüchtigen Bestandteilen beträgt ca. 80 % bis 85 % für die flüchtigen und 15 % bis 20 % für die festen Bestandteile [9]. Nach diesem auch von KRAUS, 2008 [7] in seiner Arbeit angenommen Verhältnis entfallen ca. 6,5 % der festen Bestandteile auf die Asche und die restlichen ca. 93,5 % auf die Holzkohle.

Der Pyrolyseprozess erreicht bei ca. 400 °C seine maximale Reaktionsgeschwindigkeit und nimmt anschließend wieder ab [7] [5]. Dies ist an einem abnehmenden Masseumsatz der Reaktion zu erkennen [7]. Nach HELLWIG, 1988 [9] ist der Pyrolyseprozess bereits bei ca. 400 °C abgeschlossen.

1.2.3. Homogene Verbrennung der flüchtigen Zersetzungsprodukte

Nachdem die flüchtigen Bestandteile an die Holzoberfläche diffundiert sind, erfolgt die Vermischung mit freiem und gebundenem Sauerstoff als Oxidationsmittel [9]. Die Menge und der Ort der austretenden Gase ist veränderlich [3]. Die Vermischungsgeschwindigkeit ist entscheidend für die Geschwindigkeit der Zündung sowie des Abbrands der Gase und damit für die Energiefreisetzungsgeschwindigkeit [9]. Hierbei ist eine deutliche Aufteilung der Verbrennungszone in eine Vormischzone mit brennbarem Gas als Hauptbestandteil, die Reaktionszone und die Abgaszone zu erkennen [3]. Die Verbrennungsprodukte sind Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid; bei einer unvollständigen Verbrennung kommt zusätzlich Kohlenstoffmonoxid hinzu [7]. Die bei der exothermen Oxidation frei werdende Energie wird vorzugsweise als Wärmestrahlung aber auch in Form von heißen Rauchgasen an die Umgebung abgegeben. Der an die Holzoberfläche übertragene Energiestrom stellt die Energie für den endothermen Prozess bis zur pyrolytischen Zersetzung bereit [7] [9].

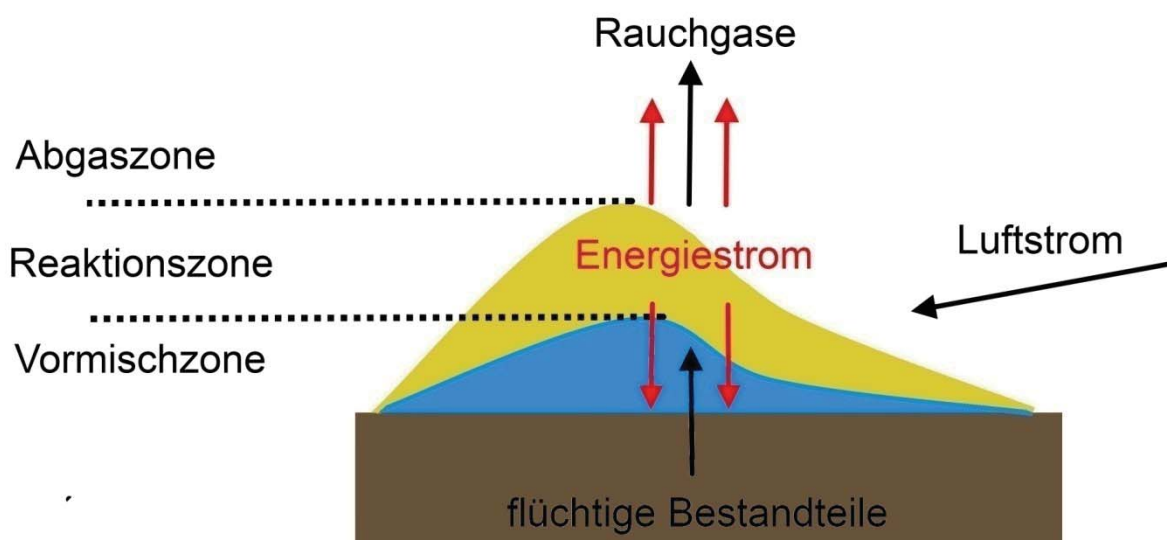


Abb. 5: Räumliche Aufteilung der Verbrennungszone

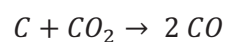
Die langkettigen Kohlenwasserstoffverbindungen diffundieren ebenfalls aus dem Holz. Bevor diese vollständig an der Holzoberfläche reagieren können, werden sie durch die entstehende Thermik mitgetragen. Diese Kohlenwasserstoffverbindungen spalten Wasserstoff ab, welcher mit dem Umgebungssauerstoff zu Wasser reagiert. Das Kohlenwasserstoffmolekül vereinigt sich mit anderen Molekülen zu einem längeren, wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoffmolekül. Nachdem alle Wasserstoffmoleküle abgespalten sind, bilden die nun aus reinem Kohlenstoff bestehenden Molekülketten den Ruß NOETZLIN, 1953 [18] nach HELLWIG, 1988 [9].

Die homogene Reaktion der flüchtigen Bestandteile kann in der gesamten Verbrennungszone stattfinden. Die heterogene Reaktion der Rußpartikelverbrennung ist eine Oberflächenreaktion. Diese ist bzgl. der Zünd- und Abbrandvorgänge mit denen der Holzkohle vergleichbar [9] und wird im nächsten Abschnitt behandelt.

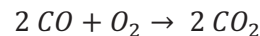
1.2.4. Heterogene Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Rückstandes

An die Holzoberfläche kann während der homogenen Verbrennung praktisch kein Sauerstoff vordringen, da dieser bereits vorher in der Verbrennungszone komplett umgesetzt wird [9] [7].

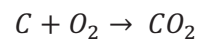
Nach HELLWIG, 1988 [9] verläuft die Verbrennungsreaktion des Kohlenstoffs in zwei Schritten. Er beruft sich dabei auf die Arbeit von SCHÜTT, 1963 [15]. Im ersten, endothermen Schritt reagiert der Kohlenstoff C an der Holzoberfläche mit Kohlenstoffdioxid CO_2 zu Kohlenstoffmonoxid CO :



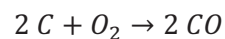
Im zweiten, exothermen Reaktionsschritt reagiert das zuvor entstandene Kohlenstoffmonoxid in der Reaktionszone zu Kohlenstoffdioxid:



Eine direkte Oxidation an der Holzoberfläche findet nach SCHÜTT, 1963 [15] nicht statt:



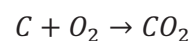
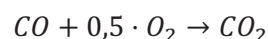
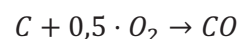
sowie



HELLWIG, 1988 [9] begründet dies damit, dass Kohlenstoff zusammen mit Sauerstoff bei ca. 2300 °C verbrennt. Bei solchen Temperaturen würde die Holzasche schmelzen, welche einen Schmelzpunkt von 1100 °C bis 1300 °C besitzt. Dies findet erfahrungsgemäß nicht statt und wird daher als Beweis angeführt. Nach SPECHT, 1984 [19] gilt dies ebenfalls als indirekter Beweis für die Richtigkeit der oben genannten Reaktionsvorgänge.

Nach den Ausführungen von KRAUS, 2008 [7] nach DEMIDOW, 1956 [20] beginnt die Verbrennung des festen Kohlenstoffs, sobald die flüchtigen, brennbaren Bestandteile des Holzes weitgehend verbrannt sind und Sauerstoff als Oxidationsmittel an die Oberfläche gelangt. Durch den weitgehenden Sauerstoffabschluss hat sich dort durch die Pyrolyse energiereiche Holzkohle gebildet und kann nun verbrennen.

Bei Temperaturen > 600°C beginnt die Holzkohleverbrennung auf der Gas-Festkörper-Grenzschicht:



Dabei ist das Verhältnis von Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid abhängig von der Verbrennungstemperatur.

Schadstoffe wie Dioxine o.ä. entstehen bei einer idealisierten vollständigen Verbrennung unter optimalen Bedingungen nicht. Die in geringen Anteilen im Holz enthaltenen Anteile von Stickstoff und Schwefel verbleiben größtenteils in der Holzasche [5].

Die Ausführungen zur Holzverbrennung zeigen, dass die genauen chemischen und physikalischen Abläufe der Holzverbrennung keineswegs eindeutig sind.

3. Löschschaum

Schaummittelkonzentrate werden Löschwasser in geringen Konzentrationen zugesetzt, um die Effektivität zu steigern. In geringen Konzentrationen können Schaummittel die Oberflächenspannung des Wassers senken und das Vordringen in zerklüftete Oberflächen von Feststoffen oder dreidimensionalen Brandobjekten wie Schüttgut verbessern. Höhere Konzentrationen bewirken die Bildung von Schaum, auch Dispersion genannt.

Die Brandklassen nach EN 2 unterscheiden Brände nach den brennenden Stoffen und dienen zur Auswahl eines geeigneten Löschmittels. Mit Schaum lassen sich Brände der Klasse A und B bekämpfen.

Brandklasse	Brennstoff
A	Feste Stoffe (mit und ohne Glutbildung)
B	Flüssige oder flüssig werdende Stoffe
C	Gasförmige Stoffe
D	Brennende Metalle
F	Brennende Fette und Öle

Tab. 2: Brandklassen nach EN 2

Bereits in der Einleitung wurde erwähnt, dass Schaum ursprünglich für die Bekämpfung von Klasse B Bränden entwickelt und verwendet wurde. Die Stoffe dieser Brandklasse brennen ausschließlich in der Gasphase. Die Verbrennung fester Stoffe erfolgt zusätzlich, mit oder ohne Glutbildung, an der Oberfläche, wie im vorherigen Kapitel am Beispiel des Holzes erklärt wurde. Die Brandbekämpfung von Bränden der Klasse A mit Schaum ist möglich, wurde in der Praxis jedoch nur selten einer Brandbekämpfung mit Wasser vorgezogen.

Der Grund hierfür war, dass an einer Einsatzstelle muss schnellstmöglich die kritische Löschmittelmenge zur effektiven Brandbekämpfung auf das Feuer aufgegeben werden muss. Mit der auf den ersten eintreffenden Löschfahrzeug(en) vorgehaltenen Schaummittelmenge war dies nicht möglich. Eine Umstellung des Löschmittels erfolgte nur selten, bei lang anhaltenden Schadensszenarien, wenn nicht der gewünschte Löscherfolg mit Wasser erzielt werden konnte. Dazu müssen alle wasserführenden Strahlrohre zurückgenommen werden, damit ein mit Schaumrohren aufgebrachtener Schaumteppich nicht wieder vom Brandgut abgespült wird [1].

Die Verwendung von Wasser als Löschmittel war aus der Sicht der Feuerwehr zudem günstiger als der Verbrauch von Schaummittelkonzentraten. Auch wurde Schaummitteln lange Zeit eine per se gesundheits- und umweltschädliche Wirkung nachgesagt. Dies gilt nicht für alle verwendeten Schaummitteltypen. Der mögliche Schutz der Umwelt durch einen schnelleren Löscherfolg, der sich durch die Reduzierung von Rauchgasemissionen sowie großen Mengen kontaminierten Löschwassers ergibt, wurde nicht bedacht.

Seit Mitte der 1990er Jahre sind erst in den USA und später in Europa Schaummittel für die Erzeugung von Klasse-A-Schaum erhältlich [1] [2]. Die Steigerung der mitgeführten Schaummittelkonzentratmenge und die geringere Zumischungsrate machen den Einsatz von Klasse-A-Schaum bereits ab der ersten Phase der Brandbekämpfung möglich.

Die Erzeugung, Anwendung und Funktionsweise der unterschiedlichen Schaumtypen hat sich dabei nicht grundsätzlich verändert und soll an dieser Stelle näher erläutert werden. Im Anschluss wird auf die auch für die Klasse-A-Schäume übertragbaren normativen Anforderungen der Klasse-B-Schäume eingegangen.

3.1. Verwendung

Löschschaum entsteht, wenn ein verhältnismäßig geringer Anteil eines Schaummittelkonzentrates in Wasser gelöst und anschließend mit der Umgebungsluft verschäumt wird. Bei der Verschäumung wird die Luft von Schaummittel eingeschlossen und bildet kleine Blasen aus. Die Verschäumungszahl gibt dabei das Verhältnis der Schaummittel-Wasser-Lösung zur Luft an (*Abb. 6*). Je nach Verschäumungszahl und der daraus resultierenden unterschiedlichen Eigenschaften werden Schwer-, Mittel- und Leichtschaum unterschieden (*Tab. 3, Seite 19*).

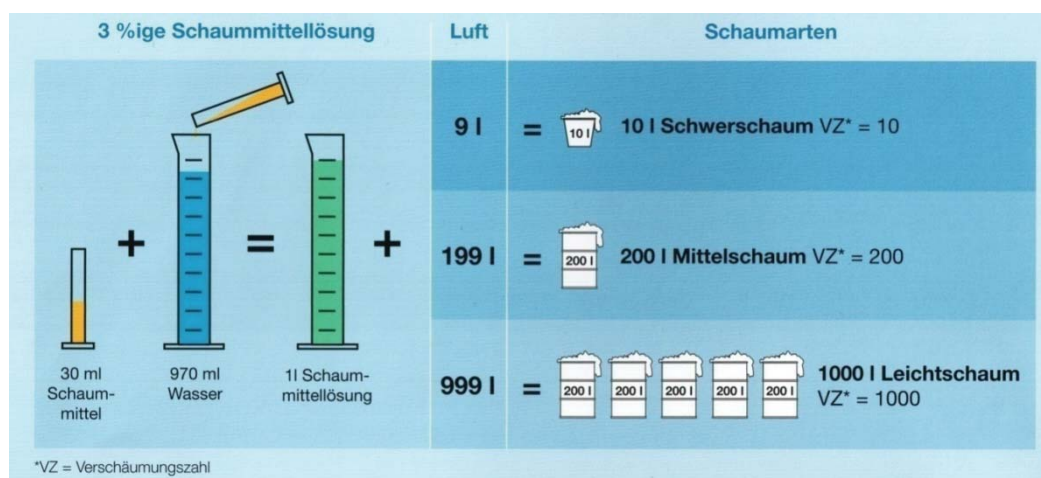


Abb. 6: Herstellung von 3%iger Schwertschaum, Mittelschaum bzw. Leichtschaum [26]

Schwer- und Mittelschäume werden über Schaumstrahlrohre verschäumt bzw. ausgebracht. Diese Strahlrohre sind in der DIN 14366 im Durchfluss und der Verschäumung genormt. Die Schaumstrahlrohre saugen über einen Unterdruck seitlich Luft in das Schaumstrahlrohr. Der Unterdruck wird durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und einer damit verbundenen Verringerung des statischen Drucks erreicht (*Abb. 7*). Das genaue Wirkprinzip wird in diesem Kapitel bei der Funktionsweise der Venturi-Düse beschrieben. Die optimale Vermischung und Verschäumung wird durch den Einbau von Störkörpern und Sieben erreicht [1].

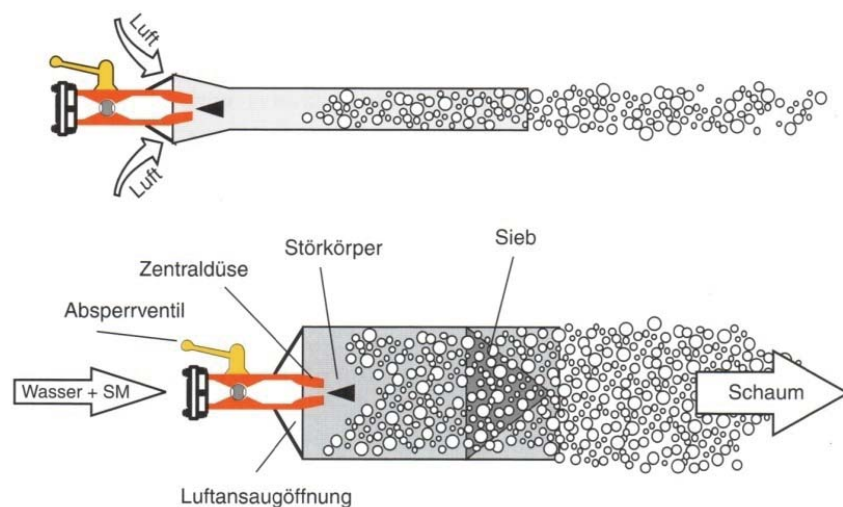


Abb. 7: Funktionsweise Schwer- und Mittelschaumstrahlrohr [1]

Eine Ausbringung von Schwertschaum über normale Strahlrohre ohne Verschäumung ist ebenfalls möglich. Eine leichte Verschäumung findet dann erst über die aus dem Brandgut austretenden Verbrennungsgase statt. Eine weitere Möglichkeit bietet eine Verschäumung direkt nach der Feuerlöschkreiselpumpe durch Druckluft aus einem Kompressor (CAFS-Verfahren).

Leichtschaum wird ausschließlich über spezielle Leichtschaumgeneratoren erzeugt. Dabei handelt es sich um ein großes Belüftungsgerät, welches kontinuierlich Luft gegen ein großes Sieb bläst. Auf das Sieb wird das Wasserschaummittelgemisch fein aufgesprüht, durch den Luftstrom mitgerissen und verschäumt.

Schaumart	VZ	Zumischung	Verschäumung	Eigenschaften
Schwer	< 20	1 % - 6 %	Strahlrohr	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Wasseranteil d.h. hohe Kühlwirkung - gute Fließeigenschaften - schlechte Hafteigenschaften
			Kompressor (CAFS)	<ul style="list-style-type: none"> - sehr homogenes Schaumbild - Eigenschaften variabel steuerbar (zw. guten Fließ- u. schlechten Hafteigenschaften bis schlechten Fließ- und guten Hafteigenschaften)
Mittel	≥ 20 bis ≤ 200	1 % - 6 %	Strahlrohr	<ul style="list-style-type: none"> - geringerer Wasseranteil d.h. geringere Kühlwirkung - passable Fließeigenschaften - passable Hafteigenschaften
Leicht	≥ 200	2 % - 6 %	Gebälse	<ul style="list-style-type: none"> - geringer Wasseranteil d.h. geringe Kühlwirkung - hohes Volumen d.h. ausgeprägter Verdrängungseffekt - schlechte Fließeigenschaften - gute Hafteigenschaften - keine großen Wurfweiten mögl. - windanfällig

Tab. 3: Eigenschaften von Schwer-, Mittel- und Leichtschaum

Bevor eine Schaummittellösung verschäumt werden kann, muss das Schaummittelkonzentrat mit dem Wasser gemischt werden. Eine genaue Zumischung nach Herstellerangaben ist dabei entscheidend für den Löscherfolg. Zu wenig Schaummittelkonzentrat bewirkt die Bildung von ungleichmäßig großen Schaumblasen. Die entstehenden Druckunterschiede im Schaumteppich bewirken eine erhöhte Schaumbeanspruchung und damit eine verkürzte Standzeit des Schaumteppichs.

Eine Überdosierung bewirkt eine höhere Schaumstabilität mit einer geringeren Verschiebbarkeit der einzelnen Schaumblasen gegeneinander. Dies führt zu einer Reduzierung der Fließfähigkeit [21].

Am verbreitetsten ist die Zumischung des Konzentrats in das Wasser über das Injektorprinzip, welches mit dem physikalischen Prinzip der Venturi-Düse arbeitet.

Der Gesamtdruck einer Flüssigkeit setzt sich aus dem statischen und dem dynamischen Druck zusammen. Der statische Druck ergibt sich aus der potenziellen Energie einer Flüssigkeit. Der dynamische Druck entsteht aus der kinetischen Energie einer Strömung. Der dynamische Druck nimmt für eine ruhende Flüssigkeit den Betrag null an und steigt durch die Zuführung von kinetischer Energie proportional zum Abfall des statischen Drucks [22]. Durch die Verengung des Leitungsdurchmessers steigt die Strömungsgeschwindigkeit, also die kinetische Energie, um einen gleichbleibenden Flüssigkeitsdurchsatz zu erreichen. Der statische Druck der Flüssigkeit muss hierfür notwendigerweise sinken, damit der Gesamtdruck konstant bleibt.

Wenn die Fließgeschwindigkeit des Wassers hoch genug ist, sinkt der dynamische Druck unter den Umgebungsdruck. Das Schaummittel wird in diesem Moment durch den Umgebungsdruck in den Zumischer gedrückt und vermischt sich dort mit dem Wasser. Anschließend wird der Leitungsdurchmesser wieder erweitert. Durch die Regulierung des Durchmessers der Zumischerleitung kann die Zumischrate eingestellt werden (Abb. 8). Der Vorteil dieser Art der Zumischung ist die zuverlässige Technik, die genaue Zumischung und der verhältnismäßig geringe Beschaffungspreis der benötigten Gerätschaften. Die Empfindlichkeit der Anlage gegen Druckschwankungen und der hohe Druckverlust von $\approx 30\%$ wirken sich nachteilig aus.

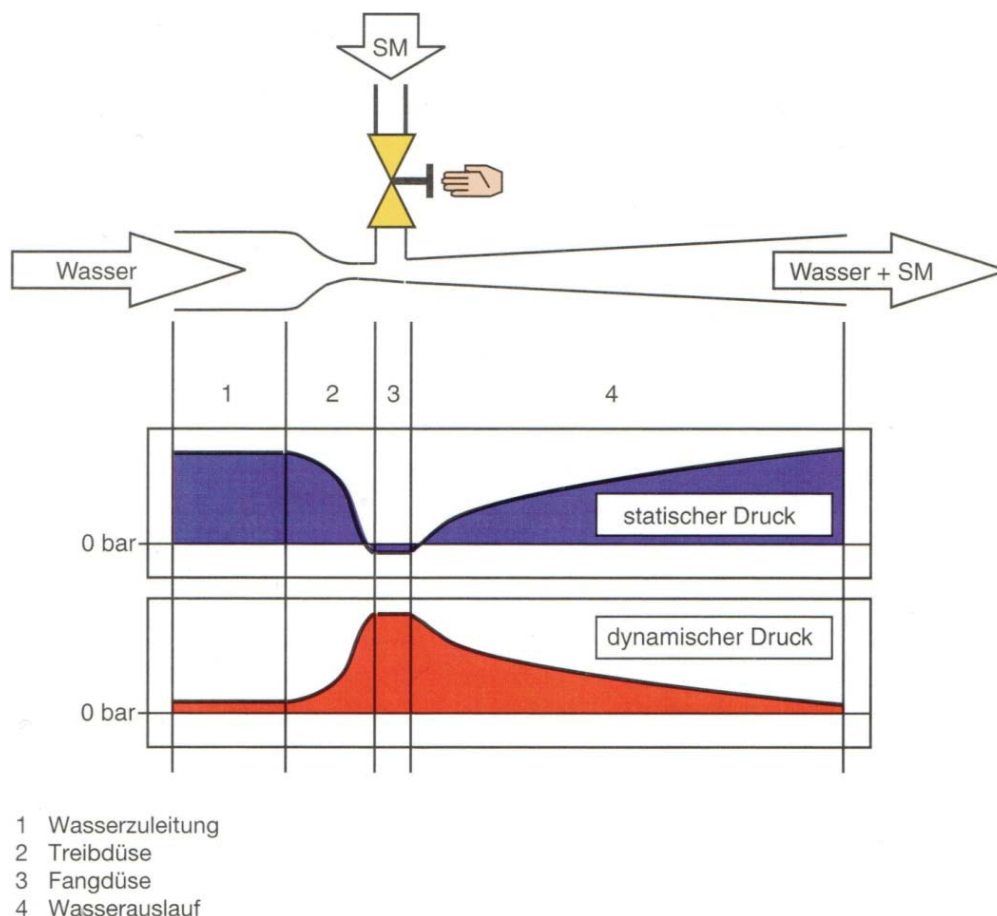


Abb. 8: Druckverhältnisse im Zumischer [1]

Eine weitere Möglichkeit besteht in der direkten Zumischung des Schaummittels über externe Pumpen in die Löschwasserleitungen. Der Vorteil dieser Art der Zumischung ist die schnelle Einsatzbereitschaft der Anlage, der geringe personelle Aufwand bei der Bedienung und eine einfache Variation der genauen Zumischrate. Als Nachteil haben sich die sehr hohen Beschaffungskosten einer solchen Anlage sowie der hohe Schulungsaufwand für die Benutzer erwiesen.

Eine besondere Art dieser Anlagen wird als CAFS (Compressed Air Foam System) bezeichnet. Diese Anlage ist neben der Schaummittelförderpumpe weiterhin mit einem Kompressor ausgestattet. Dieser erlaubt eine variable Verschäumung bereits unmittelbar hinter der Feuerlöschkreiselpumpe und nicht erst am Schaumrohr (Abb. 9). Somit kann Löschschaum unabhängig von geeigneter Umgebungsluft auch in verqualmten Innenräumen mit herkömmlichen Strahlrohren erzeugt werden. Hinzu kommt eine Gewichtsersparnis von 80 % - 90 % gegenüber den mit Wasser gefüllten Feuerwehrdruckleitungen [1]. Nachteilig wirkt sich die erhöhte Empfindlichkeit der Schläuche gegen das Knicken und die verringerte Kühlwirkung aus. Dies führte in der Vergangenheit bereits zu schweren Unfällen, beispielsweise in Tübingen [23].

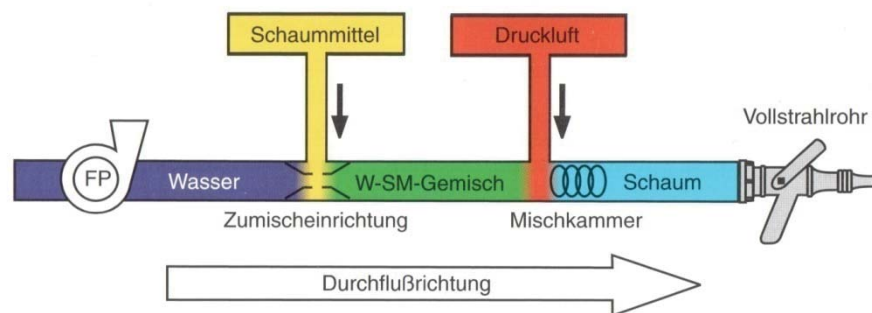


Abb. 9: Schematischer Aufbau einer CAFS-Anlage [1]

Die Schaummittel werden anhand ihrer charakteristischen Eigenschaften in verschiedene Schaummitteltypen unterteilt. Innerhalb jeder Typenklasse kommt es zu variierenden Produkteigenschaften aufgrund von herstellerepezifischen Schwankungen. Die schematische Aufstellung in *Tab. 4* kann daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben und dient der Orientierung.

	SM-Typ	Erzeugte Schaumart	Vorteile	Nachteile
Proteinschaummittel	Proteinschaum (P)	Schwer	- Gute biologische Abbaubarkeit	- Haltbarkeit des Konzentrates - Keine Wasserfilmbildung - Brandgutaufnahme des Schaums bei direkter Aufgabe
	Fluorierte Proteinschäume (FP)	Schwer	- Geringe Brandgutaufnahme bei direkter Aufgabe	- Schlechte biologische Abbaubarkeit der Fluortenside - Haltbarkeit des Konzentrats
	Filmbildende, fluorierte Proteinschäume (FFFP)	Schwer	- Gute Gleiteigenschaften auf Flüssigkeiten durch Fluortenside - Bildung eines Wasserfilms/Polymerfilms - Geringe Brandgutaufnahme bei direkter Aufgabe - Auch als AR* erhältlich	- Schlechte biologische Abbaubarkeit der Fluortenside - Haltbarkeit des Konzentrats
Synthetische Schaummittel	Wasserfilmbildende Schäume (AFFF)	Schwer Mittel	- Gute Gleiteigenschaften auf Flüssigkeiten durch Fluortenside - Bildung eines Wasserfilms/Polymerfilms - Geringe Brandgutaufnahme bei direkter Aufgabe - Auch als AR* erhältlich	- Schlechte biologische Abbaubarkeit der Fluortenside
	Mehrbereichschaummittel (MBS)	Schwer Mittel Leicht	- Biologisch abbaubar - Erzeugung div. Schaumarten mögl. - Einsatz als Netzmittel mögl.	- Keine Wasserfilmbildung - Brandgutaufnahme des Schaums bei direkter Aufgabe
	Klasse-A-Schaummittel	Schwer Mittel Leicht	- Biologische Abbaubarkeit - Geringe Zumischung - Einsatz als Netzmittel	- Aufwendige Technik für uneingeschränkte Nutzung erforderlich

Tab. 4: Schaummitteltypen

*AR: Alkohol Resistent; d.h. zur Aufgabe auf polare Flüssigkeiten geeignet

Klasse-A-Schaum kann sowohl durch Venturi-Zumischer als auch durch CAFS zugemischt werden. Eine variable Druckluftverschäumung von CAFS macht die Erzeugung von Schaum mit ganz verschiedenen Eigenschaften möglich [2].

Typ	Bezeichnung	Zumischung	VZ	Eigenschaften
1	sehr trocken	0,6 % - 1,0 %	44	- trockene, starre und fluffige Struktur - gute Hafteigenschaften auch an vertikalen Flächen - bildet sehr kleine Luftblasen - windanfällig
2	trocken	0,5 % - 0,6 %	22	- Konsistenz von Rasierschaum - weniger starre Struktur - läuft vertikale Flächen nicht sofort hinunter - bildet kleine Luftblasen
3	medium	0,3 % - 0,5 %	15	- Konsistenz von wässrigem Rasierschaum - keine starre Struktur - läuft vertikale Flächen langsam hinunter - bildet kleine bis mittlere Luftblasen - bester Allroundschaum
4	medium bis nass	0,2 % - 0,3 %	11	- wässrige Konsistenz - läuft vertikale Flächen hinunter - hat wenig Form - bildet kleine bis moderat große Luftblasen - gut geeignet um in poröse Stoffe einzudringen
5	nass	0,1 % - 0,2 %	8	- sehr wässrige Konsistenz - läuft vertikale Flächen schnell hinunter - hat keine Form - kleine bis große Luftblasen

Tab. 5: Class-A-Foams [2]

3.2. Aufbau

Die Proteine in den gleichnamigen Schaummitteln bestehen aus kurzkettigen Eiweißverbindungen, welche durch die hydrolytische Spaltung natürlicher, vorzugsweise tierischer Eiweiße, gewonnen werden (z.B. Horn oder Blut).

Synthetische Tenside werden im Wesentlichen aus natürlichen Fetten gewonnen. Diese bilden die Grundlage für die heutzutage hauptsächlich verwendeten Schaummittel; Proteinschaummittel werden hingegen nur noch selten eingesetzt. Dies ist in nachteiligen Eigenschaften wie in einer vergleichsweise geringeren Haltbarkeit oder Löschwirkung begründet [21].

Schaummittel bestehen im Wesentlichen aus vier Komponenten:

- Schaumbildner: Senken die Oberflächenspannung von Wasser

Die Bildung von stabilem Schaum wird so begünstigt. Schaumbildner bestehen typischerweise aus den bereits genannten Proteinen oder Tensiden

- Fluortenside und –polymere: Steigerung der Löschwirkung
Durch den Zusatz dieses Additivs bildet sich ein Wasserfilm, auf dem der Schaum besser über das Brandgut gleiten kann. Die Einlagerung von Brandgut in den Schaum, bei einer direkten Aufgabe auf eine brennbare Flüssigkeit, wird geringer und der Schaum damit widerstandsfähiger.
- Lösungsvermittler: Stabilisierung des Schaummittelkonzentrats
Verhindern die Auftrennung des Schaummittelkonzentrats in verschiedene Phasen oder die Abscheidung einzelner Inhaltsstoffe.
- Frostschutzzusätze: Herstellung einer Frostbeständigkeit

3.2.1. Schaumbildner

Die wichtigsten Aufgaben der Kohlenwasserstofftenside (kurz: Tenside genannt) sind die Schaumerzeugung und nicht benetzbare Oberflächen benetzbar zu machen.

Tenside bestehen aus einem wasserliebenden (sog. hydrophilen) sowie einem Fett und Öl liebenden (sog. lipophilen) Molekülteil. Der lipophile Molekülteil stößt Wasser gleichzeitig ab; er ist hydrophob (Abb. 10).

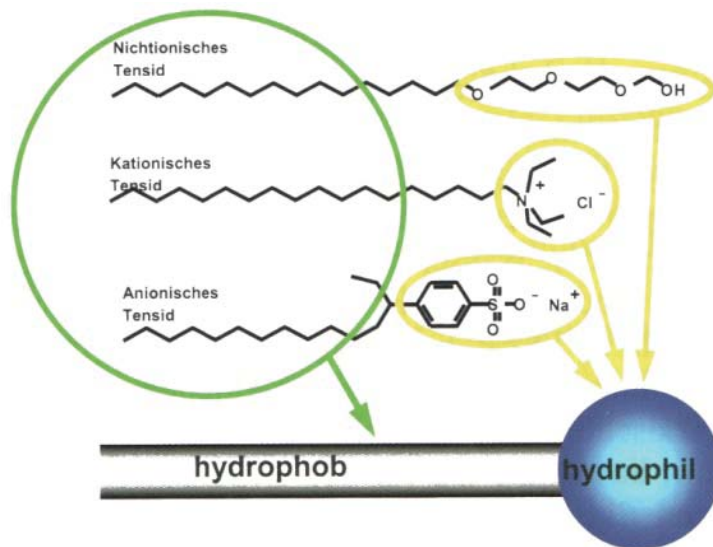


Abb. 10: Tenside, Struktur und Funktion [25]

Wenn der hydrophile Molekülteil eine positive Ladung trägt wird von einem kationischen Tensid gesprochen. Ein negatives Ladungsteil wird als anionisches Tensid bezeichnet. Nichtionische Tenside tragen demnach keine Ladung.

Im polaren Wasser orientieren sich die Tenside mit dem hydrophoben Molekülteil aus dem Wasser heraus. Der hydrophile Teil des Moleküls taucht in das Wasser ein (Abb. 11). Wenn die gesamte Wasseroberfläche mit Tensiden belegt ist, kann die Oberflächenspannung um ca. 65 % gesenkt werden. Dieser Effekt wird unter 3.4.4. *Oberflächenspannung der Schaummittellösung* näher beschrieben.

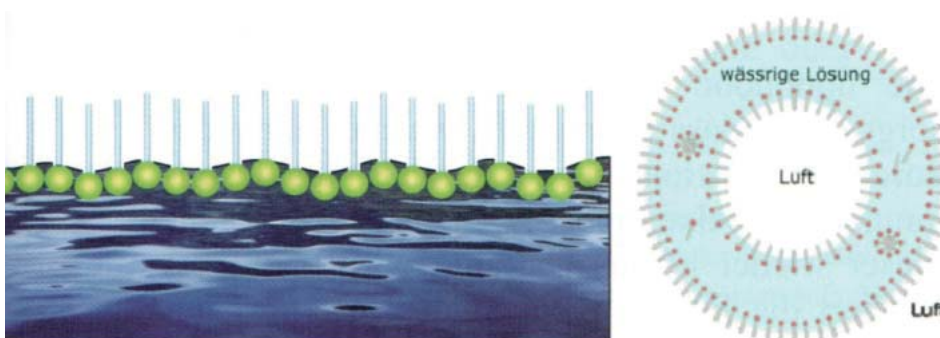


Abb. 11: Orientierung der Tenside im Wasser sowie der mikroskopische Aufbau einer Schaumblase [25]

Diese besondere Ausrichtung lässt Tenside zum Vermittler zwischen Wasser und Fetten bzw. Ölen werden (Abb. 12). Die beiden eigentlich nicht mischbaren Komponenten werden hierdurch mischbar. Als Netzmittel können Tenside die Benetzung von Oberflächen ermöglichen oder verbessern. Durch diese Eigenschaft ist Löschschaummittel als Netzmittelzusatz in Löschwasser oder als Löschschaum besonders zur Bekämpfung von dreidimensionalen Bränden geeignet. Das Löschmittel kann in rüßige d.h. hydrophobe und feinporige Oberflächen eindringen und an Glutnester in der Tiefe des Materials gelangen. Löschwasser kann so effektiver genutzt werden.

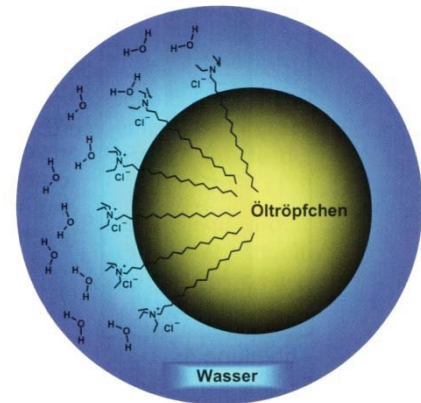


Abb. 12: Gelöstes Öl/Fett im Wasser [25]

3.2.2. Fluortenside und -polymere

Fluortenside unterscheiden sich im funktionellen Aufbau nicht wesentlich von Kohlenwasserstofftensiden. Die ganz erheblichen Unterschiede in den Eigenschaften werden durch die Fluorierung des hydrophoben Molekülteils erreicht (Abb. 13).

Im Gegensatz zu Tensiden stoßen Fluortenside mit dem hydrophoben Molekülteil Wasser und Fett bzw. Öl gleichermaßen ab.

Werden Fluortenside also in eine polare Flüssigkeit gegeben, orientieren sich die Moleküle wie die Kohlenwasserstofftenside (Abb. 14). Auf unpolaren Flüssigkeiten taucht das Fluortensid ebenfalls den hydrophoben Molekülteil ein. In diesem Molekülteil („Schwanzteil“) sind die lipophilen Widerstände weniger stark ausgeprägt als die auf dem anderen Molekülteil („Kopfteil“).

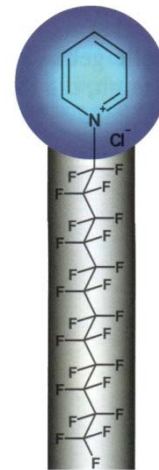


Abb. 13: Aufbau Fluortensid (Bsp.) [25]

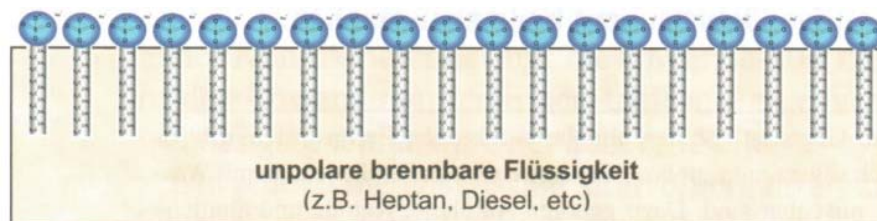


Abb. 14: Orientierung der Kohlenwasserstofftenside auf unpolaren flüssigen Brennstoffen [25]

Werden nun Tenside und Fluortenside zusammen auf eine unpolare Flüssigkeit gegeben, konkurrieren beide Molekülarten darum den hydrophoben Molekülteil in die Flüssigkeit einzutauchen. Dabei ist der rein hydrophobe Molekülteil der Tenside der unpolaren Flüssigkeit ähnlicher als der Molekülteil der Fluortenside. Daher wird die Oberfläche der Flüssigkeit mit der bekannten Ausrichtung der Kohlenwasserstofftenside auf der unpolaren Flüssigkeitsoberfläche belegt. Damit sich das Fluortensid nun energetisch günstig orientieren kann, muss sich ein sehr dünner Wasserfilm auf den Kohlenwasserstofftensiden befinden. In diesem Wasserfilm ist es jetzt möglich den hydrophoben Molekülteil in die Umgebungsluft zu drehen und den hydrophilen Molekülteil in den Wasserfilm. Einem Medium wie Wasser ist es somit möglich auf einem Medium mit geringerer Dichte zu schwimmen.

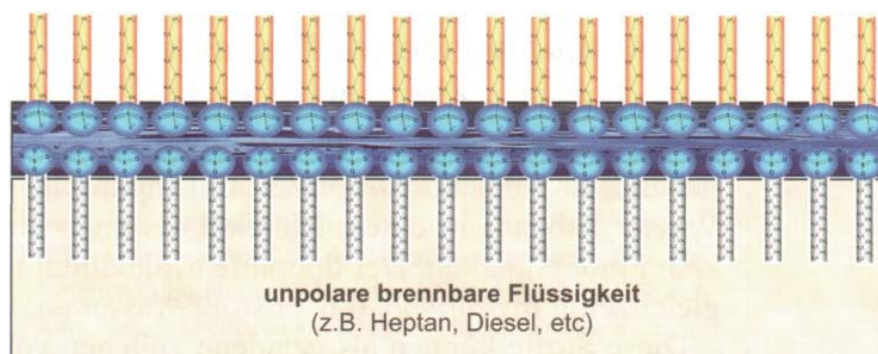


Abb. 15: Ausbildung des Wasserfilms durch Fluortenside auf unpolaren flüssigen Brennstoffen [25]

Dieser Wasserfilm gibt den Schaummitteltypen den sog. Wasserfilmbildnern, AFFF (aqueous film forming foam) oder auch FFFP (film forming fluoro protein) seinen Namen und trägt maßgeblich zum Löscherfolg bei. Der Wasserfilm wirkt dampfunterdrückend und begünstigt die Schaumausbreitung. Aufgrund der gesteigerten Fließfähigkeit kann der Schaum in Bereiche gelangen, welche ansonsten nicht direkt mit Löschmittel abgedeckt werden können. Weiterhin können Beschädigungen des geschlossenen Schaumteppichs schneller wieder geschlossen werden.

Durch die lipophilen Eigenschaften können Brennstoffpartikel, welche durch Verwirbelungen oder Emulsion in den Löschschaum eingedrungen sind, wieder hinaus gedrückt werden. Dies kann beispielsweise durch das direkte Auftreffen des Löschmittelstrahls auf die Flüssigkeitsoberfläche geschehen.

Für Brände polarer Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise Alkohol gelten andere Mechanismen. Sie verhalten sich wie das ebenfalls polare Wasser und sind in der Lage den Schaumteppich zu zerstören. Durch den Zusatz von Polymerfilmbildnern entsteht ein Polymerfilm, welcher die Schaumschicht von der Flüssigkeit trennt. Diese Schicht ist empfindlich und bildet sich nur bei sanfter Schaummittelaufgabe stabil und zusammenhängend aus.



Abb. 16: Schematische Darstellung des Polymerfilms auf einem unpolaren flüssigen Brennstoff [25]

Die Oberflächen von Festkörpern setzen dem Schaumteppich einen wesentlich höheren Strömungswiderstand entgegen. Die Fließgeschwindigkeit von Schaum kann sich dadurch bei Normaltemperatur um den Faktor 3 verringern [24]. Der von der Höhe und dem erzeugten Eigengewicht des Schaumteppichs abhängige Fließdruck muss für die Ausbreitung auf Festkörpern höher sein [25].

3.3. Funktion

Bei einer Verbrennung handelt es sich, wie bereits im Kapitel der Holzverbrennung erwähnt wurde, um eine extrem schnell ablaufende Oxidation. Damit eine Oxidation stattfinden kann müssen ein Oxidationsmittel, ein zu oxidierender Stoff und eine ausreichende Reaktionsstartenergie im richtigen Mischungsverhältnis vorhanden sein. Für den Verbrennungsprozess bedeutet dies die Anwesenheit von brennbarem Material als zu oxidierendes Material, Luftsauerstoff als Oxidationsmittel, das Erreichen der Zündtemperatur sowie das richtige Mischungsverhältnis untereinander. Das Zusammenwirken ist im sogenannten Verbrennungsdreieck dargestellt (Abb. 17). Feuerlöschmittel stören dieses Zusammenwirken und stoppen so die Verbrennungsreaktion. Die Art und Weise der Störung ist löschmittelabhängig.



Abb. 17: Verbrennungsdreieck [75]

Die Löschwirkung von Schaum beruht auf mehreren verschiedenen Faktoren und Effekten. Diese sind bei jeder Schaumart anders gewichtet und verteilt. Die Kombination der verschiedenen Vorgänge begründet die hervorragenden Löscheigenschaften.

- Trenneffekt

Eine geschlossen aufgebrachte Schaumdecke verhindert die Versorgung der Verbrennungsreaktion mit dem Oxidationsmittel.

- Kühleffekt

Die aus dem Schaumteppich austretende Schaummittellösung kühlt das Brandgut und senkt damit die Reaktionsgeschwindigkeit. Das dabei verdampfende Wasser bindet zusätzlich Energie.

Der hohe Wasseranteil in Schwerschaum macht diesen besonders bei glutbildenden Feststoffbränden zum geeigneten Löschmittel.

- Deckeffekt

Das weitere Ausgasen des Brennstoffes wird durch den Schaumteppich verhindert oder verzögert. Die austretenden Pyrolysegase können nicht in die Reaktionszone vordringen und dort reagieren.

- Verdrängungseffekt

Leicht- und Mittelschaum können in geschlossenen Räumen (z.B. Tunnelanlagen, Kellerräume) den Sauerstoff sowie die brennbaren Gase verdrängen.

- Dämmeffekt

Der Schaumteppich schützt brennbare Stoffe vor einer Beaufschlagung mit Wärmestrahlung oder anderen Zündquellen [26].

3.4. Normung

Schaummittel werden nach der EN 1568 genormt, die in vier Teile untergliedert ist:

- EN 1568 – 1: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten
- EN 1568 – 2: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Leichtschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten
- EN 1568 – 3: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwerschaum zum Aufgeben auf nicht polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten
- EN 1568 – 4: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwerschaum zum Aufgeben auf polare (mit Wasser mischbare) Flüssigkeiten

Alle Teile der Norm sind im Oktober 2000 erschienen und im Juni 2008 einer geringfügigen Berichtigung unterzogen worden.

Die EN 1568 bezieht sich auf die Normung von Feuerlöschschaum für die Brandbekämpfung von nicht-polaren und polaren Flüssigkeiten. Die Bestimmung des Löschvermögens beschränkt sich daher auch auf die Brandbekämpfung eines Flüssigkeitsbrands. Dabei muss eine mit Heptan (EN 1568 – 1 bis 3) oder Aceton bzw. Isopropanol (EN 1568 –4) gefüllte Wanne abgelöscht werden. Weiterhin sind in der Norm zahlreiche Anforderungen an die Eigenschaften des jeweiligen Schaummittels formuliert. Die Anforderungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Die Details sind der EN 1568, 2008 [27] im Original zu entnehmen.

Alle Prüfungen sind bei einer Probentemperatur von (20 ± 1) °C durchzuführen, damit sich keine Unterschiede durch veränderte Molekülbewegungen ergeben.

3.4.1. Sediment des Schaummittels

Das Sediment bezeichnet die unlöslichen Teilchen im Schaummittelkonzentrat. Dieses trägt nicht mehr zur Schaumbildung bei und ist geeignet die Funktion der Brandbekämpfungsgeräte zu beeinträchtigen. Der Sedimentanteil im Schaummittelkonzentrat sollte daher möglichst gering sein; viele Schaummittel werden vom Hersteller als Sedimentfrei bezeichnet [28].

Zur Bestimmung des Sedimentanteils werden zwei repräsentative Proben des zu prüfenden Schaummittels benötigt. Die eine Probe wird bei Raumtemperatur und eine zweite Probe unter erhöhter Temperatur (zur künstlichen Alterung) in einem Wärmeschrank gelagert. Anschließend werden beide Proben zentrifugiert. Der abgesetzte Volumenanteil von sedimentierten Teilchen darf einen Anteil von 0,25 % in der bei Raumtemperatur gelagerten und 1 % in der gealterten Probe nicht

überschreiten. Der Inhalt jeder Probe muss anschließend rückstandsfrei durch ein feines Sieb gespült werden können.

3.4.2. Viskosität des Schaummittels

Die Viskosität bezeichnet die Fließeigenschaften eines Fluids. Eine hohe Viskosität meint dabei dickflüssige Fluide mit hohen Kohäsionskräften zwischen den einzelnen Fluidmolekülen. Schaummittel können eine gleichbleibende (Newtonsche) oder in Abhängigkeit der Scherkräfte veränderliche (Pseudoplastische) Viskosität besitzen.

Die Messung der Newtonschen Viskosität erfolgt mit einem Kapillarviskosimeter. Hierbei wird die Zeit gemessen, welche eine Flüssigkeit benötigt, um eine kapillarförmige Röhre zu durchfließen. Aus dem Produkt der Kapillargeometrie (K-Faktor) und der Durchflusszeit ergibt sich die Viskosität. Die Messung erfolgt nach der EN ISO 3104. Wenn die Viskosität bei der vom Hersteller angegebenen tiefsten Einsatztemperatur mehr als $200 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ beträgt, muss das Schaummittel mit der Aufschrift „Dieses Schaummittel kann eine besondere Dosiereinrichtung erfordern“ gekennzeichnet werden.

Im Gegensatz zur Newtonschen verhält sich die Pseudoplastische Viskosität nicht linear. Ab einer kritischen Schergeschwindigkeit nimmt die Viskosität des Fluids ab. Um die Pseudoplastische Viskosität zu bestimmen wird das Schaummittel in ein Rotationsviskosimeter gegeben. Diese Messgeräte drehen einen Prüfkörper in dem Fluid. Aus dem Verhältnis des benötigten Drehmoments für die Bewegung des Körpers und der Umdrehungsgeschwindigkeit kann die Viskosität bestimmt werden. Diese ist nach der EN ISO 3219 bei verschiedenen Fluidtemperaturen und Umdrehungsgeschwindigkeiten zu bestimmen und zu protokollieren. Der Behälter wird mit der Aufschrift „Pseudoplastisches Schaummittel. Dieses Schaummittel kann eine besondere Dosiereinrichtung erfordern“ versehen, wenn bei der niedrigsten vom Hersteller angegebenen Einsatztemperatur und einem Schergefälle von 375 s^{-1} die pseudoplastische Viskosität $\geq 120 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ beträgt.

3.4.3. pH-Wert des Schaummittels

Der pH-Wert ist ein Maß für die Aktivität bzw. Konzentration freier Wasserstoff-Ionen in Lösungen. Als Maßzahl wird der negative, dekadische Logarithmus der molaren Konzentration verwendet. Der pH-Wert 6,0 gibt daher an, dass 10^{-6} mol/l -Ionen Wasserstoff in Form von H_3O^+ -Ionen im Schaummittelkonzentrat vorhanden sind; bei pH-Wert 5 das 10-fache.

Die pH-Wertskala reicht von 0 bis 14 und hat den neutralen Punkt bei pH-Wert 7. An diesem Punkt ist die molare Konzentration von H_3O^+ und OH^- Ionen gleich groß. Unterhalb liegt der saure, oberhalb der alkalische Bereich [5].

Eine einfache Messung des pH-Wertes kann mit pH-Papier erfolgen, welches sich in Abhängigkeit von der Ionenkonzentration verfärbt. Eine elektronische Messung ist ebenfalls möglich.

Der pH-Wert des Schaummittels darf nicht unter 6,0 und nicht über 9,5 liegen. Dies entspricht einem Äquivalentwert von Mineralwasser im unteren und einem von Seife im oberen Bereich.

Der stark abfallende pH-Wert eines Schaummittels gilt als Anhaltspunkt für eine vorzeitige Alterung und ein Nachlassen der Löschleistung [29].

3.4.4. Oberflächenspannung der Schaummittellösung

Die Oberflächenspannung bezeichnet das Verhältnis zwischen der zur Vergrößerung der Oberfläche erforderlichen Arbeit und der Oberflächenänderung. Die Oberflächenspannung ist eine Folge der Kohäsion d.h. der Bindungskräfte zwischen Atomen bzw. Molekülen. In einer Flüssigkeit heben sich die Kohäsionskräfte gegenseitig auf. Bei Molekülen in der Nähe der Oberfläche bleibt jedoch eine nach innen gerichtete Restkraft bestehen. Diese Kraft muss überwunden werden, wenn ein Molekül an die Oberfläche gebracht werden soll.

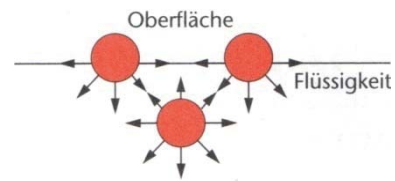


Abb. 18: Schematische Darstellung der Kohäsionskräfte [22]

Um die Oberflächenspannung zu bestimmen, wird ein Ring bzw. Bügel oder eine Platte aus Metall in eine Schaummittellösung eingetaucht. Anschließend wird diese langsam vertikal aus der Flüssigkeit gezogen [22]. Das aufgebrachte Kraftmaximum entspricht der Oberflächenspannung.

Die Prüfung ist nach ISO 403 durchzuführen und unter Angabe des Verfahrens (Ring bzw. Bügel oder eine Platte aus Metall) zu protokollieren.

Das zur Prüfung verwendete Schaummittel ist einer Temperaturbehandlung zu unterziehen. Hierzu wird das Schaummittel einer erhöhten Temperatur ausgesetzt und durch das Absaugen der oberen Hälfte des ruhenden Schaummittels geteilt. Bei einem auch für niedrige Temperaturen geeigneten Schaummittel ist dieser Vorgang ebenfalls bei niedrigen Temperaturen durchzuführen.

Zum anschließenden Ansetzen der Schaummittellösung, nach der jeweiligen Gebrauchskonzentration, wird destilliertes Wasser nach EN ISO 3696 oder entsalztes Wasser mit einer Oberflächenspannung größer 70 N/m verwendet.

Die behandelten Proben dürfen keine geringere als die 0,95-fache und keine größere als die 1,05-fache Oberflächenspannung als die ursprüngliche Probe aufweisen.

3.4.5. Spreitungskoeffizient der Schaummittellösung

Der Spreitungskoeffizient weist auf die Möglichkeit der Wasserfilmbildung eines Schaummittels hin. Ein vom Hersteller als wasserfilmbildendes Schaummittel bezeichnetes Produkt muss daher einen positiven Spreitungskoeffizienten aufweisen.

Es bietet sich an, die bereits zur Verwendung der Oberflächenspannung angesetzte Schaummittellösung für die folgende Prüfung weiter zu verwenden.

Zur Bestimmung wird eine Schicht aus Cyclohexan auf die Schaummittellösung gegeben und die Grenzflächenspannung zwischen der Schaummittellösung und dem Cyclohexan bestimmt.

Der Spreitungskoeffizient ergibt sich anschließend aus der Oberflächenspannung des Cyclohexans abzüglich der Oberflächenspannung des Schaummittels und der Grenzflächenspannung zwischen der Schaummittellösung und dem Cyclohexan.

3.4.6. Bestimmung von Verschäumung und Wasserabscheidung

Die Verschäumungszahl ist die Grundlage für die Berechnung des erzeugten Schaumvolumens bei einem definierten Durchfluss und Druck.

Das zur Prüfung verwendete Schaummittel ist der gleichen Temperaturbehandlung zu unterziehen, wie das zuvor für die Bestimmung der Oberflächenspannung genutzte Schaummittel.

Wenn der Hersteller ein meerwasserträgliches Produkt anbietet, sind neben den mit Trinkwasser angesetzten Schaummittellösungen weitere Proben mit Meerwasser oder künstlichem Meerwasser anzusetzen (Tab. 6).

% Massenanteil	Bestandteil	
2,50	Natriumchlorid	NaCl
1,10	Magnesiumchlorid	MgCl ₂ · 6 H ₂ O
0,16	Calciumchlorid	CaCl ₂ · 2 H ₂ O
0,40	Natriumsulfat	Na ₂ SO ₄
95,84	Trinkwasser	

Tab. 6: Zusammensetzung künstliches Meerwasser [27]

Anschließend wird durch die Verschäumung der Schaummittellösung der Löschschaum erzeugt und in einem Gefäß bekannter Größe gesammelt. Die Verschäumungszahl ergibt sich aus dem Quotienten von Schaumvolumen zum Schaumgewicht. Der Kehrwert der Verschäumungszahl ist, unter der Vernachlässigung des Gewichtes der Luft, die Dichte [21].

Alle ermittelten Werte der einzelnen Proben dürfen untereinander nicht mehr als 20 % voneinander abweichen, um die Prüfung zu bestehen. Durch die Bildung des arithmetischen Mittels wird abschließend ein Einzelwert gebildet.

Die Bestimmung der Wasserabscheidung erfolgt im Anschluss an die Bestimmung der Verschäumungszahl. Die Wasserabscheidung ist abhängig von den Eigenschaften des Schaumbildners, der Schaumhöhe und der Verschäumungszahl. Letztere ist kein statischer Wert und ändert sich mit zunehmendem Alter des Schaums. Bewegter Schaum zerfällt wesentlich schneller ohne wesentliche Änderung der Entwässerungsgeschwindigkeit [21].

Eine Ablassvorrichtung im unteren Teil des Schaumauffanggefäßes wird geöffnet und die Zeit gemessen, bis sich 25 % bzw. 50 % des im Schaum enthaltenen Wassers in einem Messbecher gesammelt haben (Abb. 19).

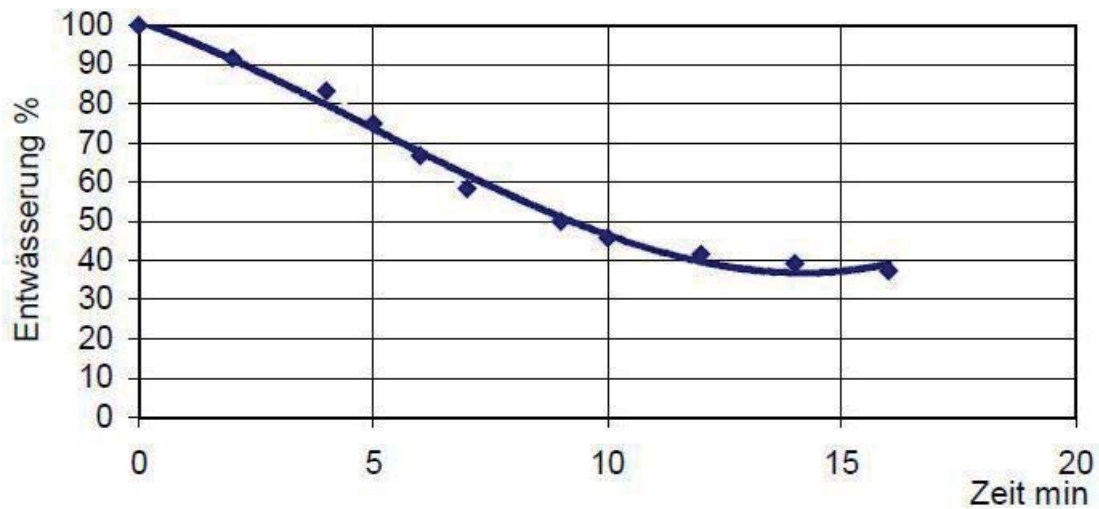


Abb. 19: Beispiel für die Wasserabscheidung von Schwerschaum; Schaumhöhe 30 cm [3]

Eine geringe Wasserabscheidung bedeutet eine lange Standzeit des Schaums. Ist die Wasserabscheidungsrate zu gering, tritt zu wenig Löschwasser aus und das Feuer kann unter Umständen unter der Schaumdecke weiter brennen und sich ausbreiten [1].

Die Wechselwirkungen der Tensidmoleküle an der Grenzfläche der Schaumblase nehmen immer mehr zu, je dünner die Lamelle wird. Dadurch wird das in der Lamelle enthaltene Wasser stärker zurück gehalten. Schwerschaum besitzt dickere Lamellen als Leichtschaum und entwässert damit schneller. Freigesetztes Wasser aus dem Inneren des Schaumteppichs kann von darunter gelegenen Schaumblasen wieder aufgenommen werden. Die Schaumhöhe und die damit verbundene Verschäumungszahl haben somit einen zusätzlichen Einfluss auf die Wasserhalbwertzeit. Deshalb sind beide Parameter zusammen zu bestimmen [21].

3.5. Zusammenfassung

Aufgrund der grundsätzlich ähnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Schaummitteltypen können die Anforderungen der EN 1568, 2008 [27] auch für Klasse-A-Schäume übernommen werden.

Die Ermittlung des Spreitungskoeffizienten kann jedoch entfallen, da die Ausbildung eines Wasserfilms nur auf unpolaren Flüssigkeiten zu erwarten ist. Es könnte stattdessen mit einem geeigneten Verfahren die Fließfähigkeit des Schaums auf einem festen Untergrund ermittelt werden.

Auf Grundlage der bisherigen Ausführungen über die Holzverbrennung und den Löschschaum, werden im folgenden Hauptteil die Anforderungen an die Prüfgeräte und das Material sowie ein geeigneter Prüfungsablauf entwickelt.

4. Dimensionierung des Prüfkörpers

Die Konzeptionierung eines Prüfkörpers hat immer das Ziel ein reales Brandszenario möglichst genau nachzuempfinden. Hierfür wären Prüfungen an maßstabsgetreuen Versuchsaufbauten am förderlichsten.

In der Praxis stehen dieser Überlegung die Reproduzierbarkeit und Durchführbarkeit der Prüfung entgegen. Es gilt daher möglichst realistische und reproduzierbare Brandversuche bei geringen Prüfungskosten durchzuführen.

Eine einfache Möglichkeit dies umzusetzen wäre es beispielsweise Abbruchgebäude als Prüfkörper zu nutzen, wie dies bereits in der Vergangenheit in den USA getan wurde [1]. Hierbei ist das Problem, dass sich in Abhängigkeit von der Bauweise, den verwendeten Materialien und nicht zuletzt den Umgebungsbedingungen ein unterschiedliches Abbrandverhalten ausbildet. Eine Reproduzierbarkeit der Prüfung ist somit nicht gegeben.

Eine Alternative dazu wäre die Konzeptionierung eines einheitlichen Gebäudes, welches in einer Versuchshalle abgebrannt werden würde. Ein solches Vorgehen könnte ein einheitliches Abbrandverhalten sicherstellen. Aufgrund der Bauweise des Prüfkörpers müsste die Ausbringung des Löschmittels durch einen menschlichen Strahlrohrführer erfolgen. Auch dies führt wieder zu Variationen im Prüfungsablauf und zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Der Entwurf eines kleinen und überschaubaren Prüfkörpers erscheint daher zielführender. Durch eine geeignete Geometrie und Dimensionierung kann ein reales Brandszenario nachempfunden werden und ebenfalls eine Ausbringung des Löschmittels ohne menschlichen Strahlrohrführer erfolgen.

Der Versuch den Löschschaum beispielsweise auf der ebenen Fläche eines Holzbrettes zu prüfen, würde den Prüfungsablauf vereinfachen und eine reproduzierbare Beschäumung ermöglichen. Aufgrund der schlechten Zündbarkeit des kompakten Holzmaterials ist dieses für ein solches Vorgehen jedoch nicht geeignet. Weiterhin ist eine für Feststoffbrände typische dreidimensionale Struktur nur an der Oberfläche und nicht durch einen Prüfkörperaufbau gegeben. Dieser erschwert das direkte Beaufschlagen des kompletten Prüfkörpers mit Löschmittel und stellt damit besondere Anforderungen an das Löschmittel [3].

Als hierfür geeignete Prüfkörper haben sich in der Vergangenheit Holzprüfkrippen gezeigt. Es handelt sich dabei um abwechselnd längs und quer übereinander gestapelte Holzstäbe. Diese Prüfkörper werden in verschiedenen aktuellen und zurückgezogenen deutschen und europäischen Normen zur Bestimmung des Löschvermögens von Handfeuerlöschern genutzt [30] [31].

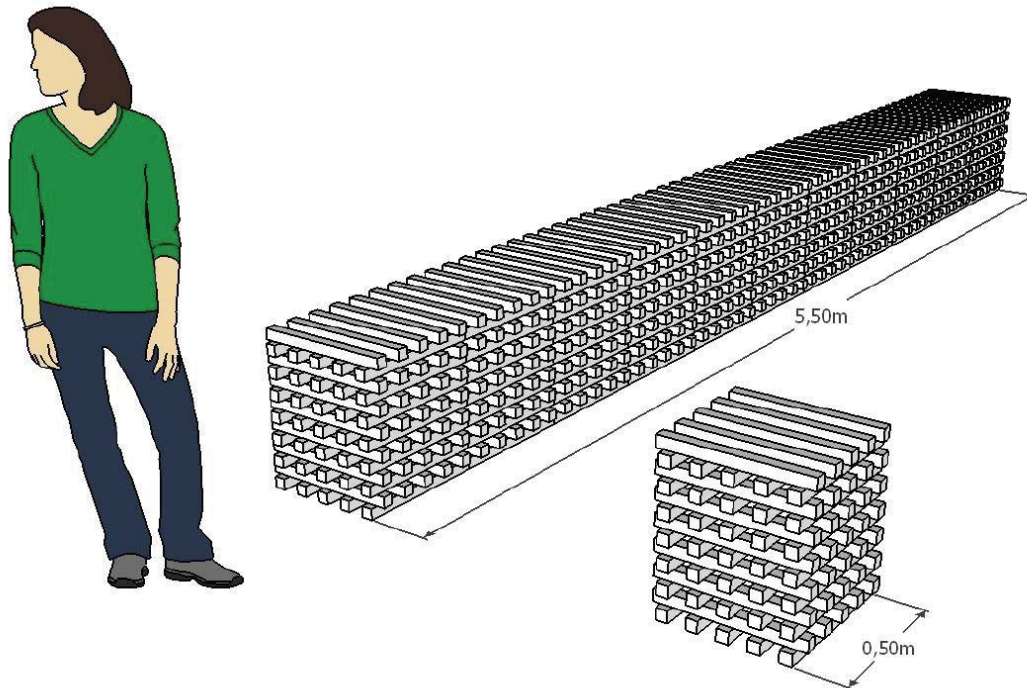


Abb. 20: Größenvergleich des kleinsten und des größten Holzprüfkörper nach DIN EN 3, 2007 [30] (Höhe & Breite 0,5m)

Die Brandeigenschaften dieser Prüfkörper lassen sich variieren und somit verschiedene Brandszenarien nachstellen. Insgesamt ist so die Verwendung einer großen Brandlast mit einer hohen Abbrandrate auf einem engen Raum möglich. Eine Auslegung zur Ausbringung des Löschmittels ohne menschlichen Strahlrohrführer wäre ebenfalls möglich, wenn auch aktuell nicht genutzt.

Der dreidimensionale Aufbau der Holzprüfkrippe besitzt vertikale sowie nach oben und unten gerichtete horizontale Oberflächen. Diese befinden sich vornehmlich im Inneren des Prüfkörpers. Durch diesen Aufbau ist eine direkte Ausbringung des Löschmittels nicht überall möglich. Der vollständige Löscherfolg stellt sich jedoch erst nach einer flächendeckenden Beschäumung aller Grenzflächen ein. Dies bietet die Möglichkeit neben der primären Löschwirkung auch das Fließverhalten des Löschschaums zu prüfen.

Die Größe der verwendeten Holzprüfkrippen variiert zwischen 0,5 m bis 5,5 m in der Länge sowie 0,5 m bis 0,94 m in der Höhe, bzw. der Breite [31] [31]. Um den Prüfungsaufwand möglichst gering zu halten erscheint die Verwendung eines möglichst kleinen Prüfkörpers sehr interessant. Einer Verkleinerung des Maßstabes sind jedoch Grenzen gesetzt.

Es gilt das Löschmittel an einem realistischen Wärmestrahlungsverhalten zu prüfen. Dies ist nur bei Prüfkörpern ab einer gewissen Abmessung möglich. Die erforderlichen Abmessungen basieren auf Erfahrungswerten und sollten eine äußere Seitenlänge von mindestens 1 m besitzen [32].

Mit der zunehmenden Prüfkrippengröße sinkt ebenfalls der Einfluss kleiner Inhomogenitäten im Holz. Als Holzart für die Prüfkrippe hat sich gemeines Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) bewährt und wird auch an dieser Stelle verwendet. Aufgrund der weiten Verbreitung dieser Holzart in den heimischen Wäldern kann es einfach und kostengünstig beschafft werden. Die im Vergleich zu Laubhölzern

vergleichsweise homogenen Abbrandeigenschaften zeichnen dieses Nadelholz aus (*siehe auch 1.1. Holz - Aufbau*). Die Anforderungen an das verwendete Kiefernholz werden unter *6.1. Holzfeuchte*, *6.2. Harzgehalt* und *6.3. Holzdichte* festgelegt und begründet.

4.1. Geometrie des Prüfkörpers

Eine Holzprüfkippe besteht, wie bereits erwähnt wurde, aus abwechselnd in Quer- und Längsrichtung gestapelten Holzstäben. Durch die Abmessungen der einzelnen Stäbe und die Anordnung zueinander können das Abbrandverhalten und damit die Prüfeigenschaften gezielt beeinflusst werden. Es ist von Interesse, welche Oberfläche den Flammen direkt ausgesetzt ist, welche Seitenlänge die Holzstäbe besitzen, wie hoch diese gestapelt sind und wie groß die Abstände der Holzstäbe untereinander sind.

Eine im Verhältnis zum Volumen kleine Oberfläche führt zu einem raschen Wärmeübergang durch Wärmestrahlung und Konvektion in das Holz. Dieses wird thermisch schneller aufbereitet und nimmt damit schneller durch eine exotherme Energiefreisetzung am Verbrennungsprozess teil. Der Prüfkörper kann höhere Temperaturen entwickeln und stellt somit größere Anforderungen an das Löschmittel.

Das gewünschte Oberflächen / Volumenverhältnis wird durch die Formgebung jedes Holzstabs sowie dessen Abmessungen erreicht. Ein quadratischer Holzstirnflächenzuschnitt erzeugt im Vergleich zu einem kreisförmigen oder rechteckigen eine größere Oberfläche bei einem kleineren Volumen. Eine Auslegung des Stabs als Quader würde dieses Verhältnis weiter begünstigen, ist aber für die Umsetzung der Krippenkonstruktion nicht möglich.

Eine Reduzierung der Kantenlängen findet während der gesamten Prüfung durch den Abbrand der Holzstäbe statt. Die als Zwischenprodukt entstehende Holzkohle schützt die darunterliegende Glut im Holzstab vor dem Löschmittel, verfügt jedoch über keinerlei tragende Wirkung. Die Netzmittelwirkung des Schaummittels um bis zur Glut vorzudringen und die erhöhten Anforderungen an die Rückbrandbeständigkeit, aufgrund der längeren Hitzewirkung auf den Löschschaum, werden damit besonders geprüft.

Die Verkürzung der Kantenlängen ist zum Erhalt des tragenden Querschnitts und der verbundenen Prüfkörpergeometrie nicht unbegrenzt möglich. Der Prüfkörper muss während der gesamten Prüfdauer neben seiner Eigenlast zusätzlich das Löschmittel tragen und der punktuellen Krafteinwirkung durch den Löschmittelstrahl standhalten. In der Vergangenheit hat sich bei diversen Versuchen eine Kantenlänge der Holzprüfstäbe von 0,04 m als tauglich erwiesen.

Als Porosität wird das Verhältnis des Gesamtvolumens der Holzstäbe zum Gesamtvolumen des Prüfkörpers definiert. Diese gibt Aufschluss über die Abstände zwischen den einzelnen Holzstäben und damit über die Strömungsverhältnisse innerhalb des Prüfkörpers. Liegen die Holzstäbe zu kompakt, werden die Reibungskräfte für die Zuluft und die Abluft größer. Die Verbrennungszone der flüchtigen Holzbestandteile verlagert sich an die äußere Oberfläche des Prüfkörpers und führt damit zu geringeren Energieströmen im Inneren des Prüfkörpers [3]. Werden die Abstände zu groß, wird die Wärmestrahlung durch die Rauchgase zu stark absorbiert. Ebenso erreichen die Flammen nicht mehr die Holzoberflächen des gegenüberliegenden Stabs, um diese thermisch aufzubereiten. Die heißen Rauchgase ziehen schneller ab und können damit weniger Energie an die Holzoberfläche übertragen [33].

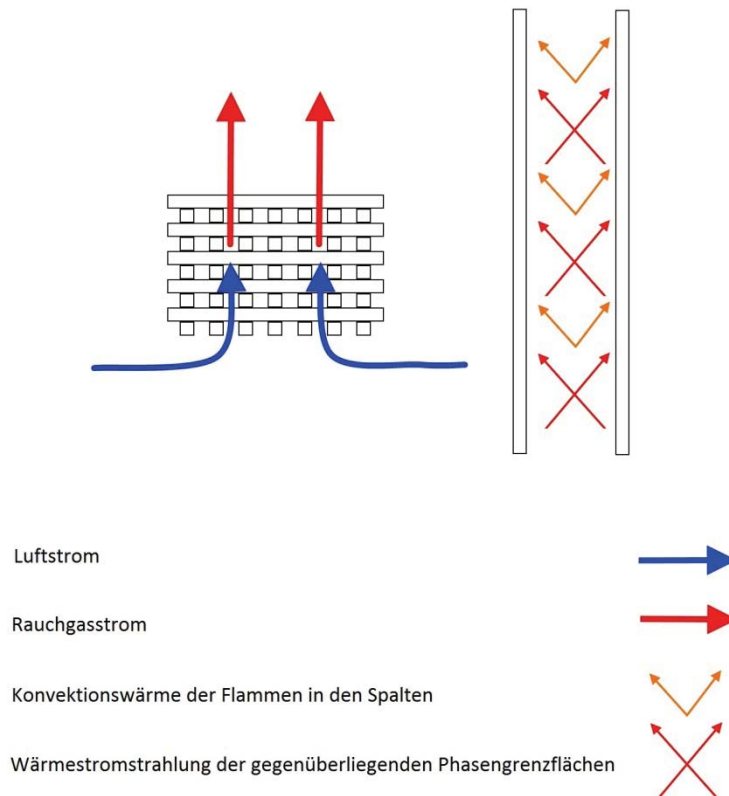


Abb. 21: Strömungsverhältnisse in der Holzprüfkrippe und den Spalten nach [7]

Der Wärmeverlust an die Umgebung bestimmt die maximal erreichbaren Temperaturen des Prüfkörpers. Dabei ist ein Unterschied zwischen der Temperatur der Verbrennungsgase und der Holzoberfläche bzw. Kohle zu machen. Diese werden näher im Abschnitt 6.6. *Wärmestrahlung* behandelt.

Die freigesetzten flüchtigen Bestandteile des Holzes sowie die Zu- und Abluft müssen im Inneren der Prüfkrippe die einzelnen Holzstäbe umströmen. Dies führt zu Strömungsturbulenzen und einem rascherem Mischvorgang gegenüber einer laminaren Strömung [34]. Dies bedingt einen vollständigen oberflächennahen Stoffumsatz.

BREIN, ET. AL., 1975 [33] geben in ihren Untersuchungen eine maximale Abbrandgeschwindigkeit für Kanaldurchmesser mit der 1 bis 3 fachen Größe der Kantenlänge der Holzstabstirnfläche an. In der DIN EN 3, 2007 [30] wird der 1,5 fache Abstand der Kantenlänge verwendet und von PLEß, ET AL., 2000 [3] als Abstand für die maximale Energiefreisetzung bezeichnet. Die Untersuchungen lassen sich bei der Verwendung dieses 1,5 fachen Stababstands zur Deckung bringen. Dieser Abstand wird ebenfalls für die Festlegung der Stababstände des in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörpers gewählt.

Ein geeigneter Prüfkörper besteht damit aus Holzstäben mit einer quadratischen Holzstabstirnfläche, einer Kantenlänge von (40 ± 2) mm und einer Stablänge von (1000 ± 20) m. Die Toleranzen ergeben sich aufgrund des Zuschnitts und des Schwindens bzw. Quellens des Holzes.

Der erforderliche gleichmäßige Abstand der Stäbe untereinander beträgt 0,06 m. Es werden insgesamt 10 Stäbe nebeneinander und 25 Lagen übereinander aufgeschichtet (Abb. 22).

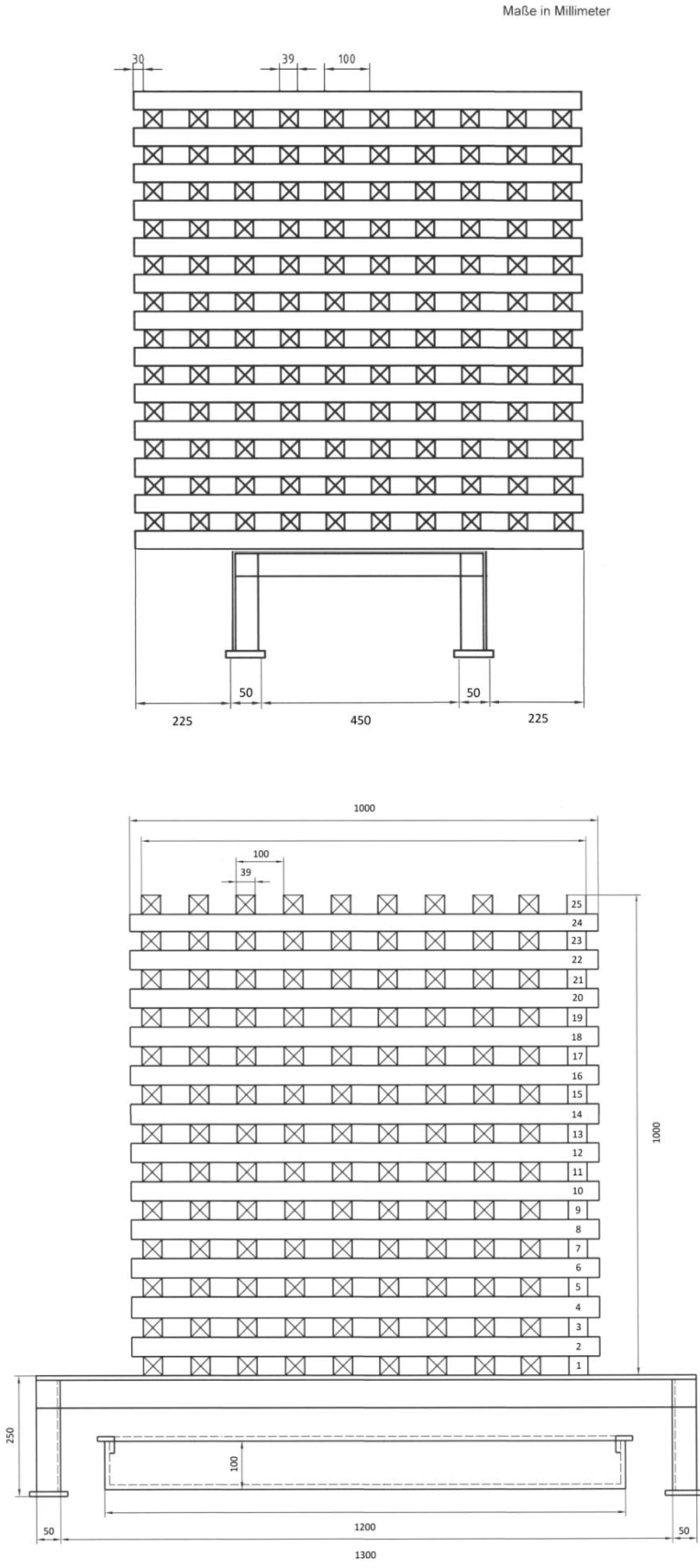


Abb. 22: Prüfkörperabmessungen

Die verwendeten 250 Holzstäbe ergeben ein Gesamtvolumen von $0,4 \text{ m}^3$ bzw. ein Gesamtgewicht von 208 kg. Die Oberfläche, abzüglich der durch die Stapelung verdeckten Flächen, beträgt $33,12 \text{ m}^2$.

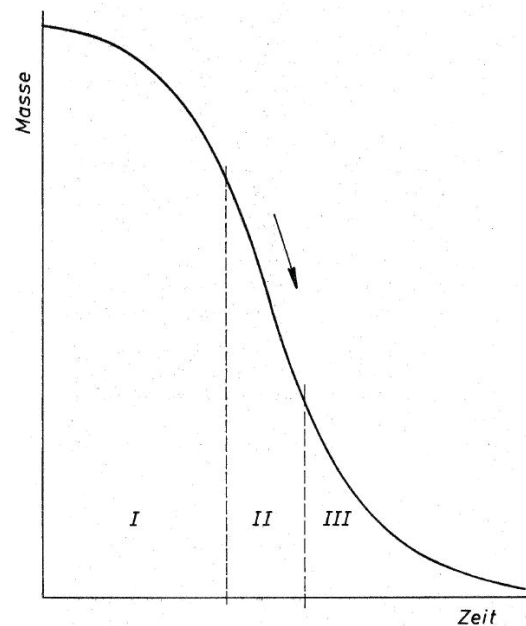
$$V_H = n \cdot N \cdot b^2 \cdot l = 0,4 \text{ m}^3$$

$$m_H = V_H \cdot \rho_H = 208 \text{ kg}$$

$$A_P = n \cdot N \cdot b \cdot (4 \cdot l + 2 \cdot b - 20 \cdot b) + 200 \cdot b^2 = 33,12 \text{ m}^2$$

mit:	A_P	:	$[\text{m}^2]$	Gesamtoberfläche des Prüfkörpers
	m_H	:	$[\text{kg}]$	Masse der Holzprüfkrippe
	V_H	:	$[\text{m}^3]$	Volumen der Holzprüfkrippe
	b	:	$0,04 \text{ m}$	Kantenlänge
	l	:	1 m	Länge der Holzstäbe
	n	:	10	Anzahl der nebeneinander liegenden Holzstäbe
	N	:	25	Anzahl der horizontal gestapelten Holzstäbe
	ρ_H	:	$0,52 \text{ g/cm}^3$	Dichte Kiefernholz [5]

Dieses Gewicht reduziert sich während des Vollbrands der Holzprüfkrippe kontinuierlich. Wenn 50 % der Holzmasse verbrannt sind, sind immer noch 80 % des Ausgangsvolumens bzw. der Oberfläche vorhanden [35].



Bereich I	Brandentwicklungsphase
Bereich II	Stationärer Abbrand
Bereich III	Abklingphase

Abb. 23: Zeitlicher Masseverlust bei einer Holzprüfkrippe [36]

5. Prüfungsgeräte und Material

Damit der Holzprüfkörper entzündet und automatisiert beschäumt werden kann, muss eine Prüfungsplattform genutzt werden.

Weiterhin müssen die zur Verwendung kommenden Materialien in ihrer Qualität und Quantität beschrieben werden.

5.1. Zündung des Prüfkörpers

Die Variation der Prüfkörpergeometrie sowie der Position und Größe der Zündquelle kann in der Brandentstehungsphase verschiedene Brandszenarien nachempfinden [36].

Die flächige Zündung einer Holzprüfkrippe an einer äußeren, unteren Schmalseite (Längsseite >> Schmalseite) soll beispielsweise die Waldbrandausbreitung simulieren. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der horizontalen Verbrennungsfrent ist hierbei von besonderem Interesse.

Die horizontale und vertikale Flammenausbreitung in einer mittig entzündeten Holzprüfkrippe soll die Brandentwicklung in Regellagern sowie Wohn- und Geschäftsgebäuden nachstellen. Bei dieser und der zuvor genannten Möglichkeit befinden sich Holzstäbe an verschiedenen Positionen der Holzprüfkrippe in verschiedenen Phasen des Brands.

Eine dritte Möglichkeit ist die vollflächige Entzündung der Holzprüfkrippe im unteren Bereich. Der gesamte Prüfkörper wird so schnell von den Flammen erfasst. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Möglichkeiten befinden sich dadurch alle Stäbe bzw. Bereiche der Holzprüfkrippe (fast) in der gleichen Brandphase.

Die Brandausbreitung auf den waagerechten Holzflächen mit einer nach oben zeigenden Oberfläche weist eine geringe Geschwindigkeit auf; nach unten ausgerichtete waagerechte Flächen besitzen eine mittlere Flammenausbreitung, da diese durch die anliegenden Flammen besser aufbereitet werden können. Insgesamt ist bei waagerechten Flächen der Stofftransport der verbrannten Gase geringer und kann die Brandausbreitung hemmen. Die vertikalen Flächen werden bei der Brandausbreitung am schnellsten von den Flammen erfasst, da hier der Stofftransport am günstigsten ist [3].

Das Löschen eines Vollbrands mit der maximalen Temperaturentwicklung und einer gebildeten Glutschicht stellt für ein Löschmittel die größte Herausforderung dar und soll getestet werden. Die Wahl zur Prüfung von Löschmitteln fällt daher auf die zuletzt genannte Möglichkeit der Zündung.

Die Entzündung der Holzprüfkrippen durch ein Heißluftgebläse o.ä. bietet eine gute Dosierung der Zündenergie. Diese Art der Zündung erlaubt jedoch nur eine punktförmige Zündung und kommt daher nicht in Betracht.

Die Zündung des Prüfkörpers in der zurückgezogenen schwedischen Norm SS1192, 1985 [31] erfolgte durch Propangas. Dieses wurde durch eine Spiralrohrkonstruktion unter dem Prüfkörper ausgebracht. Die genutzte Gasmenge war abhängig von der Größe des Prüfkörpers. Ein vergleichbarer Holzprüfkörper (quadratischer Prüfkörper; Kantenlänge: 0,94 m) wurde mit insgesamt 0,65 kg/Min Propangas entzündet. Die verwendete Spiralrohrkonstruktion zur flächigen Ausbringung war mit einer Kantenlänge von 1,3 m überlappend ausgeführt. Auf die 1,69 m² große

Grundfläche des Prüfkörpers bezogen, entspricht dies einem Wärmefluss von $\approx 60,4$ MJ in zwei Minuten Brennzeit oder $\approx 35,7$ MJ pro m^2 .

$$\dot{Q}_{PG} = t \cdot \dot{m}_P \cdot \left(\frac{H_P}{\rho_P}\right) = 60,4 \text{ MJ}$$

$$\dot{Q}_P = \frac{\dot{Q}_{PG}}{A_P} = 35,7 \text{ MJ/m}^2$$

mit:	\dot{Q}_P	:	[MJ]	Wärmefluss Propangas
	\dot{Q}_{PK}	:	[m^2]	Gesamtwärmefluss Propangas
	t	:	2 Min	Zeitdauer
	\dot{m}_P	:	0,65 kg/Min	Massenfluss des Propangases
	H_P	:	93,4 MJ/ m^3	Heizwert des Propangases [22]
	ρ_P	:	2,0096 kg/ m^3	Dichte des Propangases [22]
	A_P	:	1,69 m^2	Grundfläche Heizrohre

In der DIN EN 3, 2007 [30] erfolgt die Zündung des Holzprüfkörpers mit Heptan. Im Gegensatz zu anderen Brennstoffen ist dieser energiereicher (vgl. Ethanol) und zeigt eine rußarme Verbrennung (vgl. Fahrbenzin) [32]. Die genutzte Menge ist abhängig von der Prüfkörpergrundfläche. Die flächig unterstehende Zündwanne wird mit Heptan für eine 2 minütige Brennzeit gefüllt. Erfahrungen zeigen, dass im Durchschnitt 5 l Heptan pro m^2 benötigt werden (Tab. 7) [37].

Abmessungen			Brennstoff	
Länge	Breite	Fläche		
0,5 m	0,6 m	0,30 m^2	2 l	6,67 l/ m^2
0,9 m	0,6 m	0,54 m^2	3 l	5,00 l/ m^2
1,4 m	0,6 m	0,84 m^2	4 l	5,00 l/ m^2
2,2 m	0,6 m	1,32 m^2	7 l	5,00 l/ m^2
2,7 m	0,6 m	1,62 m^2	8 l	5,19 l/ m^2

Tab. 7: Heptanbrennzeit in Abhängigkeit von der Wannengröße

Eine andere Handformel geht von einem Abbrand von 3 mm Heptan pro Minute aus [32]. Damit würden rechnerisch 6 l Heptan pro m² benötigt werden.

$$h_H = h_B \cdot t = 6 \text{ mm} = 0,06 \text{ dm}$$

$$V_H = h_H \cdot A_Z = 6 \text{ l}$$

mit:	h_H	:	[dm]	Höhe des Heptans
	V_H	:	[l]	Volumen des Heptans
	h_B	:	3 mm/Min	Heptanhöhe für einminütige Brennzeit
	t	:	2 Min	Zeitdauer
	A_Z	:	100 dm ²	Grundfläche der Zündwanne

Der rechnerisch bestimmte Brennstoffmengenbedarf wird von der Thermik über der Brandwanne beeinflusst [32] und erklärt die unterschiedlichen Angaben. Erfahrungen zeigen, dass die Brennzeiten gleicher Heptanmengen unter den Prüfkörpern auch unter Normbrandbedingungen variieren können [37].

Die zur Entzündung der DIN EN 3 Prüfkörper genutzte Heptanmenge entspricht einer Gesamtenergie von 151,6 MJ/m².

$$\dot{Q}_H = M_H \cdot H_H \cdot \rho_H = 151,6 \text{ MJ}$$

mit:	\dot{Q}_H	:	[MJ]	Massenfluss Heptan
	M_H	:	5 l/m ²	Volumen des Heptans
	H_H	:	44,6 MJ/kg	Heizwert des Heptans [22]
	ρ_H	:	0,68 g/cm ³	Dichte des Heptans [38]

Das Heptan befindet sich in der Zündwanne mit einem Abstand unter der Holzprüfkrippe. Dieser Abstand wird benötigt, damit die Zuluft über die Seiten an die Flüssigkeitsoberfläche gelangen kann. Die heißen Brandgase ziehen nach oben aus dem Prüfkörper ab und erzeugen damit im unteren Teil eine Sogwirkung (*Abb. 21, Seite 36*). Die Flammen werden so in den Prüfkörper hinein gezogen.

Das Propangas kann direkt unter dem Prüfkörper ausgebracht werden. Die benötigte Verbrennungsluft kann durch die Spiralrohrkonstruktion hindurch ziehen und wird nicht behindert. Das mit Druck austretende Gas erzeugt größere Flammen, kann den Prüfkörper besser einschließen und damit einen besseren Wärmeübergang an der Holz erreichen. Die zur Zündung benötigte Energiemenge liegt daher bei Heptan um das 2,5 fache höher.

Eine Zündung mit Propangas stellt höhere Anforderungen an die Konstruktion und Sicherheit der Prüfvorrichtung. Auf eine Zündung mit Propan wird daher trotz der Vorteile verzichtet und eine technisch einfachere Zündung mit Heptan bevorzugt. Die technisch weniger aufwendige Konstruktion wird bevorzugt.

Eine genaue Festlegung der benötigten Heptanmenge bzw. Brennzeit ist schwierig. Eine lange im unteren Bereich des Prüfkörpers brennende Zündwanne hat nur einen geringen Einfluss auf die Entzündung der Holzstäbe im oberen Bereich des Prüfkörpers. Die lange Einwirkung des Zündmittels führt vielmehr zu einem überproportionalen Abbrand der unteren Holzstäbe und damit zu unterschiedlichen Abbrandphasen in der Krippe. Die ersten Versuche sollten daher mit einer Brennzeit von 2 Minuten durchgeführt werden. Eine Anpassung der Brennstoffmenge kann erfolgen, wenn der Prüfkörper mit dem verwendeten Heptan nicht zufriedenstellend gezündet werden kann.

Die Strömungsverhältnisse werden eine unter dem Prüfungskörper nach oben zusammenlaufende Flammerscheinung hervorrufen. Um auch die äußeren Randbereiche des Prüfkörpers zu zünden, muss die Zündwanne daher überlappend ausgeführt sein. Hierzu hat sich eine Überlappung von 0,1 m auf jeder Seite als zweckmäßig bewährt [37].

Es ergibt sich eine Kantenlänge der Zündwanne von 1,2 m und eine benötigte Heptanmenge von 7,2 l. Eine Abweichung von 0,1 l auf die Gesamtmenge ist zulässig (*Abb. 22*).

$$V_{HG} = M_H \cdot A_{ZW} = 7,2 \text{ l}$$

mit:	V_{HG}	:	[l]	Gesamtvolumen Heptan
	M_H	:	5 l/m ²	Menge Heptan
	A_{ZW}	:	1,44 m ²	Grundfläche der Zündwanne

Heptan ist ein aus sieben Kohlenstoffatomen bestehendes Kohlenwasserstoffmolekül. Zur Herstellung wird Erdöl verdampft und schrittweise wieder abgekühlt. Die verdampften Kohlenwasserstoffmoleküle besitzen je nach Moleküllänge eine charakteristische Kondensationstemperatur. Sobald diese erreicht ist, kondensieren auch die Heptanmoleküle und können abgezogen werden. Neben dem Heptan kondensieren auch noch viele andere Moleküle mit einem ähnlichen Kondensationspunkt und werden zusammen abgezogen. Mit einer langsamen Abkühlung oder einer mehrmaligen Wiederholung des Prozesses kann die Reinheit des Heptans mit einer geringeren Streuung der Eigenschaften gesteigert werden. Die Zündung des Prüfkörpers erfolgt mit industriellem Heptan der in *Tab. 8* genannten Eigenschaften.

Industrielles Heptan	
Destillationskurve	84 °C bis 105 °C
Differenz zwischen Anfangs- und Endpunkt der Destillation	≤ 10 °C
Aromenanteil (V/V)	≤ 1 %
Dichte bei einer Temperatur von 15°C	0,680 bis 0,720

Tab. 8: Anforderungen an der zu verwendende Heptan

Bevor das Heptan in die Zündwanne aus Metall gegeben wird, ist diese 0,03 m hoch mit Wasser zu füllen. Das anschließend aufgegebene unpolare Heptan vermischt sich nicht mit dem polaren Wasser und schwimmt aufgrund der geringeren Dichte oben auf. Die Wasserschicht bildet eine genau waagerechte Grenzfläche zum Heptan aus. Damit kann verhindert werden, dass sich das Heptan in einer Ecke der Zündwanne sammelt und den Prüfkörper ungleichmäßig entzündet.

5.2. Prüfungsplattform

Die Konstruktion oder Position der Prüfungsplattform zum Strahlrohr muss eine gleichmäßige Beschäumung des Prüfkörpers gewährleisten. Eine Bewegung des Strahlrohrs um eine unbewegte Plattform kann aufgrund der angeschlossenen Gerätschaften ausgeschlossen werden.

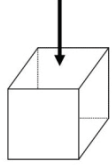
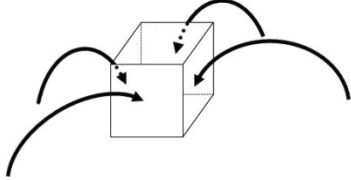
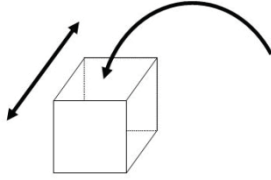
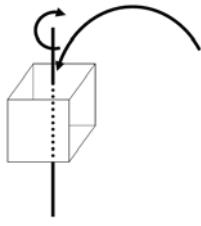
Eine unbewegte Plattform mit einer zentralen Schaumaufgabe durch ein seitlich oder oberhalb des Prüfkörpers fest positioniertes Schaumstrahlrohr kann nicht direkt alle Bereiche der Holzprüfkrippe erfassen. Es wäre daher fraglich, ob auch sehr fließfähige Schäume den gesamten Prüfkörper selbstständig erfassen und ablöschen könnten. Durch die gewählte Geometrie mit zahlreichen geschützten waagerechten und vertikalen Flächen ist dies bereits bei flächiger Verteilung eine Herausforderung für den Löschschaum. Sicherlich wären ebenfalls größere Schaummengen für die Erzeugung des benötigten Fließdrucks erforderlich und nur geringe Mengen für den Löscherfolg verantwortlich. Die Aussage über das eigentliche Löschvermögen des Schaums wäre fraglich.

Eine vollflächige Beschäumung könnte durch den Einsatz von mehreren Schaumrohren erreicht werden. Diese Art der Ausbringung entspricht der Löschtechnik einer automatischen Löschanlage (Bsp. Sprinkleranlage). Besonders Klasse-A-Schaum wird jedoch meistens von menschlichen Strahlrohrführern ausgebracht. Diese legen einen ersten Schaumteppich über das Brandgut und arbeiten in Bereichen nach, an denen der aufgebrachte Schaum nicht ausreichend für den Löscherfolg war. Dieser schaumsparende Einsatz stellt die größere Herausforderung für das Löschmittel dar und kann mit dieser Art der Aufgabe nicht nachgestellt werden. Der Einsatz von mehreren Schaumrohren erfordert zudem einen an jedem Schaumrohr gleichen Durchfluss. Der benötigte Prüfungsaufbau wird so komplizierter und fehleranfälliger.

Es ist weiterhin möglich, das Strahlrohr ortsgebunden zu befestigen und den Prüfkörper zu bewegen. Diese Versuchsanordnung hat den Vorteil, durch Beschäumungsintervalle der realen Brandbekämpfung näher zu kommen, als eine kontinuierliche Schaumaufgabe.

Eine eindimensionale horizontale oder vertikale Bewegung des Prüfkörpers wäre durch eine bewegte Plattform auf einem Schienensystem möglich. Durch eine kontinuierliche vor und zurück Bewegung würde der Prüfkörper flächig mit Schaummittel bedeckt. Es ist nachteilig, dass auf dem Wendepunkt des Prüfkörpers mehr und auf der dem Schaumrohr abgewandten Seite kein Schaum aufgegeben werden kann. Ein schneller Bewegungsrichtungswechsel und eine langsame Prüfkörperbewegung würden eine flächige Beschäumung der direkt erreichbaren Flächen ermöglichen. Die Umsetzung wäre konstruktiv aufwendig und die Einwirkung von hohen Lastwechselkräften auf den Prüfkörper unvermeidbar. Dies könnte unter Umständen zu einem Zusammenbruch des Prüfkörpers führen. Aufgrund der unterschiedlichen und wechselnden Prüfkörperumströmung mit Umgebungsluft könnte zusätzlich ein unregelmäßiger Abbrand des Prüfkörpers hervorgerufen werden.

Eine Drehung des Prüfkörpers um die eigene Achse erfolgt gleichmäßig und mit gleichbleibenden Einflüssen auf Strömungsverhältnisse an jeder Seitenfläche des Prüfkörpers. Es ist so möglich, mit einem seitlich aufgestellten und nur minimal bewegten Schaumrohr die gesamte Prüfkrippe gleichmäßig zu beschäumen. Dieser Versuchsaufbau wurde bereits erfolgreich in einer zurückgezogenen schwedischen Norm SS1192, 1985 [39] angewendet und wird auch für den in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper genutzt.

Konstruktion	Vorteil(e)	Nachteil(e)
Ein Schaumrohr; zentrale Aufgabe 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr einfache Unterkonstruktion - geringer Aufwand beim Aufbauen 	<ul style="list-style-type: none"> - keine flächendeckende Schaumverteilung
Mehrere Schaumrohre 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr einfache Unterkonstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Aufwand beim Aufbauen → schwere Reproduktion - ununterbrochene, punktuelle Schaummittelaufgabe unrealistisch
Ein Schaumrohr; bewegter Körper 		<ul style="list-style-type: none"> - ungleichmäßige Beschäumung oder - ruckartige Richtungswechsel
Ein Schaumrohr; drehender Prüfkörper 	<ul style="list-style-type: none"> - gleichmäßige Bewegung - gleichmäßige Beschäumung 	<ul style="list-style-type: none"> - aufwendige Unterkonstruktion

Tab. 9: Übersicht über die verschiedenen Konstruktionsmöglichkeiten der Plattform

Die Prüfungsplattform muss ausreichend Platz für die Zündwanne sowie einem darüber aufgestellten Untergestell mit dem darauf befindlichen Prüfkörper bieten. Die Verwendung eines Untergestells wird notwendig, um die Zündwanne in einem ausreichenden Abstand unter dem Prüfkörper positionieren zu können. Ein großer Abstand zwischen der Holzprüfkrippe und dem brennenden Heptan sorgt für eine optimale Versorgung der Verbrennung mit Sauerstoff. Ein geringer Abstand macht ein tieferes Eindringen der Flammen in den Prüfkörper möglich. Es wird ein 0,25 m hohes Untergestell in Kombination mit einer Seitenwandhöhe der Zündwanne von 0,1 m verwendet.

Die Auflagefläche des Prüfkörpers auf dem Untergestell sollte möglichst klein sein, um die Strömungsverhältnisse unter dem Prüfkörper nicht zu behindern und dennoch eine ausreichende Standfestigkeit für den Prüfkörper gewährleisten. Es werden daher zwei 1,4 m lange und 0,05 m breite Streben aus Winkelstahl nach ISO 657-1 parallel unter dem Prüfkörper hindurch geführt. Außerhalb der Prüfkörpergrundfläche werden diese zu einem Rechteck mit einer äußeren Kantenlänge von 0,55 m verbunden. In jeder Ecke ist anschließend ein Standfuß anzubringen (Abb. 22).

Die Zündwanne und die Unterkonstruktion mit dem Prüfkörper werden auf einer quadratischen Grundplatte mit der Kantenlänge von 1,6 m positioniert. Diese dient nicht der Aufnahme der gesamten durch die Aufbauten erzeugten Last, sondern der gleichmäßigen Verteilung des Drucks auf eine vollflächige untergelegte Dämmstoffplatte. Als Material ist nichtrostender Stahl (Güteklasse EN X5CrBiNi18-10) zu verwenden.

Aufgrund der sich nur leicht verändernden Eigenschaften (keine Oxidation; nur leichtes Verkratzen oder Anlaufen möglich) sind die Anteile der von der Platte reflektierten Wärmestrahlung zwischen den Versuchen vergleichbar. Eine starke Oberflächenveränderung beispielsweise durch eine Oxidation wird jedoch verhindert. Damit sind die Anteile der von der Platte reflektierten Wärmestrahlung vergleichbar.

Die weitere konstruktive Umsetzung der Prüfungsplattform ist freigestellt, kann sich jedoch nach dem folgenden Aufbau richten um die weiteren Anforderungen zu erfüllen.

Eine Dämmstoffplatte schützt die folgenden Bauteile vor einer zu großen Hitzeeinwirkung. Als Dämmstoffe bieten sich besonders Steinwolleplatten mit einer erhöhten Druckfestigkeit und einem Schmelzpunkt $\geq 1000\text{ °C}$ an [40]. Die unter der Dämmstoffplatte befindliche untere Metallplatte gleicher Fläche trägt das Gewicht der gesamten Konstruktion.

Die Plattformkonstruktion ist durch einen Zapfen mit einem Standfuß verbunden. Dieser ist durch eine ausreichende Dimensionierung standsicher auszuführen. Die Drehung der Plattform erfolgt durch einen Elektromotor. Dieser kann außerhalb am Standfuß angebracht oder im Zapfen selbst untergebracht werden. Die Kraft wird durch eine Kette oder Zahnräder übertragen. *Abb. 24* zeigt den schematischen Aufbau der Prüfungsplattform; im *Anhang IV* ist eine vergrößerte Abbildung der Plattform mit Prüfkörper, Untergestell und Zündwanne abgelegt.

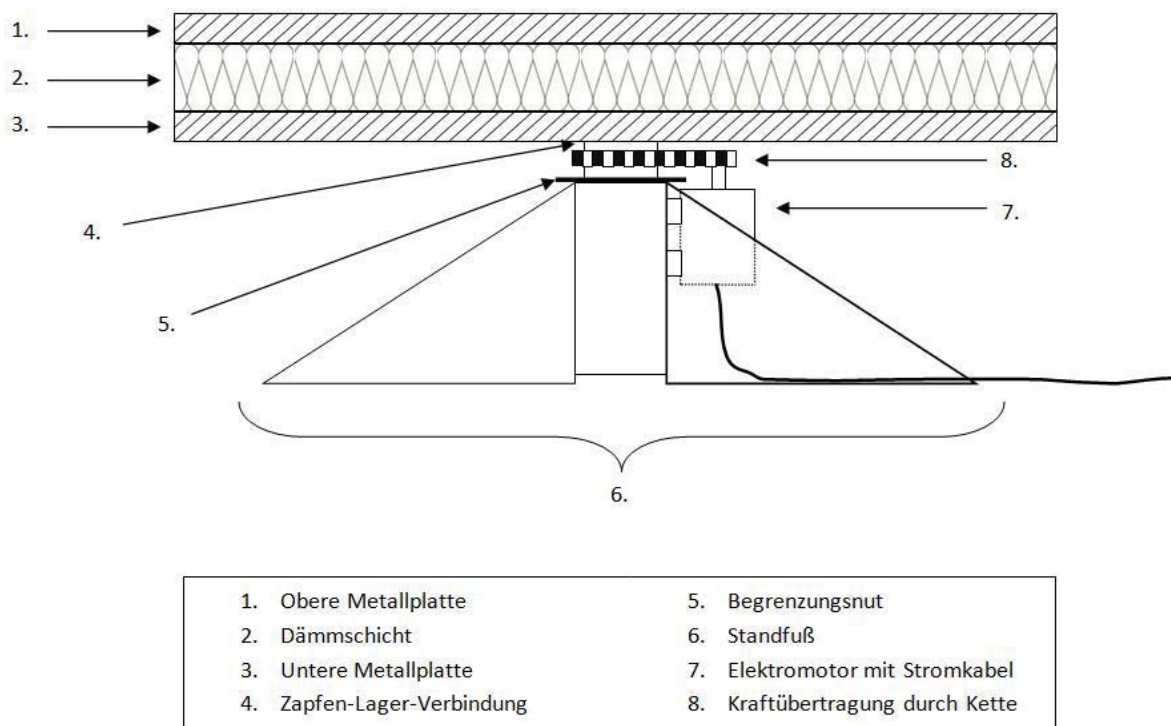


Abb. 24: Schematischer Aufbau der Prüfungsplattform

5.1. Umdrehungsgeschwindigkeit

Die Umdrehungsgeschwindigkeit des hier entworfenen Prüfkörpers wird auf 6 Umdrehungen in (60 ± 3) s festgelegt und orientiert sich an der schwedischen Norm SS1192, 1985 [31]. Mit 5 Umdrehungen in der Minute ließ sich der Prüfkörper darin gleichmäßig beschäumen und es wurden keine zusätzlichen Stabilisierungsmaßnahmen des Prüfkörpers benötigt.

Den Löschmitteln wird bei den sich ergebenden Beschäumungsintervallen die Möglichkeit gegeben, alle Bereiche des Prüfkörpers mehrmals und regelmäßig zu beschäumen.

Aufgrund der symmetrischen Platzierung des Prüfkörpers auf der Plattformkonstruktion können sich die entstehenden Fliehkräfte nicht nachteilig auf die Holzrippengeometrie auswirken. Kleine Unregelmäßigkeiten in der Gewichtsverteilung wirken sich bei dieser Geschwindigkeit nicht nachhaltig aus. Sollte dennoch der Bedarf entstehen, besteht die Möglichkeit, die einzelnen Stäbe mit Dübeln aus Kiefernholz zu verbinden.

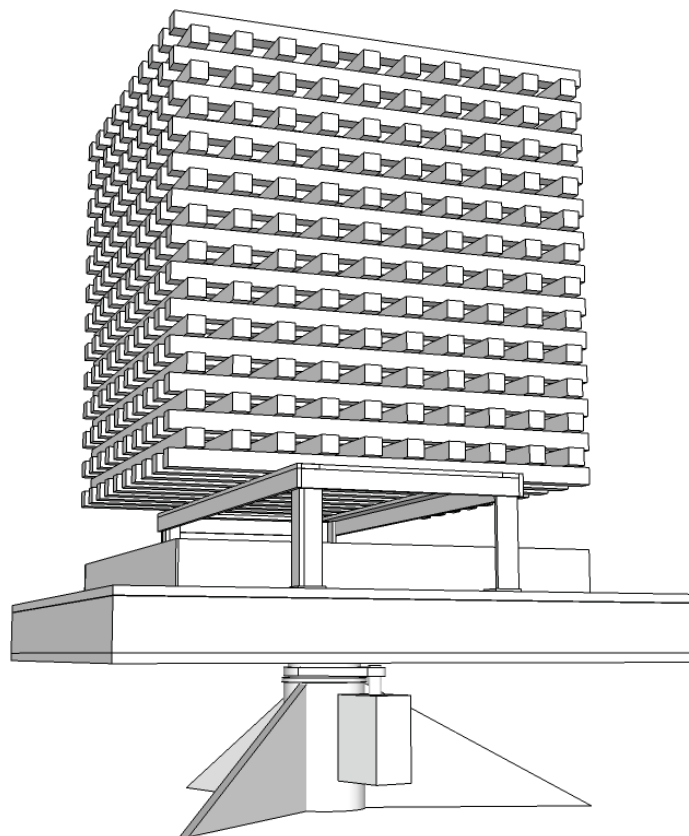


Abb. 25: Prüfkörper auf dem Untergestell mit Zündwanne und Prüfungsplattform

5.2. Schaumrohrhalterung

Die Verwendung einer Schaumrohrhalterung soll den Einfluss eines menschlichen Strahlrohrführers auf das Prüfungsergebnis ausschließen. Die Kombination mit der Drehung der Holzprüfkrippe soll eine gleichmäßige Beschäumung des Prüfkörpers mit einer eingeschränkten Bewegung des Schaumrohrs dennoch ermöglichen. Die Schaumrohrhalterung muss eine vertikale Aufwärts- und Abwärtsbewegung ermöglichen und ein Ortswechsel oder eine horizontale Bewegung ist durch die Konstruktion der Halterung auszuschließen.

Aufgrund von fehlenden Erfahrungswerten bzgl. der Bewegungsgeschwindigkeit ω und des Bewegungswinkels α soll das Schaumrohr vorerst von einem menschlichen Strahlrohrführer bewegt werden. Sobald ausreichend Erfahrungswerte vorliegen, kann das Schaumstrahlrohr durch eine entsprechende Änderung der Halterung maschinell bewegt werden.

Eine einfache Möglichkeit der Umsetzung stellt die Befestigung des Schaumrohrs in einer Schelle mit zwei gegenüberliegenden Zapfen dar. Die Zapfen werden jeweils in die Bohrungen von zwei gegenüberliegenden Metallplatten eingelassen. Die Befestigung der Metallplatten auf der Bodenplatte bildet den Rahmen und verleiht der Konstruktion eine ausreichende Stabilität. Sollte eine unbeabsichtigte horizontale Bewegung dennoch möglich sein, ist die Bodenplatte durch eine Verbindung mit dem Untergrund zu sichern.

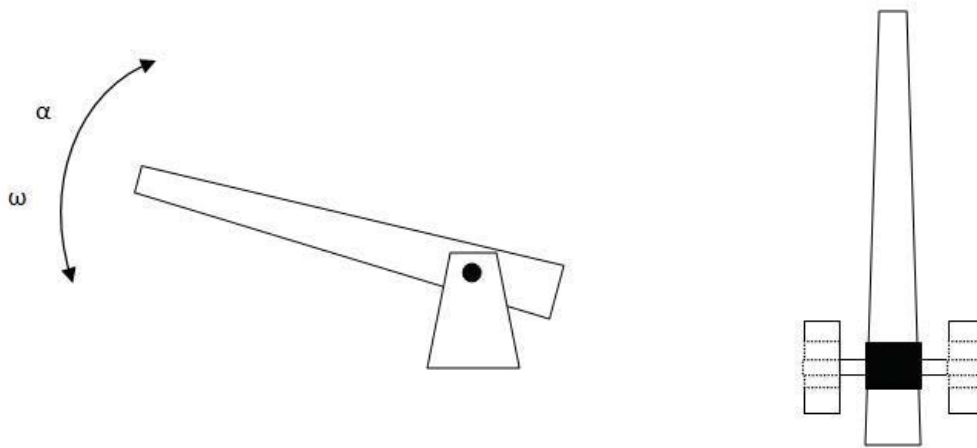


Abb. 26: Schematischer Aufbau der Schaumrohrhalterung (ohne Schlauch)

5.3. Löschmittelmenge

Die aufgebrachte Löschmittelmenge bestimmt entscheidend den Prüfungsablauf und den Löscherfolg. Die Aufgabe einer großen Löschmittelmenge in sehr kurzer Zeit würde die Brandbekämpfung schnell erfolgreich beenden. Diese hohen Aufgabemengen könnten außerhalb der Prüfung in der Praxis nie erreicht werden. Eine zu geringe Aufgaberate unterhalb der kritischen Löschmittelmenge führt zu einem überproportionalen Abbrand des Schaumteppichs. Ein Löscherfolg würde spät oder garnicht erreicht. Eine Auswertung der Prüfung und Differenzierung in effektive und weniger effektive Löschleistungen wäre so schwierig.

Eine angebrachte Löschmittelmenge berechnet sich aus dem durch die Holzverbrennung erzeugten Massenfluss in der Holzprüfkrippe und der Energiebindung durch das Löschmittel. Die Löschwirkung

von Schaum kann jedoch nicht auf einen Löscheffekt reduziert werden (3.3. Löschschaum - Funktion, Seite 27) und dieser Lösungsansatz ist somit nicht möglich.

PLEß, ET AL., 2000 [3] berechneten daher die Löschleistung von mit Wasser gefüllten Handfeuerlöschern durch den Bezug des aufgebrachtten Löschmittels auf die Oberfläche der Holzprüfkrippe. Dieser Ansatz wird ebenfalls für die Bestimmung einer verhältnismäßigen Löschmittelmenge in dieser Arbeit genutzt.

Die zulässige Füllmenge der Handfeuerlöscher beträgt 2 l, 3 l, 6 l oder 9 l Löschmittel. Ein Ausgangsdruck oder eine Verschäumungszahl sind nicht vorgegeben und herstellerabhängig bzw. produktabhängig. Ebenso wie die Löschleistung schwankt der Durchfluss der Feuerlöscher bzw. die Funktionsdauer.

Die zur Bildung des durchschnittlichen Löschvermögens betrachteten Handschaumfeuerlöscher besitzen alle eine Löschwirkung zwischen 13A und 55A nach DIN EN 3, 2007 [30]. Zur Prüfung wurden 14 Schichten aus Holzstäben gestapelt (Seitliche Kantenlänge der Holzstäbe: 0,04 m; Abstand der Holzstäbe: 0,06 m). Jede gerade Schicht wurde der Länge nach und jede ungerade Schicht der Breite nach angeordnet. Die Länge der Holzstäbe, welche der Breite nach abgelegt wurden betrug 0,5 m; die der Länge nach abgelegten 0,5 m bis 5,5 m (siehe Abb. 20, Seite 34).

Die Länge der verwendeten Holzstäbe gibt die Größe des verwendeten Prüfkörpers an. Mit einem Feuerlöscher des Löschvermögens 13A kann daher eine 1,3 m lange Holzprüfkrippe abgelöscht werden.

Die auf die eingesetzte Löschmittelmenge bezogene Oberfläche des Prüfkörpers schwankt zwischen 4,78 m² und 51,5 m² (Tab. 10). Hierbei handelt es sich um die gesamte Oberfläche abzüglich der verdeckten Oberfläche im Kreuzungsbereich der Holzprüfkrippe, da dieser Bereich nicht brennt und daher nicht mit abgelöscht werden muss.

Kategorie	n_l	Oberflächen größe
5 A	5	4,78 m ²
8 A	8	7,59 m ²
13 A	13	12,26 m ²
21 A	21	19,73 m ²
27 A	27	25,34 m ²
34 A	34	31,88 m ²
43 A	43	40,29 m ²
55 A	55	51,50 m ²

Tab. 10: Prüfkörperoberflächen

$$A_K = b^2 \cdot (N \cdot 8 \cdot n_Q \cdot n_l + N(n_Q + n_l) + 2n_Q \cdot n_l)$$

mit:	A_K	:	m^2	Gesamtoberfläche der Prüfkrippe
	b	:	0,04 m	Kantenlänge der Holzstäbe
	n_Q	:	5	Anzahl nebeneinander liegenden Holzstäbe (quer)
	n_l	:	Tab. 10	Anzahl nebeneinander liegenden Holzstäbe (längs)
	N	:	14	Anzahl der horizontal gestapelten Holzstäbe

Im Rahmen dieser Arbeit wurde von insgesamt 36 Handfeuerlöschern die erreichte Löschleistung mit der Oberfläche des abgelöschten Prüfobjektes in Bezug gesetzt. Es ergab sich eine notwendige Aufgabemenge von $0,31 \text{ l/m}^2$. Die leistungsfähigsten Feuerlöscher benötigten $0,15 \text{ l/m}^2$; die schwächeren $0,49 \text{ l/m}^2$ (siehe *Anlage III Berechnung Löschmitteleffektivität*). Eine Übersicht über das Löschvermögen verschiedener Handfeuerlöscher bezogen auf die Gesamtoberfläche befindet sich in *Abb. 27*.

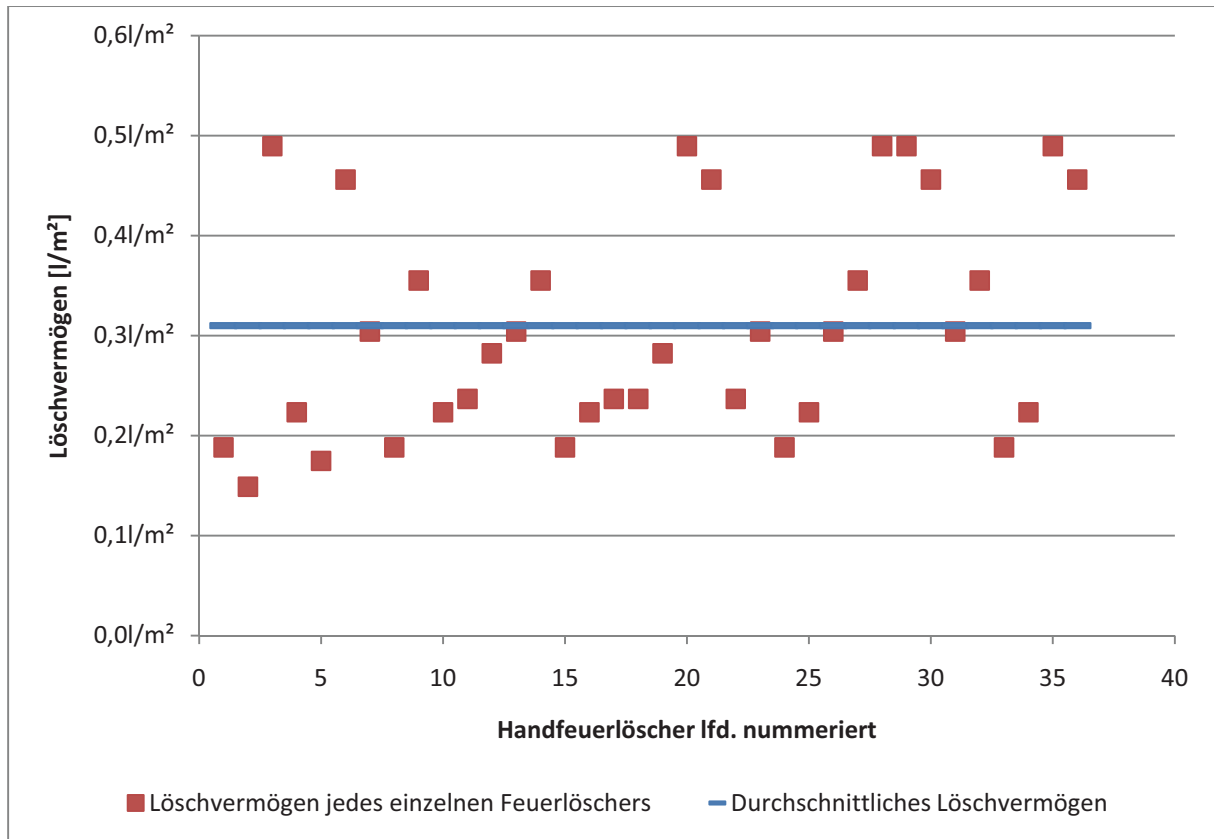


Abb. 27: Löschvermögen versch. Handfeuerlöscher bezogen auf die Holzprüfkrippenoberfläche

Die Stabdicke und die Stababstände des in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörpers sind mit denen der DIN EN 3 identisch. Das Verhältnis von vertikalen, horizontal nach oben und horizontal nach unten gerichteten Flächen ist somit gleich.

Die Übertragung der zu verwendenden Löschmittelmenge ist daher möglich. Die Oberfläche des verwendeten Prüfkörpers beträgt $33,12 \text{ m}^2$ (siehe 4.1. *Geometrie des Prüfkörpers, Seite 35*); damit würde durchschnittlich eine Löschmittelmenge von $10,27 \text{ l}$ bis zum Löscherfolg verbraucht werden.

$$M_L = A_K \cdot \dot{v}$$

mit:	M_L	:	[l]	Löschmittelmenge
	A_K	:	$33,12 \text{ m}^2$	Gesamtoberfläche der Prüfkrippe
	\dot{v}	:	$0,31 \text{ l/m}^2$	Durchschnittliche Aufgabemenge

Die Benutzungsdauer und Durchflussmengen bei Handfeuerlöschern sind aufgrund der leichten Konstruktion begrenzt und können an einer realen Brandlast geprüft werden. Dies ist bei Durchflussmengen von mehreren hundert Litern in der Minute bei genormten Schaumstrahlrohren nicht möglich (siehe 4. Dimensionierung des Prüfkörpers, Seite 33).

Um die Schaumaufgabe dem Prüfobjekt anzupassen muss diese geringer sein. Dazu bietet sich das bereits in der EN 1568 - 3 im Anhang H [27] zur Kleinlöschprüfung verwendete Schaumrohr mit einem Durchfluss von 5 l/min bei einem Nenndruck von 7,0 bar an.

Die durchschnittlich benötigte Löschmittelmenge wäre mit diesem Durchfluss in 123 Sekunden ausgebracht. Der Verbrauch des besten Schaumlöschmittels würde 4,97 l in 60 Sekunden und das schlechteste 16,23 l in 195 Sekunden betragen.

Es ist zu erwarten, dass diese Werte von der Praxis abweichen. Die Berechnung des Massenflusses (siehe Pkt. 6.6. Wärmestrahlung, Seite 63) zwischen einem DIN EN 3 – 5A Prüfkörper und dem in dieser Arbeit verwendeten, zeigt, dass sich der Massenfluss mit einer Verdopplung der äußeren Kantenlänge des Prüfkörpers d.h. einer Verachtfachung des Volumens, um mehr als das siebenfache steigert. Der hohe Massenfluss ist ebenfalls mit höheren Temperaturen im Prüfkörper verbunden und eine höhere Abbrandrate des Schaumteppichs ist zu erwarten.

Weiterhin ist anzunehmen, dass durch dickere Schaumschichten ein höherer Fließdruck erzeugt werden muss, um auch die nicht direkt beschäumbaren inneren Bereiche des Prüfkörpers zu erreichen. Dies dürfte zusammen mit dem ungenutzt von der Außenfläche des Prüfkörpers zurück gespritzten Schaums zu einem Mehrverbrauch gegenüber der berechneten Schaummenge führen.

Verbrauchsenkend dürfte es sich auswirken, dass die in den Handfeuerlöschern zur Anwendung kommenden Schaummittel universell auf brennenden Flüssigkeiten und Feststoffen eingesetzt werden können. Die Verwendung von Klasse-A-Schaummitteln dürfte sich in diesem Zusammenhang verbrauchsenkend auswirken.

In der Einsatzpraxis hat sich gezeigt, dass die reale Löschmittelaufgabemenge bis zu zehnmal höher sein kann als die theoretisch benötigte [3]. Eine Anpassung der berechneten Werte kann bei Bedarf anhand der ersten Prüfungsdurchführungen vorgenommen werden.

5.4. Zumischung und Verschäumung

Die Zumischung des Schaummittelkonzentrats hat nach Herstellerangaben zu erfolgen. Eine genaue Zumischung ist über das Ansetzen einer Lösung vor der Prüfung zu gewährleisten. Die Lösung kann anschließend direkt durch eine Pumpe aus dem Mischbehältnis gefördert werden.

Die Verschäumung kann entweder am Schaumrohr mit der Umgebungsluft oder durch Druckluft aus einem Kompressor durchgeführt werden. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass nur saubere Luft ohne Rauchgase o.ä. genutzt wird.

6. Prüfungsumgebung

6.1. Holzfeuchte

Absolut trockenes Holz bezeichnet den wasserfreien Zustand des Materials. Dieser Zustand lässt sich nur mit größerem technischen Aufwand herstellen. Meist wird der Trocknungszustand auf den praktisch wasserfreien Holzzustand mit einer vernachlässigbaren Restfeuchte, dem sogenannten darrtrockenen Zustand, bezogen. Dieser Zustand wird durch die Trocknung des Holzes mit der Darrmethode in einem $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ warmen Darrofen erreicht und ist ein wichtiger Bezugspunkt bei der Angabe von Holzeigenschaften [5].

Die Holzfeuchte ergibt sich aus dem prozentualen Verhältnis der Masse des Wassers und aus der wasserhaltigen Probe zur Masse der darrtrockenen Holzprobe:

$$u = \frac{m_0 - m_d}{m_0}$$

mit:	u	:	[%]	Holzfeuchte
	m_0	:	[kg]	Masse des feuchten Holzes
	m_d	:	[kg]	Masse des darrtrockenen Holzes

An der Freiluft gelagertes Holz besitzt in unserem Klima eine Holzfeuchte von $\approx 15\%$. Der Schwankungsbereich ergibt sich durch Witterung und Jahreszeit zwischen 12% und 20% [5]. In geschlossenen und beheizten Räumen stellt sich eine Holzfeuchte von $(9 \pm 3)\%$ (DIN 1052) ein.

Unterschiede in der Holzfeuchte wirken sich wesentlich auf den Verbrennungsvorgang und damit den Prüfungsvorgang aus. Die für die Verdampfung des gebundenen Wassers benötigte Energie wird dem Prüffeuer entzogen. Dies führt zu Unterschieden in der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und damit zu unterschiedlichen Prüfungsbedingungen.

Der verwendete Prüfkörper besitzt ein Holzgewicht von $\approx 208\text{ kg}$. Bei einer 8% igen Holzfeuchte sind damit $\approx 16,5\text{ l}$ und bei einer 20% igen Holzfeuchte $\approx 41,6\text{ l}$ Wasser enthalten. Für die Erwärmung werden $4,2\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ benötigt; für die Verdampfung weitere 2257 kJ/kg . Dies erzeugt bei einer Starttemperatur von 20°C und einer Endtemperatur von 100°C einen zusätzlichen Energieverlust von 65085 kJ durch die höhere Holzfeuchte. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Energiemenge eine Verlangsamung der Abbrandgeschwindigkeit von 10% bewirken kann.

Eine einheitliche Holzfeuchte ist daher zwingend erforderlich und wird in der Literatur als Normalfeuchte bezeichnet. Diese stellt sich unter einem nach DIN 50014 genormten Normklima (Temperatur: 20°C ; relative Luftfeuchtigkeit: 65%) abhängig von der Holzart bei Durchschnittlich $\approx 12\%$, bei dem verwendeten Kiefernholz bei $\approx 13\%$ ein.

Verfahren zur Bestimmung der Holzfeuchte sind das Widerstandsprinzip oder das Kapazitätsprinzip. Die Messung nach dem Widerstandsprinzip erfolgt über den je nach Holzfeuchte variierenden Ohmschen Widerstand zwischen zwei in das Holz eingebrachten Elektroden. Die kapazitive Methode berechnet die von der Holzfeuchte abhängige Veränderung eines elektrischen Felds um eine Elektrode.

Das kapazitive Verfahren ist dazu geeignet auch die Holzfeuchte in der Tiefe des Holzes festzustellen und wird daher ebenfalls zur Bestimmung des durchschnittlichen Feuchtegehalts eines Schnittholzloses nach ISO 4470 verwendet. An fünf Holzproben ist die Holzfeuchte unmittelbar vor dem Beginn des Abbrandversuchs stichpunktartig auf die Einhaltung der korrekten Feuchte von $(13 \pm 1) \%$ zu bestimmen.

6.2. Harzgehalt

Holzharze sind Naturharze, wobei mit der Bezeichnung nicht die chemischen Eigenschaften, sondern die physikalische Beschaffenheit gemeint ist. Die Zusammensetzung des zähflüssigen, klebrigen und nicht kristallisierenden Stoffgemischs variiert zwischen den verschiedenen Holzarten.

Kiefernharz besteht aus leicht flüchtigen mono- oder dicyclischen Monoterpenen mit darin gelösten schwerflüchtigen tricyclischen Triterpensäuren (Harzsäuren) und lässt sich in Ether lösen. Der Harzgehalt beträgt bei einheimischen Nadelhölzern zwischen 0,8 % bis 6,5 %. Abhängig von Baumalter, Position des Holzstücks im Baum und Standort des Baums weist Kiefernholz im Durchschnitt einen Harzgehalt von 4,8 % auf. In den Wurzeln der Kiefer kann der Harzgehalt bis zu 15 % betragen und bis ca. 2 m über dem Erdboden stark abnehmen. Anschließend ist der Harzgehalt bis in die Baumkrone konstant. Weiterhin ist das Kernholz harzhaltiger als das Splintholz in den äußeren Stammbereichen bzw. auf der öfter von der Sonne bestrahlten Baumseite.

Die Harzzusammensetzung mit einem hohen Anteil an sehr gut brennbaren Inhaltsstoffen und der inhomogenen Verteilung im Holz kann zu Streuungen im Abbrandverhalten von Holzprüfkrippen führen.

Ein von der MPA Dresden beauftragtes Labor hat Versuche durchgeführt, um ein praktikables, d.h. wirtschaftliches und zügig durchzuführendes Verfahren zur Bestimmung des Holzharzgehalts zu entwickeln. Dazu wurde eine fein zermahlene Holzprobe in Aceton gelöst und unter erhöhter Temperatur einige Zeit gelagert. Anschließend wurde die Lösung filtriert bzw. der im Filterpapier verbliebene feste Probenbestandteil mit Aceton gespült. Das im Aceton gelöste Holzextrakt wurde wieder auf 35 °C erhitzt. Als das Aceton verdampft war, wurde die Probe gewogen und in den Bezug zur ursprünglichen Masse der Holzprobe gesetzt. Es zeigte sich, dass neben den Harzen auch die Holzextraktstoffe gelöst wurden und somit kein direkter Rückschluss auf den Harzgehalt möglich war [41].

Eine Laboruntersuchung zur Holzharzbestimmung jeder Holzlieferung anhand mehrerer repräsentativer Proben ist danach mit dem Einsatz aufwendiger Messtechnik möglich, jedoch besonders unter wirtschaftlichen Aspekten als unverhältnismäßig anzusehen.

Mangels einer praktikablen Analyseverfahren muss daher zunächst auf die Bestimmung des Holzharzgehalts der Proben verzichtet werden. Analog zu den Festlegungen der schwedischen Norm SS1192, 1985 [31] und der DIN EN 3, 2007 [30] kann lediglich durch die Festlegung einer zu verwendenden Holzart und der Messung der bekannten Holzdichte versucht werden größere Schwankungen in der Holzbeschaffenheit zu beschränken. Ebenso wird durch eine ausreichende Größe der Prüfobjekte versucht im Mittelwert des verwendeten Holzes den durchschnittlichen Harzgehalt zu erreichen.

6.3. Holzdichte

Als Holzdichte wird ein auf ein Volumen bezogenes Gewicht bezeichnet und in kg/m^3 oder g/cm^3 angegeben.

Der Begriff der Holzdichte ist eng mit dem Holzharzgehalt und anderen Unregelmäßigkeiten im Material verbunden. Diese können Unterschiede in der Dichte innerhalb eines Holzstabs von bis zu 25 % bewirken [33].

Das für die Holzprüfkrippen verwendete Kiefernholz hat eine Dichte von Durchschnittlich $0,52 \text{ g/cm}^3$ und ist von vielen Einflussfaktoren abhängig [5]. In der DIN EN 3, 2007 [30] darf Kiefernholz mit einer Dichte von $0,40 \text{ g/cm}^3$ bis $0,65 \text{ g/cm}^3$ zur Anwendung kommen. Dieser weit gefasste Wert kann, wie beschrieben, zu Variationen im Prüfungsvorgang führen.

Eine direkte Messung aller Unregelmäßigkeiten im Holz ist nicht ohne weiteres möglich. Jeder zur Verwendung gebrachter Holzstab muss daher zuerst einer visuellen Prüfung unterzogen werden. Holzstäbe mit Einschlüssen (Harzgänge o.ä.), Unregelmäßigkeiten im Wachstum (Verastungen o.ä.) oder mit Trocknungsrissen sind nicht zu verwenden. Geringfügige Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit nach dem Zuschnitt wirken sich nicht auf den Brandverlauf aus und führen nicht zu einer Aussonderung.

Bei der anschließenden Dichtebestimmung durch Wiegen muss die Dichte $0,52 \text{ g/cm}^3$ mit einer maximalen Abweichung von 10 % betragen.

6.4. Windverhältnisse

Die Strömungsverhältnisse eines im Vollbrand befindlichen Prüfkörpers stellen sich nach anfänglichen Veränderungen in der Brandentwicklungsphase stabil ein. Die heißen Rauchgase ziehen nach oben ab und ziehen freie Umgebungsluft im unteren und teilweise seitlichen Bereich in die Holzprüfkrippenkonstruktion hinein (*Abb. 21, Seite 36*). Die Einwirkung von zusätzlichen Umluftbewegungen kann sich dabei unterschiedlich auf die Verbrennungsvorgänge der flüchtigen Bestandteile und des kohlenstoffhaltigen Rückstands auswirken.

Seitenwind verändert den Standwinkel der Diffusionsflamme über dem Prüfkörper, damit auch die winkelabhängige Wärmerückstrahlung und den direkten Wärmeübergang durch die Flamme. Die Temperaturen und die Verbrennungsgeschwindigkeit des Prüfkörpers sinken.

Die Luftbewegungen können die Temperaturen und die Verbrennungsgeschwindigkeit auch steigern, indem eine schnellere Durchmischung der brennbaren, flüchtigen Bestandteile des Holzes mit der Umgebungsluft erfolgt. Nach einer von KRAUS, 2008 [7] angeführten Arbeit von DRYSDALE, 1999 [42] kann die Umsetzungsrate dadurch um das Doppelte bis Dreifache gesteigert werden.

Sehr starke Luftbewegungen können die Reaktionszone der Diffusionsflamme soweit vom Prüfkörper forttragen, dass der Energierückfluss auf den Prüfkörper zu gering wird, oder die zündfähige Zusammensetzung der brennbaren Bestandteile bereits vor einer möglichen Zündung unterschritten wird. Dies würde zu einer Abnahme des Massenumsatzes und der Temperatur führen.

Der für den Umsatz des Kohlenstoffgerüsts benötigte Sauerstoff muss an einer durch Einrisse stark vergrößerten Oberfläche, durch die äußere Ascheschicht hindurch, an die Oberfläche der Holzkohle gelangen. Eine aktive Luftbewegung transportiert die austretenden Verbrennungsprodukte schneller

ab, führt Sauerstoff zur Kohleoberfläche und verbessert damit die Reaktionsbedingungen. Die heterogene Verbrennung kann somit früher beginnen und erreicht höhere Temperaturen. Es entstehen größere Mengen flüchtiger Bestandteile, deshalb eine heißere Flamme und eine höhere Temperaturen in der Diffusionsflamme.

Jedoch haben experimentelle Untersuchungen von NARUSO, ET AL, 2000 [43] gezeigt, dass auch hohe Umströmungsgeschwindigkeiten eine maximale Luftbewegung in der Holzprüfkrippenkonstruktion nicht überschreiten. PLEB, ET AL., 1994 [44] haben durch experimentelle Untersuchungen die Gluttemperatur von Holzprüfkrippen (Prüfobjektgröße nach DIN EN 3: 13A) in Abhängigkeit von der Anströmung gemessen (Abb. 28) und bestätigen die Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit.

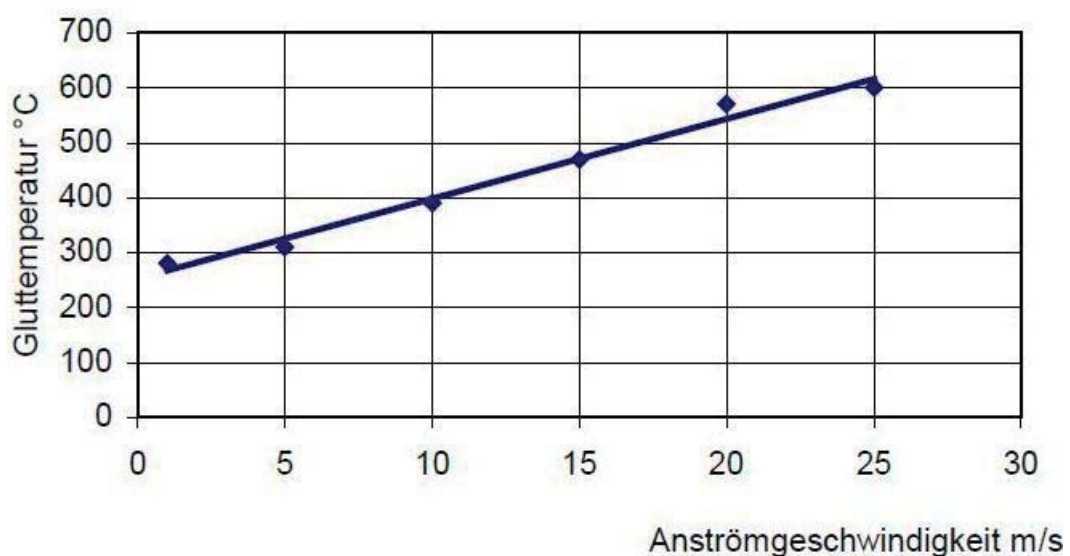


Abb. 28: Steigerung der Gluttemperatur bei Zuführung von Luft [44]

Es kann daher angenommen werden, dass es bei geringen bis mäßigen Luftbewegungen zu einer Erhöhung des Stoffumsatzes und dadurch zu einer höheren Verbrennungstemperatur kommt. Im Gegensatz zu den Diffusionsflammen ist ein Ausblasen der Glut aufgrund des niedrigen Sauerstoffbedarfs und der geschützten Lage nur theoretisch möglich.

Eine Minimierung der Luftbewegungen um den Prüfkörper herum und die hiermit verbundenen vergleichbaren Prüfungstemperaturen sind für eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse anzustreben.

Eine Versuchsdurchführung im Freien ist daher unzulässig. Die maximal zulässige Bewegungsgeschwindigkeit der Luft darf vor der Zündung des Prüfkörpers bei eingeschalteter Lüftung maximal 0,2 m/s betragen. Die Bewegungsgeschwindigkeit ist im unteren Bereich des Prüfkörpers in 0,1 m Höhe über der Oberfläche der Prüfungsplattform sowie in einem Meter Höhe über dem Prüfkörper zu messen. Die Ventilations- und Luftstromgegebenheiten dürfen anschließend während der Prüfung nicht mehr verändert werden. Nach der Beendigung der Beobachtungsphase, am Ende der Prüfung, hat die erneute Messung der Bewegungsgeschwindigkeit zu erfolgen und darf die Geschwindigkeit von 0,2 m/s nicht überschreiten.

Diese Anforderungen und Werte sowie das Vorgehen haben sich in der DIN EN 3, 2007 [30] als praktikabel erwiesen und werden auch in dieser Arbeit verwendet.

6.1. Luftversorgung

Die Konzentration von Sauerstoff in der Umgebungsluft beträgt 20,94 Vol%; die Senkung der Sauerstoffkonzentration führt zu einer Verlangsamung der Holzverbrennung bevor diese bei weniger als 17 Vol% nicht mehr aufrecht erhalten wird. Die Senkung der Sauerstoffkonzentration um nur 1 % senkt beispielsweise die Lichtausbeute einer Kerzenflamme bereits um 30 % [45].

Es muss deshalb sichergestellt sein, dass die Sauerstoffkonzentration während des gesamten Prüfungsvorgangs konstant bei (21 ± 1) Vol% bleibt. Eine zu nahe Messung der Sauerstoffkonzentration an der Prüfkörperoberfläche wird zwangsläufig eine Absenkung der Konzentration ergeben. Das Messgerät zur Überwachung ist daher während der gesamten Prüfung neben der Schaumrohrhalterung zu platzieren.

Bei dem notwendigen Luftaustausch im Versuchsraum darf die festgelegte Strömungsgeschwindigkeit nicht überschritten werden.

6.2. Prüfungstemperaturen

Alle verwendeten Prüfungsmaterialien müssen zu Beginn der Prüfung die gleichen Temperaturen aufweisen. In dem Abschnitt 6.1. *Holzfeuchte* wurden bereits mögliche Nachteile bzgl. der Holzfeuchte und der damit verbundenen Holztemperatur bzw. Luftfeuchtigkeit erläutert. Das aus dem Normklima entnommene Holz besitzt eine Temperatur von 20 °C. Diese Temperatur, mit einer maximalen Abweichung von $\pm 2,5$ °C, ist ebenfalls für die Tests zu gewährleisten.

Das in mobilen oder ortsgebundenen Behältern gelagerte Schaummittel hat in der Regel eine Temperatur von 18 °C. Diese Temperatur stellt sich bei der Lagerung des Schaummittels in Industriegebäuden ein [46] und kann damit als normale Verwendungstemperatur angenommen werden. Die in der EN 1568, 2008 [27] mit $(17,5 \pm 2,5)$ °C festgelegte Temperatur kann übernommen werden.

Die Raumtemperatur unterliegt saisonalen Schwankungen und ist aufgrund der brandbeständigen Ausführung der Versuchsräume nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu regulieren. Sollte die Temperatur unter 0 °C fallen oder über 30 °C steigen, ist ein nennenswerter Einfluss auf die Prüfung zu erwarten und eine Prüfung hat nicht stattzufinden.

Das in der Schaummittellösung enthaltene Löschwasser kann wie bereits beschrieben je kg und K Erwärmung 4,2 kJ Wärmeenergie aufnehmen, bis es bei 100 °C verdampft. Wärmeres Löschwasser kann also weniger Energie binden als kaltes und zu Unterschieden in der Prüfung führen. Das im Einsatz verwendete Löschwasser bewegt sich je nach äußeren Umständen im gesamten zur Verfügung stehenden flüssigen Aggregatzustand von Wasser. Es wird daher die gleiche Temperatur für das Löschwasser, wie bereits für das Schaummittel, festgelegt. Dies macht auch eine Vormischung der Schaummittellösung möglich (*siehe 5.4. Zumischung und Verschäumung, Seite 50*).

Die Abbrandgeschwindigkeit des verwendeten Heptans ist von der Flüssigkeitstemperatur abhängig. Eine höhere Temperatur zum Zeitpunkt der Zündung bewirkt, dass die Flüssigkeit schneller erwärmt wird. Dies bedeutet, dass zu einem früheren Zeitpunkt mehr Heptan in die Gasphase übergeht und

dort umgesetzt wird. Zu Beginn der Schaumaufgabe kann somit eine unterschiedliche Temperatur in dem Prüfkörper herrschen und die gesamte Prüfung beeinflussen. Die Temperatur des Heptans wird daher ebenfalls auf $(17,5 \pm 2,5)$ °C festgelegt.

6.3. Luftdruck und Luftfeuchtigkeit

Der gesamte Verbrennungsprozess, besonders der Pyrolyseprozess, unterliegt der Abhängigkeit des Luftdrucks. Dieser wird durch das Eigengewicht der Luft in der Atmosphäre erzeugt und nimmt mit zunehmender Höhe ab. Der mittlere Luftdruck beträgt auf Meereshöhe 1013,15 hPa und ändert sich mit einer Höhendifferenz von 8 m um 1 hPa [22]. Hinzu kommen wetterbedingte Schwankungen.

Die Luftfeuchtigkeit (Feuchte) bezeichnet den Gehalt an Wasserdampf in der atmosphärischen Luft. Durch zeitliche und örtliche Schwankungen kann der Wasserdampfanteil variieren. Da die maximale Luftfeuchtigkeit temperaturabhängig ist, ändert sich mit der Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit (Einheit: % bezogen auf die maximal mögliche Feuchte) auch wenn die absolute Luftfeuchtigkeit (Einheit: g/m^3) konstant bleibt [22]. Dieselbe bei 10 °C völlig gesättigte Luft hat bei 20 °C eine relative Luftfeuchtigkeit von nicht einmal 50 % und ist damit "relativ" trocken [47].

Die Luftfeuchtigkeit beträgt in Deutschland ungefähr 60 % und ist sehr stark abhängig von der Umgebung. Eine relativ hohe Luftfeuchtigkeit im schattigen Wald kann einige Meter weiter auf einer Waldlichtung stark gefallen sein.

Der Einfluss des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit auf die Abbrandversuche wird als gering eingeschätzt und auf eine aufwendige externe Regulierung wird deshalb verzichtet.

Während der Prüfung ist für einen ausreichenden Druckaustausch mit der Umgebung zu sorgen, sodass weder ein Überdruck noch ein Unterdruck im Versuchsraum entstehen kann. Der atmosphärische Luftdruck und die relative Luftfeuchtigkeit am Versuchstag müssen in den Versuchsaufzeichnungen vermerkt werden. Der Luftdruck ist über die gesamte Prüfung zu überwachen.

6.4. Wasserqualität

Die in Trink-, Brauch-, Industrie- und Flusswasser gelösten Salze bestimmen die Qualität des Löschwassers. Die Wasserhärte wird dabei im Wesentlichen durch die darin gelösten Calcium- und Magnesiumkationen, den sogenannten Wasserhärtern, bestimmt. Diese können mit Tensiden schwer- bzw. nichtlösliche Salze bilden. Bei der Verwendung von hartem Wasser zur Schaumherstellung besteht daher theoretisch die Möglichkeit, dass ein wesentlicher Tensidanteil zu Salzen reagiert und nicht mehr zur Verschäumung zur Verfügung steht. Eine Verminderung der Verschäumung der Schaummittel wird in der Praxis durch entsprechende Tensidmittelreserven ausgeglichen. Erst die künstliche Steigerung von Wasserhärteranteilen ergab in Versuchen einen Einfluss auf die Verschäumung [21]. Die Nutzung von einfachem Leitungswasser ist ohne einen Einfluss auf den Prüfungsablauf möglich.

Meerwasser enthält zusätzliche Kationen, welche dem Trinkwasser zur künstlichen Herstellung zugesetzt werden können. Diese Kationen bilden mehr schwer- bzw. nichtlösliche Salze im Schaumteppich aus. Die Prüfung der Löschleistung ist daher zusätzlich mit einer aus künstlichem Meerwasser angesetzten Schaummittellösung durchzuführen, wenn das Schaummittel von dem Hersteller als Meerwasserverträglich angegeben wird.

6.5. Vorbrennzeit

In der Anfangsphase der Brandentwicklung kann das Schaummittel noch schnell und effizient löschen. Mit der Zeit wird der gesamte Prüfkörper von den Flammen erfasst, die Verkohlung des Holzes nimmt zu, die Strömungsverhältnisse im Prüfkörper stabilisieren sich und das Holz hat ein eigenes Energiepotenzial gespeichert. Diese Vorgänge reduzieren jedoch den tragenden Querschnitt der Holzstäbe.

Die Dicke der Kohleschicht, für eine anspruchsvolle Prüfung, wird also von dem erforderlichen, minimal tragenden Querschnitt begrenzt. Dieser muss bestimmt werden, damit der zu verbrennende bzw. verkohlende Querschnitt bekannt ist.

Am Anfang der Berechnungen steht die Überlegung, die Holzprüfkrippe für die Berechnungen in Bereiche zu unterteilen.

Dazu bietet sich eine horizontale Unterteilung in vier Bereiche an (Abb. 29). Diese befinden sich jeweils links und rechts der beiden unter dem Prüfkörper hindurchgeführten Streben der Unterkonstruktion und haben die gleiche Länge. Die Auflagefläche der Stäbe auf der Unterkonstruktion muss für die Berechnung des Drehmoments von der Gesamtlänge des Holzstabs abgezogen werden, da die Drehung über die Kanten der Streben erfolgt.

$$l_5 = \frac{l_{GES} - 2 \cdot b_S}{4} = 0,225 \text{ m}$$

mit:	l_5	:	[m]	Länge eines Teilbereichs
	l_{GES}	:	1 m	Gesamtlänge der Holzstäbe
	b_S	:	0,05 m	Breite der Streben der Unterkonstruktion

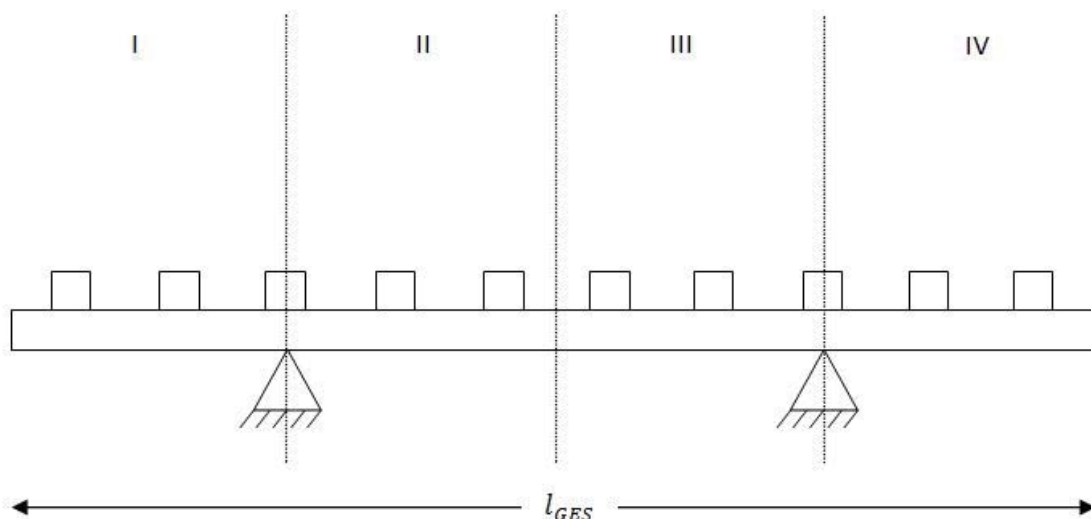


Abb. 29: Schematische Unterteilung der Holzstäbe in vier Teilbereiche

Auf den zehn quer gelegten Holzstäben befinden sich zehn längs gelegte Holzstäbe. Jeweils der dritte von dem Rand gezählte und längs gelegte Holzstab trägt seine Last senkrecht nach unten in die Unterkonstruktion ab. In der schematischen Darstellung der Holzstäbe bzw. der erzeugten Kräfte können diese unbeachtet bleiben.

Die dreidimensionale Flächenlast eines quer gelegten Holzstabs berechnet sich aus dem Volumen des Holzstabs, der Dichte und der Erdbeschleunigung bezogen, auf die Grundfläche und kann in eine zweidimensionale Streckenlast umgerechnet werden.

$$q_{EG} = \frac{F_E}{A_{HS}} = \frac{V_{HS} \cdot \rho_{HS} \cdot g}{A_{HS}} = \frac{(b_{HS})^2 \cdot l_5 \cdot \rho_{HS} \cdot g}{b_{HS} \cdot l_5} = 204 \text{ N/m}^2$$

$$q_E = q_{EG} \cdot b_{HS} = 8,2 \text{ N/m}$$

mit:	q_{EG}	:	$[N/m^2]$	Flächenlast Eigengewicht
	q_E	:	$[N/m]$	Streckenlast Eigengewicht
	V_{HS}	:	$[m^3]$	Volumen der Holzstäbe im Teilbereich
	A_{HS}	:	$[m^2]$	Grundfläche der Holzstäbe im Teilbereich
	F_E	:	$[N]$	Kraftwirkung Eigenlast
	l_5	:	0,225 m	Länge des Holzstabs im Teilbereichs
	ρ_{HS}	:	0,52 g/cm ³	Dichte Holz
	g	:	9,81 m/s ²	Erdbeschleunigung
	b_{HS}	:	0,04 m	Kantenlänge der Holzstäbe

Auf jede quer gelegte Holzstabelle wirkt also neben der Eigenlast das Gewicht der darüber längs aufgereihten Holzstäbe. Das Holz behält auch während der Verbrennung seine Steifigkeit. Die Last kann so über die einzelnen quer gelegten Holzstäbe an das Lager übertragen werden.

Die Flächenlast der längs gelegten Holzstäbe berechnet sich ebenfalls auf diese Weise. Dabei ist zu beachten, dass das Gewicht jedes längs gelegten Holzstabs symmetrisch auf die zehn darauf quer gelegten Holzstäbe verteilt wird (Abb. 30).

$$q_{SG} = \frac{F_{HSL}}{A_{HSL}} = \frac{V_{HSL} \cdot g}{A_{HSL}} = \frac{(s+b_{HS}) \cdot (b_{HS})^2 \cdot \rho_{HS} \cdot g}{A_{HSL}} = 510,0 \text{ N/m}^2$$

$$q_S = q_{SG} \cdot b_{HS} = 20,4 \text{ N/m}$$

mit:	q_{SG}	: [N/m ²]	Flächenlast der Holzstäbe
	q_S	: [N/m]	Streckenlast der Holzstäbe
	A_L	: [m ²]	Grundfläche des Holzstäbe im Teilbereich
	F_{HSL}	: [N]	Kraftwirkung Holzstablast
	V_{HSL}	: [m ³]	Volumen der Holzstablast
	ρ_{HS}	: 0,52 g/cm ³	Dichte Holz
	g	: 9,81 m/s ²	Erdbeschleunigung
	b_{HS}	: 0,04 m	Kantenlänge der Holzstäbe
	s	: 0,06 m	Abstände der Holzstäbe untereinander

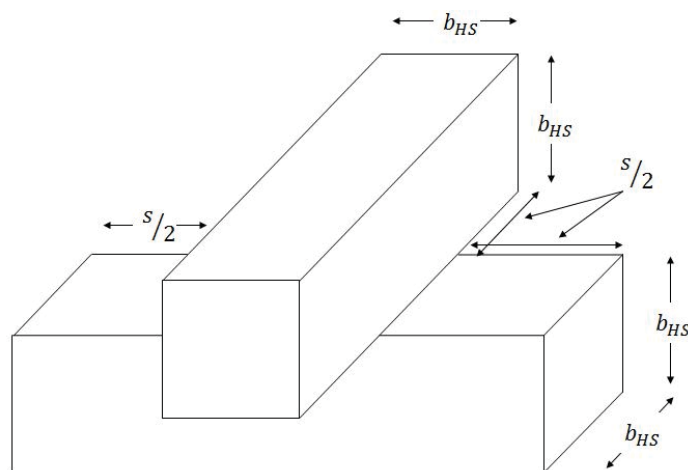


Abb. 30: Schematische Darstellung der längs auf die quer gelegten Holzstäbe

Mit der Streckenlast und den entsprechenden Abständen kann das im Auflager wirkende Drehmoment bestimmt werden (Abb. 31).

$$M = q_E \cdot l_5 \cdot \frac{l_5}{2} + q_S \cdot l_1 \cdot \left(\frac{l_3 + \frac{l_1}{2}}{2} \right) + q_S \cdot l_2 \cdot \left(\frac{l_4 + \frac{l_2}{2}}{2} \right) = 0,29 \text{ Nm}$$

mit:	M	:	$[Nm]$	Drehmoment
	l_1	:	$0,04 \text{ m}$	Länge der Streckenlast der Holzstäbe
	l_2	:	$0,04 \text{ m}$	Länge der Streckenlast der Holzstäbe
	l_3	:	$0,025 \text{ m}$	Länge der Streckenlast von dem Drehpunkt
	l_4	:	$0,125 \text{ m}$	Länge der Streckenlast von dem Drehpunkt
	l_5	:	$0,225 \text{ m}$	Länge des Holzstabs im Teilbereich
	q_E	:	$8,2 \text{ N/m}$	Streckenlast Eigengewicht
	q_S	:	$20,4 \text{ N/m}$	Streckenlast der Holzstäbe

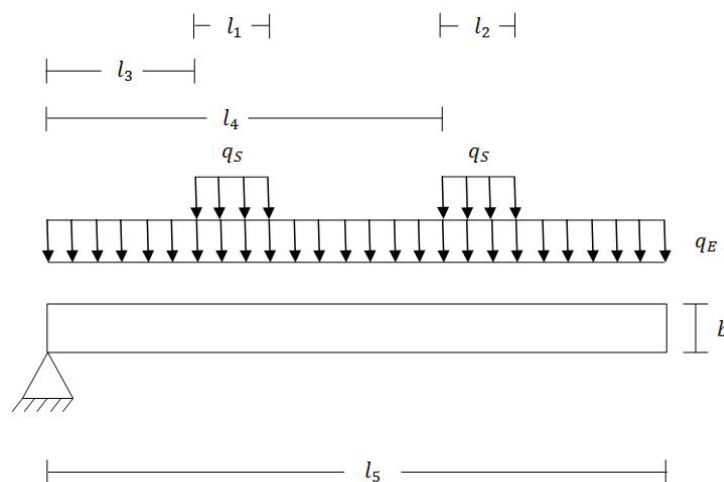


Abb. 31: Schematische Darstellung der auf das Holz wirkenden Kräfte

Nach der Formel für die zulässige Maximalspannung σ_{zul} an einem bestimmten Punkt mit dem maximalen Abstand z zur neutralen Faser, dem Drehmoment M und dem Flächenträgheitsmoment für quadratische Querschnitte I lässt sich der mindestens erforderliche tragende Querschnitt ermitteln.

Die zulässige Maximalspannung in Faserrichtung für Kiefernholz beträgt zwischen (80 - 100) N/mm² und wird zur Sicherheit mit dem kleinsten Wert angenommen; quer zur Faserrichtung nimmt die Maximalspannung ab. Es ergibt sich eine erforderliche Kantenlänge von ca. 3 mm.

$$\sigma_{zul} = \frac{M}{I} \cdot z$$

$$\sigma_{zul} = \frac{M}{\frac{(b_{min})^4}{12}} \cdot \frac{b_{min}}{2}$$

$$b_{min} = \sqrt[3]{\frac{M \cdot 6}{\sigma_{zul}}} = 2,79 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

mit:	b_{min}	:	[mm]	Erforderliche Kantenlänge
	σ_{zul}	:	80 N/mm ²	Zulässige Maximalspannung
	M	:	0,29 Nm	Drehmoment
	I	:	$\frac{(b_{min})^4}{12}$	Flächenträgheitsmoment für quadratische Querschnitte
	z	:	$\frac{b_{min}}{2}$	Abstand zur neutralen Faser

Beachtet man die Inhomogenitäten im Holz (d.h. die Schwankungen im Abbrandverhalten), die punktuelle Belastung durch den auftreffenden Schaummittelstrahl sowie das Gewicht des Schaumteppichs sollte der erforderlichen Kantenlänge ein hoher Sicherheitsbeiwert beigemessen werden.

Der Ansatz zur Berechnung der Dicke der Holzkohleschicht erfolgt über die ideelle Abbrandtiefe nach DIN EN 1995-1-2, 2010 [48]. Diese gilt für die Brandbeaufschlagung eines Balkens von einer Seite und berücksichtigt die Einflüsse von Rissen und dem Eckabbrand der Holzstäbe. Die Verdopplung des Werts für die ideelle Abbrandtiefe ergibt die Reduzierung des Querschnitts.

Die Gleichung für die ideale Brandtiefe besteht aus zwei Teilen. Mit dem Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe $d_{char,n}$ kann der Holzabbrand mit einer Reduzierung der Kantenlänge und des Gewichts bestimmt werden. Der zweite Teil der Gleichung $k_0 \cdot d_0$ gibt die Schichtdicke des Holzes an, welche keine Festigkeit und Steifigkeit mehr aufweist d.h. verkohlt ist.

Zeit	k_0
t < 20 Minuten	t/20
t > 20 Minuten	1,0

Tab. 11: Bestimmung von k_0 für ungeschützte Oberflächen mit t in Minuten

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

mit:	d_{ef}	:	[mm]	ideelle Abbrandtiefe
	$d_{char,n}$:	[mm]	Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe
	k_0	:	siehe (Tab. 11)	Bemessungswert zur Anpassung von d_0 bei einer noch nicht voll entwickelten Kohleschicht
	d_0	:	7 mm	Dicke der nicht mehr tragenden Schicht

Erweitert um den Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe $d_{char,n}$ ergibt sich

$$d_{ef} = \beta_n \cdot t + k_0 \cdot d_0$$

mit:	β_n	:	0,8 mm/Min	Bemessungswert der ideellen Abbrandrate; für Vollholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$
	t	:	[Min]	Zeitdauer der Beanspruchung

Aus den Ergebnissen der Berechnung (Tab. 12, Seite 63) ist zu entnehmen, dass mit zunehmendem Abbrand auch die zu erwartende Kohleschicht in der Tiefe zunimmt. Der beste Zeitpunkt um die Brandentwicklungsphase zu beenden und mit der Schaummittelaufgabe zu beginnen, ist nach acht Minuten. Das Löschmittel muss zu diesem Zeitpunkt einen Brand in der Gasphase und an der Holzoberfläche unter Glutbildung bekämpfen. Die zu diesem Zeitpunkt an jeder Oberfläche gebildete $\approx 2,8 \text{ mm}$ dicke Kohleschicht stellt eine besondere Herausforderung für die Netzfähigkeit des Schaummittels dar. Der verbliebene Restquerschnitt kann den zu erwartenden Belastungen sicher standhalten und hat ausreichend Reserven um die Prüfkörperstruktur auch während der Schaumaufgabe aufrecht zu erhalten.

Zeit [Min]	Kohleschicht [mm]	Abbrand [mm]	Restquerschnitt [mm]
1	0,35	0,8	37,7
2	0,70	1,6	35,4
3	1,05	2,4	43,1
4	1,40	3,2	40,8
5	1,75	4,0	38,5
6	2,10	4,8	26,2
7	2,45	5,6	23,9
8	2,80	6,4	21,6
9	3,15	7,2	19,3
10	3,50	8,0	17,0
11	3,85	8,8	14,7
12	4,20	9,6	12,4
13	4,55	10,4	10,1
14	4,90	11,2	7,8
15	5,25	12,0	5,5

Tab. 12: Kohleschicht, Abbrand und Restquerschnitt über die Zeit

6.6. Wärmestrahlung

Zimmerbrände erreichen Temperaturen bis zu 800 °C; bei Großbränden werden bis zu 1200 °C erreicht [38]. Die Versuchsaufzeichnungen von KRAUS, 2008 [7] zeigen die deutliche Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur der Holzprüfkippe von den Abmessungen und der Geometrie.

Untersuchungen zeigen einen maximalen Erwartungswert von mehr als 800 °C an der Holzkohleoberfläche. Die Rauchgase erreichen innerhalb des Holzprüfkörpers die maximalen Temperaturen von über 900 °C, fast 1000 °C [35] [49]. Die genauen Temperaturen werden maßgeblich von der Prüfkörpergeometrie beeinflusst und eine Bestimmung im Voraus so nicht genauer möglich.

An dieser Stelle soll die bei einem Brand frei werdende Energie, welche als Wärmestrahlung und als Wärmeströmung auf benachbarte Objekte übertragen wird, berechnet werden. Nachdem die emittierte Strahlung des Prüfkörpers bestimmt wurde, kann diese auf das Umfeld bezogen werden. Hierbei ist besonders die auf den Bediener der Strahlrohrbewegungseinrichtung einwirkende Wärmebelastung von besonderem Interesse, da diese die Entfernung des Aufstellorts zum Holzprüfkörper bestimmt.

Um die Wärmestrahlung zu berechnen, muss die komplette horizontal strahlende Fläche bekannt sein. Diese ergibt sich aus der quadratischen Seitenfläche des Prüfkörpers und der Flammhöhe über dem Objekt.

Um die Flammhöhe zu bestimmen wird das Modell von Heskestad genutzt. Dieses bezieht sich auf eine zweidimensionale und kreisrunde Brennstoffoberfläche [50] und besitzt eine recht gute Übereinstimmung mit der realen Flammenbildung [51].

Die entstehenden Auftriebskräfte durch die aus der Holzprüfkippe nach oben abziehenden Rauchgase und der Bezug des genutzten Modells auf eine runde Brandfläche finden keine

Berücksichtigung. Dies wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Berechnungen aus und ist bei den folgenden Ausführungen zu bedenken.

Für die Berechnungen ist zuerst der Massenfluss der Holzprüfkrippe zu bestimmen. Das hierzu in dieser Arbeit genutzte Modell wurde von DELICHATSIOS, 1976 [52] zur Berechnung des Massenflusses im Vollbrand entwickelt. Die Berechnungen beziehen sich auf Holzprüfkrippen mit quadratischer Grundfläche und sollen bei einem überschaubaren Rechenaufwand möglichst genaue Ergebnisse liefern. Aus dem Produkt der Gesamtoberfläche des Prüfkörpers, einer flächenspezifischen Abbrandrate, der Kantenlänge und einem Porositätsfaktor kann der Massenfluss im Vollbrand berechnet werden.

Der Porositätsfaktor gibt in diesem Modell das Verhältnis der Gesamtoberfläche der Holzstäbe zur verdeckten Oberfläche an und setzt dies in Bezug zur Kantenlänge und dem Abstand der Holzprüfstäbe.

Beträgt die Porosität weniger als $7 \cdot 10^{-2}$ cm, ist in diesem Model ein nachteiliger Einfluss der Strömungsverhältnisse in der Holzprüfkrippe auf das Abbrandverhalten zu erwarten. Die in dieser Arbeit verwendete Holzprüfkrippe besitzt eine Porosität von $8,75 \cdot 10^{-2}$ cm und somit einen Porositätsfaktor von 1.

$$A_S = 4 \cdot l \cdot b \cdot n \cdot N = 40 \text{ m}^2$$

$$A_V = s^2 \cdot (n - 1)^2 = 0,2916 \text{ m}^2$$

mit:	A_S	:	$[m^2]$	Gesamte Oberfläche der Holzprüfkrippe
	A_V	:	$[m^2]$	Verdeckte Oberfläche
	l	:	1 m	Länge der Holzstäbe
	n	:	10	Anzahl der nebeneinander liegenden Holzstäbe
	N	:	25	Anzahl der horizontal gestapelten Holzstäbe
	b	:	$0,04 \text{ m}$	Kantenlänge der Holzstäbe
	s	:	$0,06 \text{ m}$	Abstand der Holzstäbe zueinander

Anschließend kann die Porosität berechnet und der Porositätsfaktor bestimmt werden.

$$P = \frac{A_V}{A_S} \cdot (s \cdot b)^{1/2} = 8,75 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$$

$$f(P) = 1 \quad \text{wenn } P > 7 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$$

mit:	P	:	$[cm]$	Porosität
	$f(P)$:	$[\]$	Porositätsfaktor
	A_S	:	40 m^2	Gesamte Oberfläche der Holzprüfkrippe
	A_V	:	$0,2916 \text{ m}^2$	Verdeckte Oberfläche
	s	:	$0,06 \text{ m}$	Abstand der Holzstäbe zueinander
	b	:	$0,04 \text{ m}$	Kantenlänge der Holzstäbe

Zusammen mit dem Porositätsfaktor und den restlichen erforderlichen Werten kann nun der Massenfluss mit 50 g/s bestimmt werden.

$$\dot{m}_V = A_S \cdot c \cdot b^{-1/2} \cdot f(P) = 50 \text{ g/s}$$

mit:	\dot{m}_V	:	$[g/s]$	Massenfluss
	A_S	:	40 m^2	Gesamte Oberfläche der Holzprüfkrippe
	b	:	$0,04 \text{ m}$	Kantenlänge der Holzstäbe
	c	:	$\sim 10^{-3} \frac{g}{cm^{3/2} \cdot sec}$	spezifische Abbrandgeschwindigkeit
	$f(P)$:	$[\]$	Porositätsfaktor

Nach den Aussagen des Entwicklers beträgt die Genauigkeit der Berechnungen etwa $\pm 10\%$. Im Fachbereich Brandschutztechnik des Karlsruher Instituts für Technologie wird dieses Modell ebenfalls als Handformel genutzt und hat sich dort bewährt. Nach einer dortigen Schätzung liegt die Genauigkeit der Formel bei etwa $\pm 20\%$ [32]. Um die maximale Energiefreisetzung konservativ zu bestimmen, wird der Massenfluss um die maximale Abweichung von 20 % auf 60 g/s erhöht. Es ergibt sich eine mittlere Flammenhöhe von 2,5 m.

$$\dot{Q} = H_K \cdot \dot{m}_V = 930 \text{ kW}$$

$$D_f = \sqrt{\frac{A_Q \cdot \dot{Q}}{\pi}} = 1,13 \text{ m}$$

$$Z_f = 0,235 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} - 1,02 \cdot D_f = 2,5 \text{ m}$$

mit:	Z_f	:	[m]	mittlere Flammenhöhe
	\dot{Q}	:	[kW]	Energiefreisetzung eines realen Brandherds
	D_f	:	[m]	Branddurchmesser
	\dot{m}_V	:	60 g/s	Massenfluss des Prüfkörpers mit 20 % Abweichung
	H_K	:	15,5 MJ/kg	Heizwert Krippenholz
	A_Q	:	1 m ²	Quadratische Grundfläche des Prüfkörpers

Die räumliche, nach oben spitz zulaufende Flamme kann geometrisch als quadratische Fläche selben Inhaltes betrachtet werden. Diese Annahme führt zu einer konservativen Schätzung, da die strahlende Fläche kompakt über dem Prüfkörper beginnt und dies eine höhere Strahlungsbelastung für die parallele Fläche zur Folge hat. Die seitliche Fläche des Prüfkörpers beträgt mit dieser Annahme 2,25 m².

$$A_{GES} = a \cdot b + \frac{a \cdot Z_f}{2} = 2,25 \text{ m}^2$$

mit:	A_{GE}	:	[m]	Gesamtfläche der Flamme
	a	:	1 m	Breite des Prüfkörpers
	b	:	1 m	Höhe des Prüfkörpers
	Z_f	:	2,5 m	mittlere Flammenhöhe

Die Berechnung der entstehenden Wärmestrahlung erfolgt nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz. Danach ist die von einem Körper aufgrund seiner Temperatur ausgehende Strahlung proportional zur Größe der strahlenden Fläche und der 4. Potenz der Körpertemperatur.

Der Emissionsgrad beträgt im allgemeinen Fall bei 20 °C für Holz 0,85 [22]; bei höheren Temperaturen kann dieser mit 0,9 bis 1,0 angenommen werden [53].

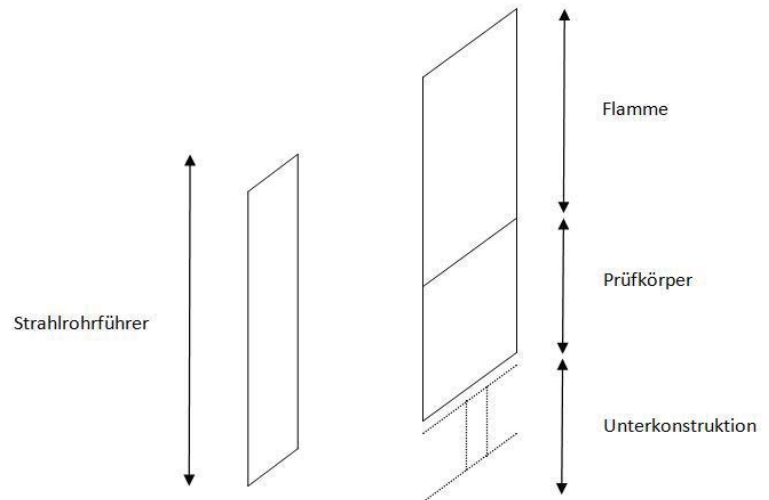


Abb. 32: Schematische Darstellung der räumlichen Flächenanordnung

Die Holzkohle verbrennt bei einer anderen Temperatur als die Diffusionsgase. Es kann jedoch angenommen werden, dass diese den gesamten Körper umströmen und damit für die abgestrahlte Wärmeleistung verantwortlich sind. Die Temperatur wird daher mit 1173 K angenommen.

Die Strahlungsleistung beträgt dann 242 kW und umfasst alle in der Strahlung enthaltenen Wellenlängen. Das abgestrahlte Spektrum verteilt sich daher nicht gleichmäßig auf einzelne Wellenlängen [22].

$$P_S = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_1 \cdot T_1^4 = 241523 \text{ W}$$

mit:	P_S	:	[W]	Strahlungsleistung des Körpers
	σ	:	$5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$	Strahlungskonstante
	ε	:	1,0	Emissionsgrad der strahlenden Fläche
	A_1	:	$2,25 \text{ m}^2$	Gesamtfläche der Flamme
	T_1	:	1173 K	Temperatur der heißen Gase

Die von dem Prüfkörper ausgehende Wärmestrahlung wirkt auf alle in der Umgebung befindlichen Objekte ein. Dabei wird die Strahlung nicht über die Entfernung durch Molekülreibung absorbiert, wie es etwa bei einer Teilchenstrahlung geschieht. Die Strahlung verteilt sich mit zunehmender Entfernung auf eine größere Fläche und erscheint somit nur subjektiv abgeschwächt [54].

Zur Bestimmung der absorbierten Wärmestrahlung wird das oben eingeführte Stefan-Boltzmann'sche Gesetz durch ein Winkelverhältnis erweitert. Diese dimensionslose Zahl gibt das Verhältnis, der von der Fläche A_1 emittierten und der auf die Fläche A_2 einwirkenden Wärmestrahlung an. Somit wird nicht mehr die Strahlungsleistung, sondern die Wärmestrahlung zwischen zwei Flächen in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bestimmt.

Eine Unterscheidung wird zwischen leuchtenden und nicht leuchtenden Flammen, d.h. rußhaltigen und nicht rußhaltigen Flammen getroffen. Leuchtende Flammen entstehen bei Flammenschichtdicken kleiner als 1 m und machen Berechnungen durch die auftretende Rußstrahlung zusätzlich kompliziert. Der verwendete Prüfkörper wird aufgrund seiner äußeren Kantenlänge von einem Meter unmittelbar über dem Prüfobjekt eine Flammendicke von annähernd 1 m besitzen. Der gebildete Ruß wird in der Flamme komplett verbrannt und eine Berechnung der Rußbildung kann entfallen.

Als Vereinfachung wird weiter angenommen, dass eine Absorption und Streuung, der von dem brennenden Objekt emittierten Wärmestrahlung nicht auftritt. Dies kann durch den Wasserdampf, das Kohlenstoffdioxid oder den Staub geschehen, welche sich in der Atmosphäre zwischen dem brennenden und dem bestrahlten Objekt befinden. Die Verbrennungstemperatur wird als konstant über den gesamten Verbrennungsvorgang und an jeder Stelle der Flamme angenommen [53].

$$\dot{Q}_{12} = \varphi_{12} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

mit:	\dot{Q}_{12}	:	[W]	Wärmestrahlung von Fläche 1 zur Fläche 2
	φ_{12}	:	[]	Winkelverhältnis von Fläche 1 zur Fläche 2
	σ	:	$5,670 \cdot 10^{-8} W/m^2$	Strahlungskonstante
	ε	:	1,0	Emissionsgrad der strahlenden Fläche
	A_1	:	$2,25 m^2$	Gesamtfläche der Flamme
	T_1	:	1173 K	Temperatur der heißen Gase
	T_2	:	293 K	Temperatur der bestrahlten Fläche

Das Winkelverhältnis ist eine rein geometrische Beziehung. Eine große und parallel zum Prüfkörper befindliche Fläche nimmt einen größeren Anteil der emittierten Strahlung auf, als eine kleine und rechtwinklig stehende Fläche.

In der Literatur liegen Formeln für verschiedene Geometrien und Anordnungen der Flächen zueinander vor.

In der dieser Berechnung wird die emittierende Fläche als A_1 und die des Strahlrohrführers als A_2 bezeichnet. Die Flächen liegen parallel zueinander und haben eine unterschiedliche Größe. Diese Annahme gilt für den Moment, wenn sich der um die eigene Achse drehende Prüfkörper parallel zur benachbarten Fläche befindet und die Strahlenbelastung das Maximum erreicht.

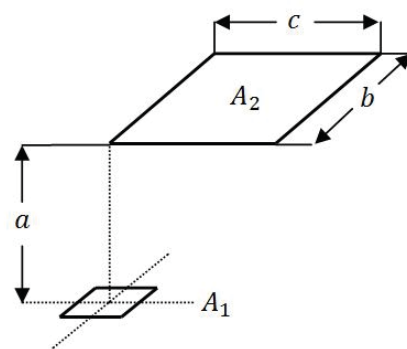


Abb. 33: Parallele Rechteckfläche mit einer Ecke in der Mittelsenkrechten des Flächenelementes

Das Winkelverhältnis kann durch die Beziehung mit einer parallelen Rechteckfläche mit einer Ecke in der Mittelsenkrechten der emittierenden Fläche angenommen werden (Abb. 33). Die Position der

Mittelsenkrechten der Fläche A_1 auf die Fläche A_2 wird durch die Höhe der Unterkonstruktion bestimmt. Diese wird mit 0,5 m angenommen. Es entstehen zwei kleine und zwei größere Flächen. Das Winkelverhältnis ist zunächst einzeln für jede Teilfläche zu berechnen. Eine anschließende Summierung der einzelnen Winkelverhältnisse ergibt im Anschluss die Gesamte auf die Fläche einwirkende Wärmestrahlung [55].

Die Variablen B und C stehen für die Seitenverhältnisse und sind zuvor zu bestimmen. Es wird angenommen, dass der Strahlrohrführer eine rechteckige Fläche mit den Maßen 1,8 m · 0,5 m bildet. Die Entfernung ergibt sich aus der Annahme, dass der Strahlrohrführer 2,5 m von der Drehachse entfernt steht. Wenn die Oberfläche des Strahlrohrführers und die Prüfkörperoberfläche parallel stehen, ergibt sich damit eine Entfernung zu der Oberfläche von 2,0 m.

Die Berechnung der Winkelverhältnisse ergibt $\varphi_{12K} = 0,012$ für die kleine und $\varphi_{12G} = 0,016$ für die große Fläche. Dieser Wert ist ebenfalls in der Tabelle unter *Anhang I Winkelverhältnisse* grafisch abzulesen.

$$B = \frac{b}{a} \quad C = \frac{c}{a}$$

$$B' = \frac{b'}{a}$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \arctan \frac{C}{\sqrt{1+B^2}} + \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \arctan \frac{B}{\sqrt{1+C^2}} \right)$$

mit:	φ_{12}	:	[]	Winkelverhältnis von Fläche 1 zur Fläche 2
	B	:	[]	Geometrisches Seitenverhältnis kleine Fläche
	B'	:	[]	Geometrisches Seitenverhältnis große Fläche
	C	:	[]	Geometrisches Seitenverhältnis der Fläche
	b'	:	1,625 m	Untere Hälfte des Strahlrohrführers
	b	:	0,175 m	Obere Hälfte des Strahlrohrführers
	a	:	2,000 m	Abstand der Flächen
	c	:	0,250 m	Breite einer Teilfläche

Nach der Addition der Winkelverhältnisse kann die Berechnung der einwirkenden Strahlung auf den Strahlrohrführer erfolgen. Die angenommenen Werte sind mit denen zur Berechnung der Strahlungsleistung identisch. Die Bezugstemperatur T_2 wird mit 20 °C bzw. 293 K angenommen. Es ergibt sich damit ein Wärmefluss von 23677 W bzw. 2,6 W/cm² auf die bestrahlte Fläche. Der ermittelte Wert kann mit den kritischen Bestrahlungswerten für verschiedene Stoffe in Bezug gesetzt werden (Tab. 13).

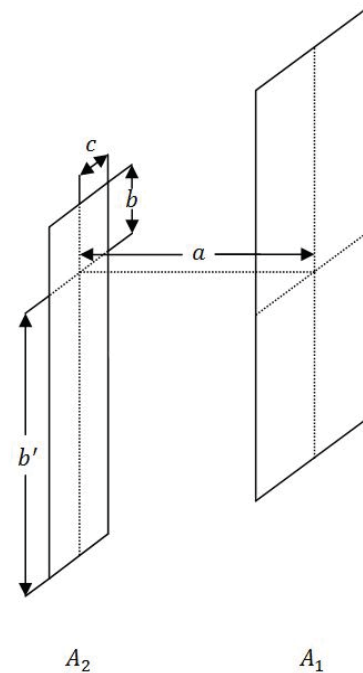


Abb. 34: Vorstellung und Anordnung der Viertelflächen

$$\dot{q}_{12GE} = \frac{\dot{Q}_{12} \cdot m^2}{A_2 \cdot 10000 \text{ cm}^2} = 2,6 \text{ W/cm}^2$$

mit:	\dot{q}_{12GE} :	$[W/cm^2]$	Wärmestrahlung von Fläche 1 zur Fläche 2
	\dot{Q}_{12} :	23677 W	Wärmestrahlung von Fläche 1 zur Fläche 2
	A_2 :	$0,9 \text{ m}^2$	Fläche Strahlrohrführer

Aus Tab. 13 wird deutlich, dass die Strahlung in 2,0 m Entfernung zum Brandereignis zu Schmerzen auf der blanken Haut, wie beispielsweise an den Händen, führen würde. Bereits durch einfache Textilkleidung kann hier Abhilfe geschaffen werden; Spezialkleidung schützt noch effektiver. Aus Abb. 35 wird deutlich, wie stark der Wärmefluss mit steigender Entfernung abfällt. Die Wurfweite des Strahlrohrs begrenzt die maximal mögliche Entfernung zum Prüfobjekt.

Stoff	Bestrahlungsstärke in W/cm ²	
	Selbstzündung	Fremdzündung
Ungestrichenes dunkles Holz (ofentrocken)	3,4	1,3
Gestrichenes Holz (trocken)		1,7 – 2,5
Sperrholz		1,7
Ungestrichene poröse Holzfaserplatte	2,5	1,1
Ungestrichene harte Holzfaserplatte		1,3
Duroplastischer Kunststoff	8,4	
Textilien (allgemein)	3,4	
Baumwollgewebe	2,4	1,3
Einwirkung auf die menschliche Haut	Bestrahlungsstärke in W/m ²	
Maximale Bestrahlungsstärke bei unbestimmter Bestrahlungsdauer	0,13	
Schmerz nach 10-20 s	0,4	
Schmerz nach 3 s	1,05	
Blasen nach 10-12 s	1,05	

Tab. 13: Kritische Bestrahlungswerte für verschiedene Stoffe [66].

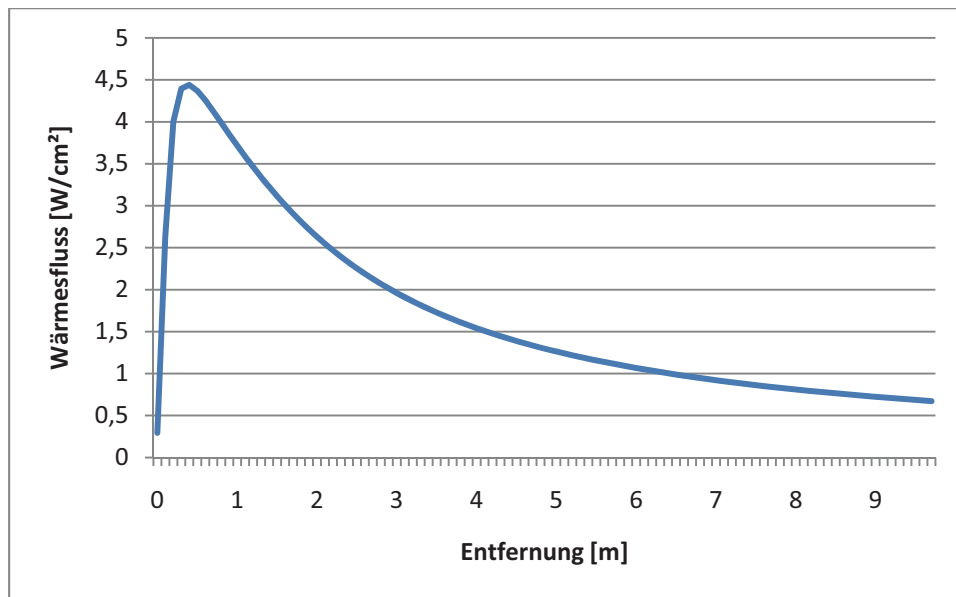


Abb. 35: Wärmefluss in Abhängigkeit der Entfernung zum Prüfobjekt

6.7. Prüfungsumgebung

Die Prüfungsumgebung kann durch die Absorption und Reflexion der Wärmestrahlung einen wesentlichen Einfluss auf die Abbrandvorgänge ausüben.

Aus dem Boltzmann'schen Gesetz wird deutlich, dass es durch die Erwärmung der reflektierenden Oberfläche zu einer verstärkenden Rückreflexion kommt. Werden jedoch ausreichende Sicherheitsabstände zum Prüfobjekt eingehalten, tritt eine im Verhältnis zur Verbrennungstemperatur geringe Erwärmung umliegender Gegenstände auf [53] und der Einfluss auf die Verbrennungsvorgänge sinkt.

Als ein ausreichender Abstand werden mindestens 6 m von der Drehachse des Prüfkörpers zur nächsten Wand sowie eine Raumhöhe von 8 m angesehen.

7. Prüfungsdurchführung

Nachdem alle Anforderungen an die Geräte zur Prüfung beschrieben worden sind, kann die Prüfungsvorbereitung, Durchführung und Auswertung erfolgen.

7.1. Versuchsvorbereitungen und Prüfungsanordnung

Im Protokoll werden der Name des Prüfers, die relative Luftfeuchtigkeit, der Ort sowie das Datum und die Uhrzeit der Prüfung vermerkt.

Alle zur Anwendung gebrachten Materialien (Heptan, Wasser und Schaummittel) und die Raumluft sind auf die korrekte Temperierung zu überprüfen (*siehe Tab. 16, Seite 79*). Es ist darauf zu achten, dass es sich bei den gemessenen Materialtemperaturen um die Kerntemperatur handelt.

Die Schaumrohrhalterung wird, von der Spitze des Schaumrohrs gemessen, in 2,5 m Entfernung von der Drehachse der Prüfungsplattform bzw. von dem Mittelpunkt des Prüfobjekts aufgestellt (*siehe 6.6. Wärmestrahlung, Seite 63*). Die Höhe des Schaumrohrs ist dabei so zu wählen, dass das horizontal ausgerichtete Rohr auf die obere Kante des Prüfkörpers zeigt (*Abb. 36*).

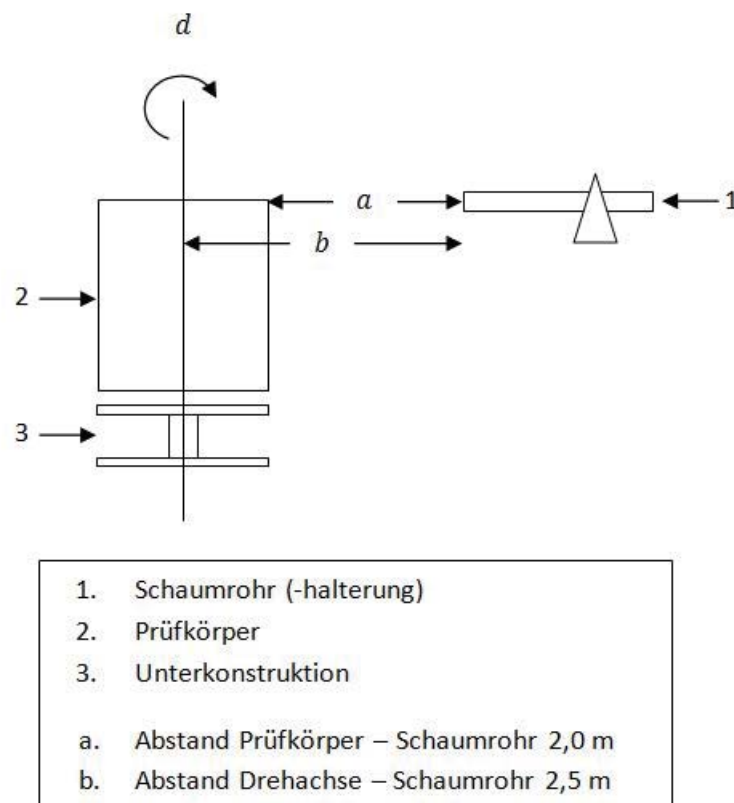


Abb. 36: Aufbauskinne Prüfkörper parallel zu Schaumrohrhalterung

Die Holzstäbe aus der Normklimakammer sind zum Prüfkörper aufzuschichten. Die Holzfeuchte ist an fünf repräsentativen Holzstäben zu messen und zusammen mit der Holztemperatur im Protokoll zu vermerken.

Anschließend sind die Funktion der Prüfungsplattform und die korrekte Umdrehungsgeschwindigkeit zu überprüfen. Die komplette Grundfläche ist waagrecht auszurichten und muss dies auch während der Drehung bleiben. Ansonsten ist später eine ungleichmäßige Beschäumung zu erwarten. Abschließend ist die Plattform von groben Verunreinigungen zu säubern.

Die Prüfung des Schaumrohrs ist mit der Schaumrohrentlüftung verbunden, d.h. der Füllung der Schläuche mit Schaummittellösung. Die nach Abschluss der Prüfung in den Schläuchen verbleibende Schaummittellösung wird folglich nicht in die Prüfungsauswertung mit einbezogen. Aufgrund der nachteiligen Veränderung von angesetzten Schaummittellösungen darf dieses nicht älter als eine Stunde sein. Zur Überprüfung des korrekten Schaumrohrdurchflusses von 5 l/Min. kann analog zur EN 1568, 2008 [27] vorgegangen werden. Dazu wird für genau sechs Sekunden Schaum in ein tariertes Gefäß gegeben. Aus dem Volumen und der Dichte kann anschließend der Durchfluss bestimmt werden. Dieser ist durch das Verstellen des Stellrings oder falls erforderlich durch das Verringern des Düsendrucks auf $(0,75 \pm 0,025)$ kg/min einzustellen.

Wenn für die Prüfung fluorierte Schaummittel eingesetzt werden, sind diese aufzufangen und nach der Prüfung der Sonderabfallverwertung zuzuführen.

Sobald alle Vorbereitungen abgeschlossen sind, kann zuerst das Wasser und anschließend der Brennstoff in die bereits mittig unter dem Prüfkörper positionierte Zündwanne gegeben werden.

Bei eingeschalteter Abluftanlage ist die Einhaltung der maximalen zulässigen Strömungsgeschwindigkeit der Luft von 0,2 m/s im oberen und unteren Bereich der Holzprüfkrippe zu messen und zu protokollieren.

Der Luftdruck ist zu Beginn der Prüfung zu bestimmen und ist während der gesamten Prüfung im Versuchsraum zu halten.

Das Gerät zur Bestimmung des Sauerstoffs in der Raumluft selber ist eingeschaltet und neben der Schaumrohralterung zu platzieren.

Die Prüfung beginnt, sobald der Brennstoff gezündet wurde.

7.2. Vorbrennzeit


Nach zwei Minuten ist die Zündwanne unter dem Prüfkörper ggf. unter der zu Hilfenahme von Eisenstangen o.ä. zu entfernen. Unabhängig davon, ob der Brennstoff bereits vollständig verbrannt ist, oder nicht.

Sieben Minuten nach der Zündung wird mit der Drehung des Prüfkörpers begonnen; eine Minute später mit der Schaumaufgabe.

7.3. Schaumaufgabe

Die Führung des Schaumrohrs wird von einem menschlichen Strahlrohrführer übernommen. Dieser bewegt das Schaumstrahlrohr nach Bedarf aufwärts und abwärts. Die Schaummittelaufgabe erfolgt kontinuierlich ohne Unterbrechungen bis zum vollständigen Löscherfolg.

Mit Beginn der Schaumaufgabe kommt es zu einer Steigerung der Brandintensität. Die gebildeten Verbrennungsrückstände und die Asche im äußeren Bereich des Prüfkörpers werden durch die mechanische Wirkung des Schaumstrahls entfernt. Dadurch verbessern sich die Verbrennungsbedingungen an der Holzoberfläche. Weiterhin werden größere Mengen an Luftsauerstoff zur Brandstoffoberfläche mitgerissen. Es zeigen sich deutlich größere Flammerscheinungen als zuvor [3].



	Bezeichnung	Beginn [Min.]	Dauer [Min.]
1.	Prüfungsvorbereitung	-	-
2.1.1	Vorbrandzeit mit Zündwanne	0	2
2.1.2.	ohne Zündwanne	2	6
2.2.	Beginn der Rotation	7	bis Ende Pkt. 2.4.
2.3.	Schaummittelaufgabe	8	keine Vorgabe
2.4.	Beobachtungszeit	nach Pkt. 2.3.	min. 20
3.	Auswertung	-	-

Tab. 14: Übersicht Prüfungsablauf

Auf die obere, horizontale Seite aufgegebenen Schaum muss gegen die Wärme des Brandes mit der Schwerkraft nach unten vordringen. Es ist nicht zu erwarten, dass der Schaum von oben in alle unteren Bereiche des Prüfkörpers vordringen kann, um dort zu wirken. Der seitlich aufgebene Schaum kann dort hingelangen. Dieser muss nicht gegen eine vergleichbar große Hitze vordringen, wird jedoch von der Schwerkraft eher gebremst als beschleunigt.

Eine hohe Eindringtiefe ist mit Fließbewegungen des Schaums verbunden. Diese führen zu einer zusätzlichen Beanspruchung des Schaums. In Abhängigkeit der Temperatur, der Schaumstruktur und der Verschäumungszahl wird die Strahlung vom Schaumteppich absorbiert, weitergeleitet und reflektiert [24]. Dies führt zu einer schnelleren Alterung (nachlassende Fließfähigkeit, Entwässerung des Schaums) und damit zu einer höheren Anforderung an die Leistungsfähigkeit des Schaums.

Mit dem zunehmenden Abbrand bildet die Oberfläche Unebenheiten und Risse aus. Das ablaufende Schaummittel bewegt sich dabei vorzugsweise auf den Bahnen der geringsten Widerstände und wird dabei hohe Grenzflächenenergien an den heißen Stellen der Glut meiden [3]. Diese Stellen werden erst mit der Aufgabe ausreichender Löschmittelmengen erreicht.

Der Löscherfolg gilt als erreicht, sobald der komplette Prüfkörper mit einem Schaumteppich bedeckt ist, keine Flammenerscheinungen mehr wahrnehmbar oder keine glimmende Glut mehr zu sehen ist.

7.4. Rückbrandbeständigkeit

Die Schaumaufgabe wird beendet, sobald der Brand gelöscht ist. Der Schaumteppich verhindert eine Betrachtung der Holzoberfläche, auch durch Hilfsmittel (z.B. einer Wärmebildkamera). Unter dem Schaumteppich kann die Glut weiter brennen, da diese nur einen geringen Sauerstoffbedarf zur Verbrennung hat und sich während der Vollbrandphase ein Wärmepotenzial im schlecht wärmeleitenden Holz gebildet hat. Eine erneute Entzündung nach dem Entfernen des Schaumteppichs wäre also möglich, wenn der Schaum nicht alle Glutnester in der Tiefe des Holzes erreichen konnte.

Innerhalb der 20 minütigen Beobachtungsphase nach dem Beenden der Schaummittelaufgabe, ist es bei Bedarf zulässig einmalig Nachlöscharbeiten durchzuführen. Die Beobachtungsphase wird dann erneut mit derselben Dauer begonnen. Eine Begrenzung der Anzahl der zulässigen Nachlöscharbeiten ist wichtig, damit ein während der eigentlichen Schaumaufgabe bewusst zu dünn aufgegebener Schaumteppich nicht mehrmals nach Bedarf geschlossen wird, um so den Schaummittelverbrauch zu senken und eine bessere Einstufung zu erreichen.

Die Drehung der Prüfungsplattform wird nach der Beobachtungsphase beendet. Die Windverhältnisse sind abermals zu bestimmen und auf die Einhaltung der Grenzwert zu kontrollieren.

Nicht alle Schaumteppiche bilden eine dichte Sperrschicht für die pyrolysen Gase aus. Einen nicht wasserfilmbildenden Schaumteppich aus Mittelschaum auf einer Flüssigkeit können zündfähige Gase beispielsweise nach 10 bis 15 Minuten durchqueren (50 cm hoch; kein Wasserfilmbildner) [21]. Es ist daher nach Beendigung der Beobachtungsphase eine Zündquelle an die Oberfläche der obersten Holzstablage zu führen. Sollte eine Zündung von brennbaren Gasen erfolgen, müssen diese wieder alleine verlöschen. Im Anschluss wird die Oberfläche jeweils in der 1, 12 und 25 Holzstablage des Prüfkörpers in einem Radius von 0,1 m um die Drehachse freigelegt. Die gemessene Oberflächentemperatur darf nicht mehr als 100 °C betragen.

Der eigentliche Prüfungsvorgang ist nun beendet und die verbrauchte Schaummittelmenge kann zur Versuchsauswertung bestimmt werden.

7.5. Bestimmung der Löschwirkung

Die Löschwirkung eines Löschmittels kann über verschiedene Bewertungssysteme erfasst werden. Die Brandlast kann so lange vergrößert werden, bis eine fest definierte Löschmittelmenge nicht mehr zur Brandbekämpfung ausreicht. Dieses Vorgehen wird bei der Handfeuerlöcherprüfung nach DIN EN 3, 2007 [30] angewendet. Dies kann mitunter zu umfangreichen Versuchsaufbauten und der Durchführung von mehreren Tests führen, bis die richtige Objektgröße für die jeweilige Löschmitteleffektivität gefunden ist.

Wenn der Prüfkörper geometrisch unverändert bleibt, kann die Effektivität über die zum Löscherfolg benötigte Zeitspanne, oder die verwendete Löschmittelmenge bestimmt werden. Dazu ist bei beiden Vorgehensweisen eine genau dosierte Schaummittelaufgabemenge nötig. Die Beurteilung aufgrund der Aufgabezeit führt zu der zusätzlichen Fehlermöglichkeit der Zeitnahme und macht die zeitliche

Bewertung von Nachlöscharbeiten schwierig. Die geeignetste Methode zur Beurteilung des Löschvermögens ist daher über die Messung des benötigten Löschmittels.

Die Aufgabezeit für 10,27 l Löschmittel beträgt mit der gewählten Gerätekombination 123 Sekunden. In dieser Zeitspanne hat die Prüfungsplattform 12 Umdrehungen absolviert. Das beste Löschmittel würde rechnerisch 4,97 l in 60 Sekunden also 6 Umdrehungen und das schlechteste 16,23 l in 195 Sekunden und 19,5 Umdrehungen benötigen.

Eine geeignete Klassifizierung erfolgt in 1,25 l Schritten bzw. in 14 Effektivitätsklassen. Das rechnerisch beste Schaummittel würde Klasse A2 erreichen. Ein Löscherfolg mit noch weniger Löschmittel scheint aufgrund der Berechnungen nicht realisierbar zu sein und begründet die Zusammenfassung mehrerer 1,25 l Schritte. Eine mittlere Löschleistung wird in die Klasse A8 eingestuft; das rechnerisch schlechteste Löschmittel in die Klasse A11.

Die ersten Prüfungen werden zeigen, ob eine ausreichende Differenzierung möglich ist. Nach den jetzigen Berechnungen erscheinen die gewählten Intervalle eine ausreichende Differenzierung zu ermöglichen. Geringe Schwankungen im Löschmittelverbrauch in zwei Prüfungen lassen dennoch eine eindeutige Einordnung in eine Effektivitätsklasse zu.

Die Prüfung ist für jedes Schaummittel zwei Mal durchzuführen, um die Klassifizierung anhand des Mittelwerts vorzunehmen. Wenn größere Differenzen in der Aufgabemenge d.h. $\geq 1,25$ l zu der vorherigen Prüfung auftreten, ist ein dritter Test durchzuführen. Sollte dieser Wert die zulässige Differenz zu einem der vorherigen Werte aufweisen, sind nur diese beiden Werte zu Mitteln und in die Klassifizierung einzubringen. Alle drei Prüfungsergebnisse werden gemittelt, wenn beide Ergebnisse der ersten beiden Prüfungen mit der zulässigen Abweichung um den dritten Wert anzuordnen sind.

Die gesamte Prüfung der Löschleistung ist zusätzlich mit einer aus künstlichem Meerwasser angesetzten Schaummittellösung durchzuführen, wenn das Schaummittel von dem Hersteller als Meerwasserunverträglich beschrieben wird. Die Ergebnisse der Prüfungen mit beiden Lösungen sind gesondert anzugeben. Eine Mittelwertbildung entfällt, um Meerwasserunverträgliche Schaummittel nicht zu benachteiligen.

Die Kennzeichnung des Löschvermögens erfolgt durch den Großbuchstaben A für die Brandklasse nach EN 2 und der laufenden Nummer für die erreichte Löschmittelklasse.

Klassifizierung	Menge [l]	Aufgabezeit[Sek.]	Rotationen
A1	≤ 3,75	45	4,5
A2	≤ 5,00	60	6,0
A3	≤ 6,25	75	7,5
A4	≤ 7,50	90	9,0
A5	≤ 8,75	105	10,5
A6	≤ 10,00	120	12,0
A7	≤ 11,25	135	13,5
A8	≤ 12,00	150	15,0
A9	≤ 13,75	165	16,5
A10	≤ 15,00	180	18,0
A11	≤ 16,25	195	19,5
A12	≤ 17,50	210	21,0
A13	≤ 18,75	225	22,5
A14	≤ 20,00	240	24,0

Tab. 15: Klassifizierung der Löschmittel

Die Klassifizierung des Schaums kann nur dann erfolgen, wenn die Beobachtungszeit erfolgreich verstrichen ist. Einen Einfluss auf die Bewertung hat nur die tatsächlich verbrauchte Löschmittelmenge.

Auf eine gesonderte Klassifizierung und Angabe der Rückbrandbeständigkeit wird verzichtet. Es könnte ansonsten beabsichtigt werden, mehr Schaum zu verwenden als für die eigentliche Brandbekämpfung nötig wäre, um bei dem anschließenden Test der Rückbrandbeständigkeit eine bessere Einstufung zu erzielen. Das eigentliche Ergebnis, der im Vordergrund stehenden Löschwirkung, würde so verschleiert werden.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass die Anforderungen der EN 1568, 2008 [27] an die Schaummitteleigenschaften bis auf die Bestimmung des Spreitungskoeffizienten grundsätzlich für Klasse-A Schaummittel übernommen werden können. Für die Bestimmung der Fließfähigkeit des Schaumteppichs auf einer Feststoffoberfläche muss ein geeignetes Verfahren entwickelt werden.

Als Prüfkörper wurde eine Holzprüfkrippe aus Kiefernholz gewählt. Die festgelegten Abmessungen (25 Schichten mit je 10 Holzstäben der Maße (40 ± 2) mm · (40 ± 2) mm · (1000 ± 20) mm in gleichmäßigen 60 mm Abständen) stellen die Wärmestrahlungssituation eines realen Brandgeschehens nach. Die Bauweise der Holzprüfkrippe verhindert eine direkte Beschäumung des gesamten Prüfkörpers und stellt besondere Anforderungen an die Fließeigenschaften des Schaummittels. In Versuchen war eine erfolgreiche Brandbekämpfung an einem vergleichbaren Brandobjekt möglich.

Die Holzverbrennung geschieht sowohl in der Gasphase als auch unter Glutbildung an der Oberfläche. Die Eignung als Prüfmaterial resultiert zudem besonders aus einer zunehmenden Zerklüftung der Oberfläche, der Ausbildung einer dicken Holzkohleschicht und dem häufigen Vorkommen als Brandlast in der Praxis.

Die Zündung des Prüfkörpers erfolgt durch eine mit Wasser und $(7,2 \pm 0,1)$ l Heptan gefüllte Zündwanne im unteren Bereich des Prüfkörpers. Eine Zündung mit Propangas ist technisch schwieriger umzusetzen und wird daher nicht genutzt. Es konnte gezeigt werden, dass weniger Propan zur Zündung benötigt wird, da dieses den Prüfkörper in einer größeren Flamme einschließt und so einen besseren Wärmeübergang besitzt. Sollten praktische Versuche zeigen, dass eine Zündung des gesamten Prüfkörpers durch Heptan mit räumlich unterschiedlichen Abbrandverhalten einzelner Holzstäbe verbunden ist, sollte Propangas zur Zündung verwendet werden.

Die Umsetzung einer weitgehend maschinellen Beschäumung konnte durch die Platzierung des Prüfkörpers auf einer sich um die eigene Achse drehenden Prüfungsplattform, in Kombination mit einem nur in vertikaler Richtung beweglichen Schaumrohr, erreicht werden. Sobald ausreichend Erfahrungen über die effektivste vertikale Schaumrohrstellung bzw. -bewegung vorliegen, kann dieses problemlos maschinell bewegt werden.

Die Umdrehung der Prüfungsplattform wurde auf 6 Umdrehungen in (60 ± 3) s festgelegt und ermöglicht eine adäquate Schaummittelausbringung über den gesamten Prüfkörper.

Eine durchschnittlich erforderliche Löschmittelmenge zur erfolgreichen Brandbekämpfung konnte auf den Erfahrungswerten der Handfeuerlöcherprüfung nach DIN EN 3, 2007 [30] rechnerisch bestimmt werden. Es ergab sich eine durchschnittlich erforderliche Schaummenge von 10,27 l mit einer maximalen Abweichung von 5,96 l zu dem schlechtesten Löschmittel. Diese Werte bilden die Grundlage für die Bemessung des Schaumrohrdurchflusses und für die Erstellung eines Klassifizierungssystems des Löschvermögens.

Als Schaumrohr kann das bereits in der DIN EN 1568, 2008 [27] genutzte Schaumrohr der Kleinlöschprüfung mit einem Durchfluss von 5 l/min genutzt werden. Die Nutzung von CAFS ist möglich, jedoch sind bisher keine Kleinlöschgeräte erhältlich. Die Prüfung bleibt vorerst auf

Schwerschäume begrenzt, da diese am effektivsten gegen Feststoffbrände mit Glutbildung eingesetzt werden können.

Es wurden die Anforderungen an den Holzbrennstoff (Feuchte, Dichte), die Prüfungsumgebung (Windverhältnisse, Sauerstoffkonzentration, Luftdruck und -feuchtigkeit) sowie die verwendeten Materialien (Temperaturen, Qualität des Wassers und des Brennstoffs) festgelegt und begründet. Es ist zu erwähnen, dass der schwankende Harzgehalt im Holz einen nachgewiesenen Einfluss auf den Brandverlauf besitzt, jedoch nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu bestimmen ist. Auf eine Bestimmung muss daher verzichtet werden.

Material		Anforderung / Grenzwerte
Holz	Feuchte	$(13 \pm 1) \%$
	Dichte	$(0,52 \pm 0,10) \text{ kg/cm}^3$
Windverhältnisse		max. 0,2m/s
Sauerstoffkonzentration		$(21 \pm 1) \text{ Vol}\%$
Luftdruck		Umgebungsluftdruck
Luftfeuchtigkeit		Umgebungsluftfeuchtigkeit
Temperaturen	Luft	$0 \text{ }^\circ\text{C} - 30 \text{ }^\circ\text{C}$
	Holz	$(20 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$
	Brennstoff	$(17,5 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$
	Wasser	$(17,5 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$
	Schaummittel	$(17,5 \pm 2,5) \text{ }^\circ\text{C}$
Qualität	Trinkwasser	Trinkwasserqualität
	Künstliches Meerwasser	siehe Tab. 6, Seite 31
	Heptan	siehe Tab. 8, Seite 42

Tab. 16: Übersicht Materialanforderungen / Grenzwerte

Auf Grundlage der Wärmestrahlungsberechnungen konnte die Entfernung von 2,5 m (Ausgangspunkt: Drehachse der Prüfplattform) als Standort des Strahlrohrs vom Prüfkörper festgelegt werden. Als ein ausreichender Abstand zwischen der Drehachse des Prüfkörpers zur nächsten Wand werden mindestens 6 m sowie eine Raumhöhe von 8 m angesehen.

Der Prüfungsablauf für eine reproduzierbare Umgebung konnte anschließend begründet und festgelegt werden (Tab. 17).

	Bezeichnung	Beginn [Min.]	Dauer [Min.]
1.	Prüfungsvorbereitung	-	-
2.1.1	Vorbrandzeit mit Zündwanne	0	2
2.1.2.	ohne Zündwanne	2	6
2.2.	Beginn der Rotation	7	bis Ende Pkt. 2.4.
2.3.	Schaummittelaufgabe	8	keine Vorgabe
2.4.	Beobachtungszeit	nach Pkt. 2.3.	min. 20
3.	Auswertung	-	-

Tab. 17: Übersicht Prüfungsablauf

Die Klassifizierung erfolgt nach der aufgegebenen Löschmittelmittelmenge (Tab. 15) und ist auf der Grundlage der benötigten Löschmittelmenge festgelegt worden. Die gewählte Einteilung der Klassen gewährleistet eine ausreichende Differenzierung der verschiedenen Schäume und kompensiert geringfügige und nicht zu verhindernde Schwankungen in der Prüfungsdurchführung. Jede Prüfung muss daher mindestens zweimal mit einer aus Trinkwasser und einer aus künstlichem Meerwasser bestehenden Schaummittellösung durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind dann gesondert anzugeben.

Klassifizierung	Menge [l]	Aufgabezeit[Sek.]	Rotationen
A1	≤ 3,75	45	4,5
A2	≤ 5,00	60	6,0
A3	≤ 6,25	75	7,5
A4	≤ 7,50	90	9,0
A5	≤ 8,75	105	10,5
A6	≤ 10,00	120	12,0
A7	≤ 11,25	135	13,5
A8	≤ 12,00	150	15,0
A9	≤ 13,75	165	16,5
A10	≤ 15,00	180	18,0
A11	≤ 16,25	195	19,5
A12	≤ 17,50	210	21,0
A13	≤ 18,75	225	22,5
A14	≤ 20,00	240	24,0

Tab. 15: Klassifizierung der Löschmittel

9. Fazit

Es konnte aufgezeigt werden, dass die einheitliche Prüfung von Klasse-A-Schaummitteln an einem geeigneten Prüfkörper möglich ist. Dabei sind zahlreiche Einflüsse zu beachten um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Die Umsetzung von ersten Versuchen wäre nach dem Anfertigen der Plattformkonstruktion mit bereits vorhandenen Geräten und Materialien der EN 1568, 2008 [27] mit geringen Aufwand realisierbar.

Sobald die ersten Versuche erfolgreich abgeschlossen werden konnten, ist eine Erweiterung des Prüfungsszenarios problemlos denkbar. Eine komplett maschinelle Schaummittelaufgabe, die Verwendung von CAFS im verkleinerten Maßstab, der Austausch einiger Holzprüfstäbe gegen andere Materialien oder die Verkleinerung des Versuchsmaßstabs sind möglich.

10. Glossar

Begriff	Bedeutung
Absorption	Aufsaugen oder aufnehmen von etwas
Diffusionsflamme	Die brennbaren Gase im Flammenkern werden schlechter mit dem durch den Flammenrand diffundierenden Sauerstoff versorgt und verbrennen später und ggf. unvollständig
Dreidimensionales Makromolekül	Große Moleküle, die aus vielen, bis zu mehreren hunderttausend, gleichen oder unterschiedlichen Bausteinen bestehen
Edukte	Bezeichnung eines Stoffes vor einer Reaktion; auch: Ausgangsstoff genannt
Emulsion	Fein verteiltes Gemisch zweier normalerweise nicht mischbarer Flüssigkeiten
Endotherme Reaktion	Vorgang (meist chemische Reaktion) bei der Wärme gebunden wird
Ether	Organische Verbindungen, die eine Ethergruppe als funktionelle Gruppe besitzen
Exotherme Reaktion	Vorgang (meist chemische Reaktion) bei der Wärme frei wird
Harzgänge	Mit Harz oder ähnlichen Substanzen gefüllte Hohlräume
Heterogene Reaktion	Vorgang (meist chemische Reaktion) zwischen zwei Stoffen im unterschiedlichen Aggregatzustand
Homogene Reaktion	Vorgang (meist chemische Reaktion) zwischen zwei Stoffen im gleichen Aggregatzustand
Hydrolytische Spaltung	Spaltung einer chemischen Verbindung mit Wasser
Kationen	Positiv geladene Teilchen
Konvektion	Wärmeausbreitung durch Wärmeströmung in einem Gas oder Fluid
Kritische Löschmittelmenge	Mindestens erforderliche Löschmittelmenge für eine erfolgreiche Brandbekämpfung
Laminare Strömung	Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen ohne Verwirbelung
Produkte	Bezeichnung eines bei einer chemischen Reaktion entstandenen Stoffes; auch: Endstoff genannt
Quellen und Schwinden	Quellen bezeichnet die Zunahme der Abmessungen und des Volumens eines Stoffes durch Einlagerung von Flüssigkeiten oder Gasen. Schwinden ist der gegenläufige Vorgang. Die Ausdehnung nimmt quer- und längs zur Faser verschiedene Werte an.

Schergeschwindigkeit	Räumliche Veränderung der Flussgeschwindigkeit eines Fluids
Terpene	Eine umfangreiche Gruppe von kohlenstoffhaltigen Naturstoffen u.a. Bestandteil von Harzen und ätherischen Ölen.
Turbulente Strömung	Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen mit Verwirbelung
Wärmeströmung	Eine Form der Wärmeübertragung, bei der Wärme durch strömende Flüssigkeiten oder Gase übertragen wird; auch: Konvektion genannt

11. Literaturverzeichnis

- [1]. **de Vries, Holger.** *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum - Technik und Taktik.* Landsberg : ecomed verlagsgesellschaft AG & Co. KG, 2000.
- [2]. **International Fire Service Training Association.** *Principles of Foam Fire Fighting.* Oklahoma : Technical Services - Fire Protection Publications - Oklahoma State University, 1996.
- [3]. **Pleiß, Georg und Selinger, Ursula.** *Brandstörfälle in Chemikalienlagern.* Heyrothsberge : Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 2000.
- [4]. **Körner, Ulrich.** *Vorlesungsreihe Baukunde - WS 2008/2009.* Hamburg : Hochschule für Angewandte Wissenschaften, 2008.
- [5]. **Autorenkollektiv.** *Holzlexikon.* Hamburg : Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2010. ISBN-Nr.: 978-3-86820-086-7.
- [6]. **Pleiß, Georg.** *Brandbekämpfung in historischen Gebäuden - Institutbericht 441.* Heyrothsberge : Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 2006.
- [7]. **Kraus, Andrej.** *Untersuchung zum Abbrandverhalten von Holzstapeln (Bachelorarbeit).* Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg : s.n., 2008.
- [8]. **Specht, Eckhard.** *Vorlesungsreihe Verbrennungstechnik.* Universität Magdeburg : Fakultät für Verfahrens und Systemtechnik.
- [9]. **Hellwig, Manfred.** *Zum Abbrandverhalten von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe (Dissertation).* München : Institut für Landtechnik, 1988. ISSN-Nr.: 0931-6264.
- [10]. **Shafizadeh, F und McGinnis, G. D.** *Chemical composition and thermal analysis of cotton wood.* University of Montana : Elsevier, 1971.
- [11]. **Tillmann, D.A.** Review of Mechanisms Associated with Wood Combustion. *Wood Science.* 1981, Bd. 4, 13.
- [12]. **Lewellen, P.C., Peters, W.A. und Howard, J.B.** Cellulose pyrolysis kinetics and char formation mechanism. *Symposium (International) on Combustion.* 1977, Bd. 1, 16.
- [13]. **Baemel, D.** *Die Holzverbrennung als pyrotechnischer Vorgang.* Göttingen : Heizen mit Holz - Solentec, 1980.
- [14]. **Patzak, W.** Zur Theorie des Brandgeschehens von Holz. *VDI-Forschungsheft.* 1972, Nr. 552.
- [15]. **Schütt, E.** *Zur Kinetik der Kohlenstoffoxydation (Dissertation).* TU Berlin : Fakultät für Maschinenwesen, 1963.
- [16]. **Kollmann, F.** *Technologie des Holzes und der Werkstoffe.* Berlin : Springer, 1951.
- [17]. **Kollmann, F.** Zur Frage des Auftretens exothermer Reaktionen bei Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 1960, Bd. Heft 6, Jahrgang 18.

- [18]. **Noetzlin, G.** Temperatur- und Verbrennungsverlauf im Feuerraum eines Schmelstrichteressels. *Mitteilungen des VGB*. 1953, Heft 22.
- [19]. **Specht, E.** *Koppelung von Konvektion mit chem. Kinetik beim Abbrand von Kohlepartikeln (Dissertation)*. TU Clausthal : Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenbau, 1984.
- [20]. **Demidow, P.G.** *Die Verbrennung*. Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1956.
- [21]. **Pleß, Georg und Lubosch, Eberhard.** *Löschen mit Schaum*. Berlin : Rudolf Haufe Verlag GmbH & Co. KG, 1991.
- [22]. **Kuchling, Horst.** *Taschenbuch der Physik - 19. Auflage*. München : Carl Hanser Verlag München, 2007.
- [23]. **Innenministerium Landesbranddirektor Baden-Württemberg.** *Unfallkommission Tübingen*. Tübingen : Innenministerium Landesbranddirektor Baden-Württemberg, 29.Juli 2006.
- [24]. **Kretzmar, Axel.** *Ein Modell für die Brandbekämpfung mit Schäumen auf der Grundlage experimenteller und rechnerischer Untersuchungen - Dissertation (B)*. Halle : Martin-Luther-Universität Halle-Leipzig, 1989.
- [25]. **Leonhardt, Dr. Thomas.** Flourtensiede und -polymere in Schaumlöschmitteln - Chemie und Funktion. *Zeitschrift für Forschung und Technik im Brandschutz vfdb*. 2009, Heft 2.
- [26]. **Firma Dr. Sthamer.** *Schaum gegen Feuer*. Hamburg : Dr. Sthamer Hamburg, 2010.
- [27]. **CEN Europäisches Komitee für Normung - Beuth Verlag.** *EN 1568 - 3 - Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil 3: Anforderungen an Schaumlöschmittel zur Erzeugung von Schwerschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser mischbare) Flüssigkeiten*. Berlin : CEN Europäisches Komitee für Normung - Beuth Verlag, 2008.
- [28]. **Firma Dr. Sthamer.** *Produkt-Datenblatt STHAMEX-class-A*. Hamburg : Dr. Sthamer Hamburg, 2005.
- [29]. **Firma Dr. Sthamer.** Qualitätskriterien Schaumlöschmittel.[Online]2011. [Zitat vom: 27.02 2011.] http://www.sthamer.com/deutsch/f40_loeschschaum.html.
- [30]. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN EN 3 - Tragbare Feuerlöscher - Teil 7: Eigenschaften, Leistungsanforderungen und Prüfungen*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., 2007.
- [31]. **SIS - Standardiseringskommissionen i Sverige.** *Svensk Standard 1192 - Fire fighting equipment - Portable fire extinguishers*. Schweden : SIS - Standardiseringskommissionen i Sverige, 1985.
- [32]. **Brein, Dieter.** *Persönliches Schreiben*. Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.
- [33]. **Brein, Dieter und Schatz, Hermann.** *Modelbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufes von Feststoffbränden*. Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) - Forschungsbericht 27 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1975.
- [34]. **Brein, Dieter.** *Zum Abbrandverhalten von Feststoffen bei Bränden - Versuche und Modelrechnung - Teilll: Modelrechnung*. Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) -

Forschungsbericht 52 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1984.

[35]. **Brein, Dieter.** *Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandverlaufs von Feststoffbränden.* Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) - Forschungsbericht 30 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1976.

[36]. **Brein, Dieter.** *Modelbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufes von Feststoffbränden.* Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) - Forschungsbericht 34 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1978.

[37]. **Dittrich, Jürgen.** *Persönliches Schreiben bzgl. benötigeter Brennstoffmengen.* Dresden : Material Prüfanstalt Dresden, 2011.

[38]. **Tretzel, Ferdinand.** *Formeln, Tabellen und Wissenswertes für die Feuerwehr - 8 Auflage.* Stuttgart : W. Kohlhammer GmbH, 2003.

[39]. **Persson, Henry.** *Persönliches Gespräch.* Borås : SP Technical Research Institute of Sweden, 2010.

[40]. **Firma Isover.** *Akustic EP 5 Estrich-Dämmplatte - Technische Daten.* Ladenburg : SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG, 2011.

[41]. **Laborstudie im Auftrag der MPA Dresden.** *Extraction de la résine par l'acétone.*

[42]. **Drysdale, Dougal.** *An Introduction to Fire Dynamics Second Edition.* New York : John Wiley and Sons, 1999.

[43]. **Naruso, Tomohimo und Hasemi, Yuji.** *Wind Effect on Fire Behavior in Compartment.* USA : National Institute of Standards and Technology, 2000. NISTIR 6588 Volume 2.

[44]. **Pleiß, Georg und Selinger, Ursula.** *Untersuchung der Löschwirkung des Hochdrucklöschgerätes HDL 250 an Normbrandobjekten 13 A (Hochdrucknebel) und 144 B (Sprühschaum) - Institutsbericht Nr. 323.* Heyrothsberge : Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1994.

[45]. **Rodewald, Gisbert.** *Brandlehre - 6. Auflage.* Stuttgart : W. Kohlhammer GmbH, 2007.

[46]. **Österreichisches Institut für Bautechnik.** *Leitfaden für die Berechnung von Energiekennzahlen.* Wien : Österreichisches Institut für Bautechnik, 1999.

[47]. **Deutscher Wetterdienst.** Wetterlexikon. [Online] 2011. [Zitat vom: 10. 03 2011.] [http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=L&DAT=Luftfeuchte.](http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=L&DAT=Luftfeuchte)

[48]. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *DIN EN 1995-1-2 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall (EN 1995-1-2:2004+AC:2009).* Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.

[49]. **Fuchs, Peter.** *Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten.* Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) -

Forschungsbericht 29 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1975.

[50]. **Hosser, Dietmar.** *Ingenieurmethoden des Brandschutzes.* Braunschweig : Verein zur Förderung des Deutschen Brandschutzes - Referat 4, 2005.

[51]. **Osburg, Manuel.** *Bewertung analytischer Modelle zur Bestimmung der Temperaturen in Heißgasströmen (Bachelorarbeit).* Magdeburg : Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009.

[52]. **Delichatsios, M. A.** *Fire Growth Rates in Wood Cribs.* Hamburg : Elsevier Inc., 1976.

[53]. **Seeger, Dr. Paul.** *Untersuchung der Wärmeübertragung durch Strahlung von einem brennenden Objekt auf die Umgebung.* Karlsruhe : Forschungsstelle für Brandschutztechnik der Universität Karlsruhe (TH), 1972.

[54]. **Gregorzewski, Armin.** *Persönliches Schreiben bzgl. der Ausbreitung von Wärmestrahlung.* Hamburg : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2011.

[55]. **VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen.** *VDI Wärmeatlas.* Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006.

[56]. **Quintiere, J. G. und Lawson, J. R.** *Slide Rule Estimates of Fire Growth.* s.l. : National Bureau of Standards, 1985.

[57]. **Lingens, Albert.** *Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau.* TU München : Fakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, 2003.

[58]. **Gumz, W.** *Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik.* Berlin : Springer, 1962.

[59]. **FZ.** *Moderne Holzfeuerungen.* Schweiz : Forstwirtschaftliche Zentrale der Schweiz, 1978.

[60]. **Topf, P.** Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C - Erste Mitteilung: Stand der Forschung. *Holz als Roh- und Werkstoff.* 1971, Bd. Heft 7, Jahrgang 29.

[61]. **van der Held, E.F.M.** The reaction between a Surface of Solid Carbon and Oxygen. *Chem. Eng. Science.* 1961, Vol. 14.

[62]. **Wagner, W.** Berechnung von Holzfeuerungen für Wärmeträgeranlagen. *Wärme.* 1978, Bd. 85, Heft 4/5.

[63]. **Gloria.** *Herstellerdatenblatt - Schaumlöscher mit Kolbenkartusche.* s.l. : Gloria GmbH, 2010.

[64]. **Minimax.** *Herstellerdatenblatt - Minimaxol-Feuerlöscher.* s.l. : Minimax Mobile Service GmbH & Co. KG, 2009.

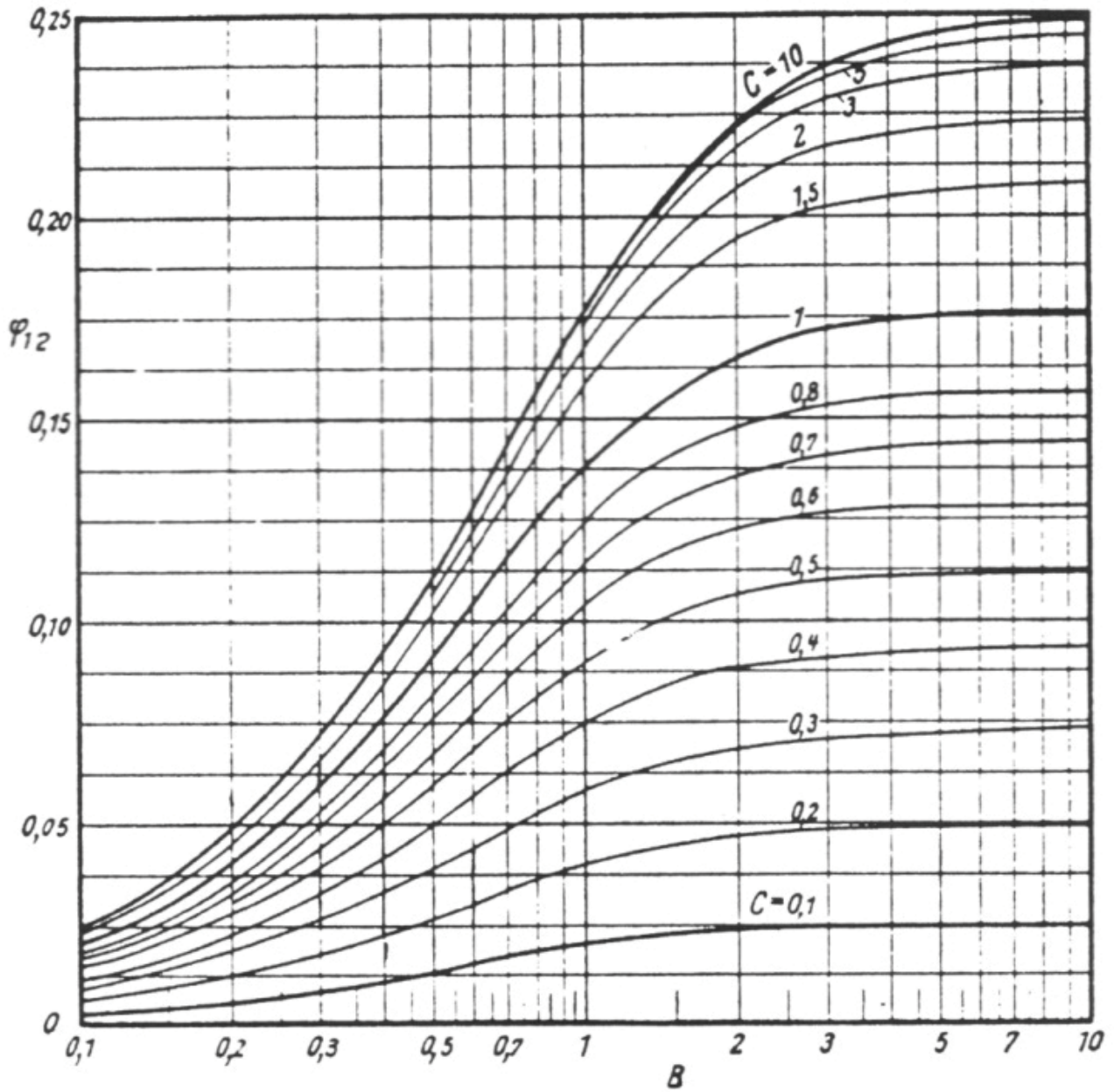
[65]. **Jockel.** *Herstellerdatenblatt - Classic Universal Handfeuerlöscher.* s.l. : Feuerschutz Jockel GmbH & Co. KG, 2010.

[66]. **Nelson, H.E.** *Radiant energy transfer in fire production engineering problem solving.* s.l. : Fire Technology, 1968.

- [67]. **Verordnung des Europäischen Parlamentes und des Rates.** *Verordnung (EG) Nr. 1272/2008.* Brüssel : Amtsblatt der Europäischen Union, 2008.
- [68]. **Kober, Prof. Dr. Cornelia.** *Vorlesungsunterlagen Technische Mechanik.* Hamburg : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2008.
- [69]. **Schmidt, Prof. Dr. Schmidt.** *Vorlesungsskript Baukonstruktion - Einwirkung auf Tragwerke.* Siegen : Universität Siegen, AG Baukonstruktion, Ingenieurholzbau und Bauphysik, 2005.
- [70]. **Klein, Dr. Roger.** Standards for Testing Firefighting Foams. *Industrial Fire Journal.* 2003, June.
- [71]. **Fuchs, Peter.** *Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten.* Karlsruhe : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) - Forschungsbericht 33 / Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (FH), 1978.
- [72]. **Seekamp, Horst und Becker, Wolfram.** *Modelbranduntersuchungen.* Berlin : Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) - Forschungsbericht 5, 1966.
- [73]. **Bund Deutscher Zimmerermeister.** *Lagebericht - Zimmerer / Holzbau 2010.* Berlin : Bund Deutscher Zimmerermeister, 2010.
- [74]. **Firma Dr. Sthamer.** *Absatz STHAMEX-class A.* Hamburg : Firma Dr. Sthamer Hamburg, 2011.
- [75]. **Xp, Stephan.** <http://www.brand-feuer.de/>. [Online] 23. 03 2010. [Zitat vom: 10. 03 2011.] <http://www.brand-feuer.de/index.php/Verbrennungsdreieck>.

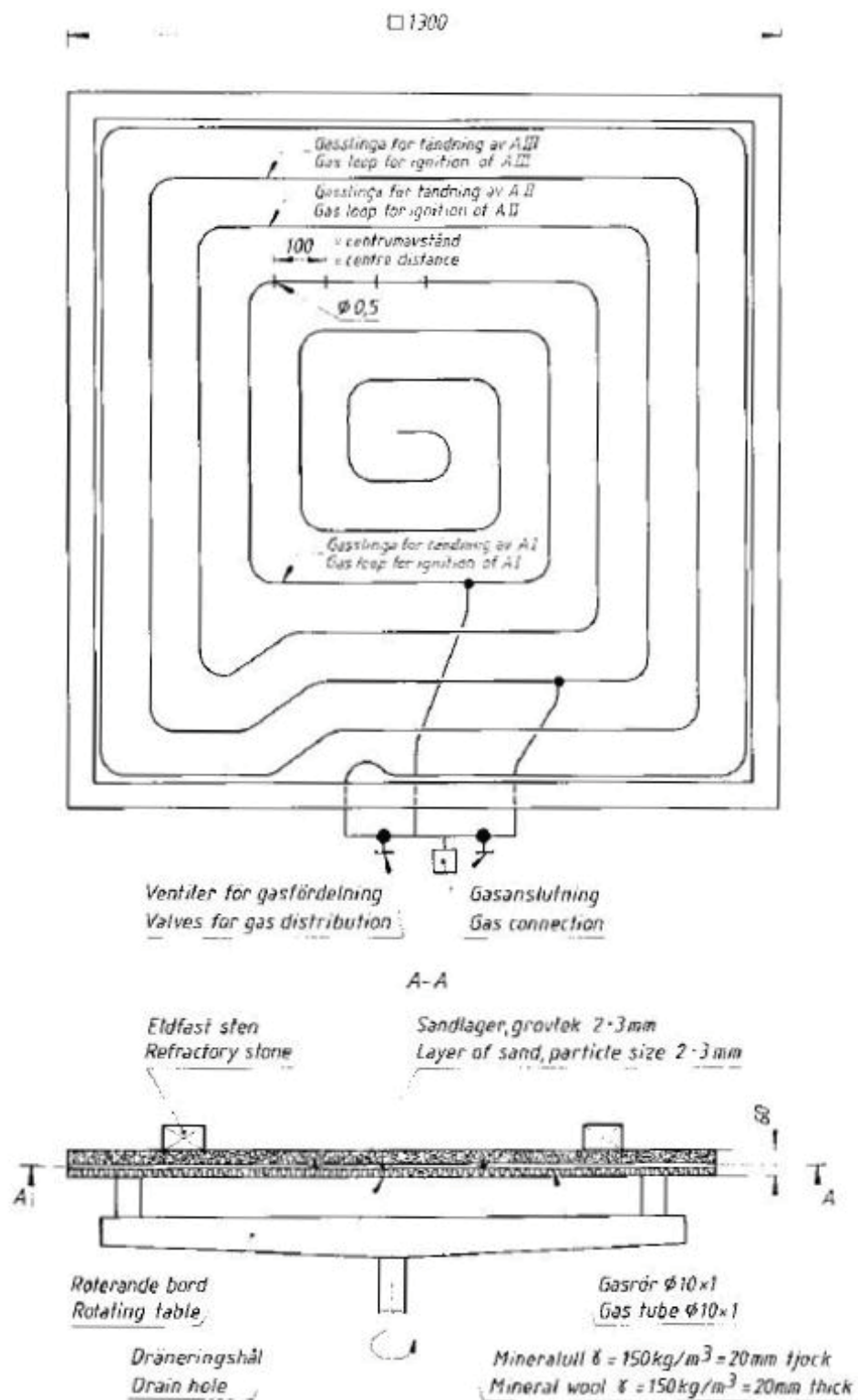
Anhang

I. Winkelverhältnis



Winkelverhältnis φ_{12} bei der Strahlung eines Flächenelementes auf eine parallele Rechteckfläche in Abhängigkeit von B und C [55].

II. Prüfungsplattform-Unterkonstruktion nach SS1192



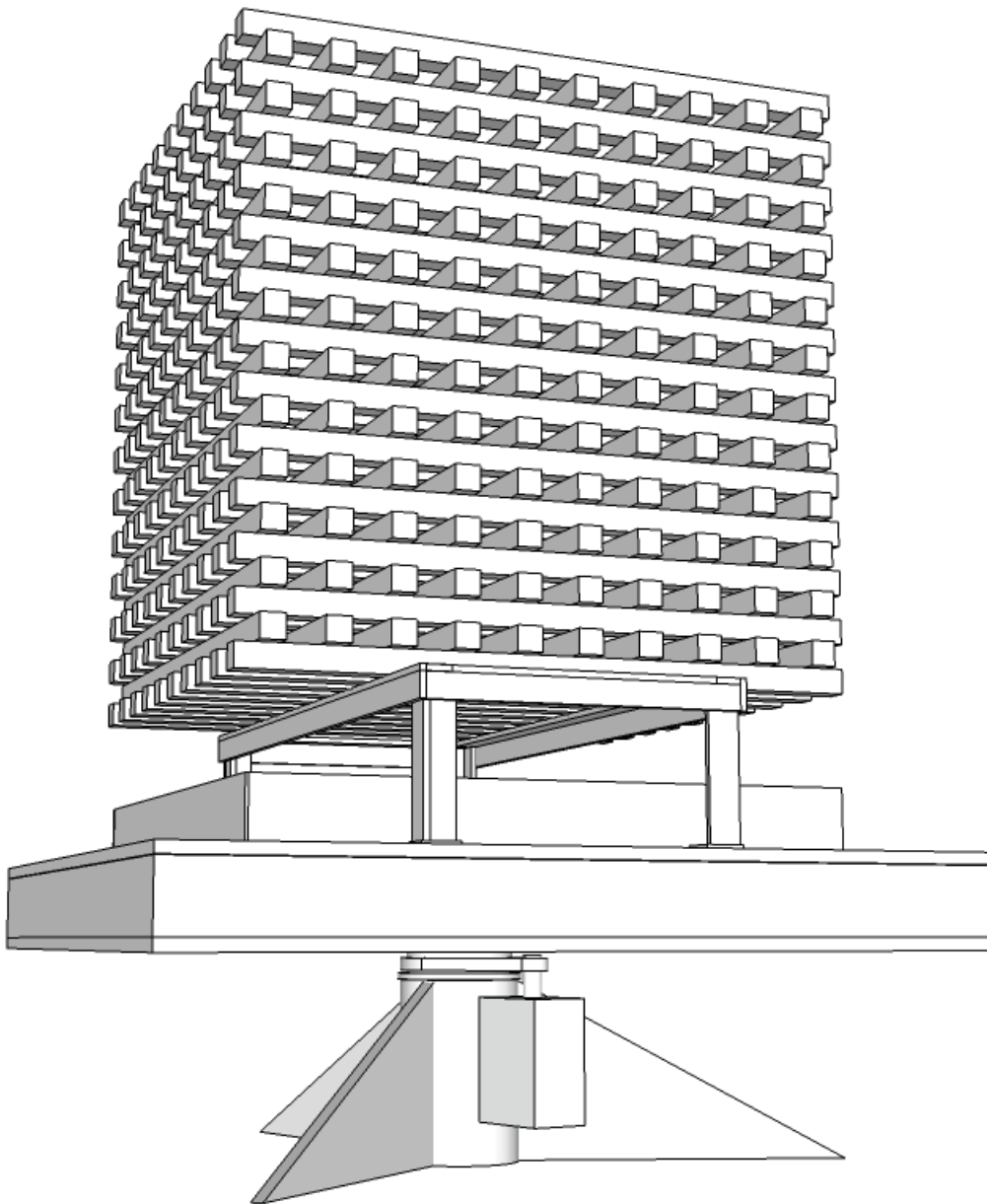
Figur 4 — Konstruktion av brännare och roterande bord
Figure 4 — Design of burner and rotating table

Abbildung der „Drehtellerkonstruktion“ für die Entzündung eines Holzprüfkörpers mit Propan in der SS1192.

III. Berechnung Löschmitteleffektivität

Hersteller	Löschmitte l-	Prüfobjekt	Oberfläche	Löschmitte l-	Funktions- dauer	Rohrdurch- fluss	Herstellerbezeichnung
Jockel	6l	34 A	31,88 m ²	0,19l/m ²	28 s	12,86 l/Min.	SN 6 J Bio 34
	6l	43 A	40,29 m ²	0,15l/m ²	28 s	12,86 l/Min.	SN 6 J Bio 43
	6l	13 A	12,26 m ²	0,49l/m ²	23 s	15,65 l/Min.	S 6 FJ
	9l	43 A	40,29 m ²	0,22l/m ²	46 s	11,74 l/Min.	SN 9 J Bio 43
	9l	55 A	51,50 m ²	0,17l/m ²	46 s	11,74 l/Min.	SN 9 j Bio 55
	9l	21 A	19,73 m ²	0,46l/m ²	35 s	15,43 l/Min.	S 9 FJ
	6l	21 A	19,73 m ²	0,30l/m ²	33 s	10,91 l/Min.	SK 6 J Bio 21
	6l	34 A	31,88 m ²	0,19l/m ²	33 s	10,91 l/Min.	SK 6 J Bio 34
	9l	27 A	25,34 m ²	0,36l/m ²	44 s	12,27 l/Min.	SK 9 J Bio 27
	9l	43 A	40,29 m ²	0,22l/m ²	44 s	12,27 l/Min.	SK 9 J Bio 43
	6l	27 A	25,34 m ²	0,24l/m ²	23 s	15,65 l/Min.	SN 6 J Universal
	9l	34 A	31,88 m ²	0,28l/m ²	37 s	14,59 l/Min.	SN 9 J Universal
	6l	21 A	19,73 m ²	0,30l/m ²	25 s	14,40 l/Min.	WN 6 J Universal
	9l	27 A	25,34 m ²	0,36l/m ²	38 s	14,21 l/Min.	WN 9 J Universal
	6l	34 A	31,88 m ²	0,19l/m ²	23 s	15,65 l/Min.	S 6 J Plus
	9l	43 A	40,29 m ²	0,22l/m ²	37 s	14,59 l/Min.	S 9 J Plus
	6l	27 A	25,34 m ²	0,24l/m ²	33 s	10,91 l/Min.	SK 6 J Plus
6l	27 A	25,34 m ²	0,24l/m ²	33 s	10,91 l/Min.	S 6 LJ Bio	
9l	34 A	31,88 m ²	0,28l/m ²	41 s	13,17 l/Min.	S 9 LJ Bio	
Gloria	6l	13 A	12,26 m ²	0,49l/m ²	29 s	12,41 l/Min.	Si 6 FL 20
	9l	21 A	19,73 m ²	0,46l/m ²	48 s	11,25 l/Min.	Si 9 FL 20
	6l	27 A	25,34 m ²	0,24l/m ²	30 s	12,00 l/Min.	F 6 NI+; F 6 AL
	6l	21 A	19,73 m ²	0,30l/m ²	25 s	14,40 l/Min.	F 6 SKK; F 6 SKK AL
	6l	34 A	31,88 m ²	0,19l/m ²	44 s	8,18 l/Min.	SE 6 I
	9l	43 A	40,29 m ²	0,22l/m ²	89 s	6,07 l/Min.	SE 9 I
	6l	21 A	19,73 m ²	0,30l/m ²	30 s	12,00 l/Min.	SSK 6 LW
	9l	27 A	25,34 m ²	0,36l/m ²	43 s	12,56 l/Min.	SSK 9 LW
	6l	13 A	12,26 m ²	0,49l/m ²	20 s	18,00 l/Min.	SKK 6 APS
Mimimax	6l	13 A	12,26 m ²	0,49l/m ²	20 s	18,00 l/Min.	DWL 6n
	9l	21 A	19,73 m ²	0,46l/m ²	37 s	14,59 l/Min.	DWL 9n
	6l	21 A	19,73 m ²	0,30l/m ²	26 s	13,85 l/Min.	WX 6 nG
	9l	27 A	25,34 m ²	0,36l/m ²	38 s	14,21 l/Min.	WX 9 nG
	6l	34 A	31,88 m ²	0,19l/m ²	31 s	11,61 l/Min.	WS 6n-C
	9l	43 A	40,29 m ²	0,22l/m ²	52 s	10,38 l/Min.	WS 9n-C
	6l	13 A	12,26 m ²	0,49l/m ²	34 s	10,59 l/Min.	WS 6sf-C
	9l	21 A	19,73 m ²	0,46l/m ²	44 s	12,27 l/Min.	WS 9sf-C
Durchschnittswerte	7l	28 A	26,61 m ²	0,31l/m ²	36 s	12,86 l/Min.	

IV. Prüfungsplattform mit Prüfkörper



Prüfkörper auf dem Untergestell mit Zündwanne und Prüfungsplattform

V. Normungsvorschlag als Ergänzung zur EN 1568-3, 2008

10 Löschvermögen

10.1 Prüfung für die Brandklasse A

Die Prüfung ist nach Anhang I für jedes Schaummittel zweimal durchzuführen um die Klassifizierung anhand des Mittelwerts in Tabelle 2 vorzunehmen. Wenn größere Differenzen in der Aufgabemenge d.h. $\geq 1,25$ l auftreten, ist ein dritter Test durchzuführen. Sollte dieser dritte Wert die zulässige Differenz zu einem der vorherigen Wert aufweisen, sind nur diese beiden Werte zu mitteln und in die Klassifizierung einzubringen. Alle drei Prüfungsergebnisse werden gemittelt, wenn beide Ergebnisse der ersten beiden Prüfungen mit der zulässigen Abweichung um den dritten Wert anzuordnen sind.

Die Klassifizierung kann nur dann erfolgen, wenn die Beobachtungszeit erfolgreich verstrichen ist.

Einen Einfluss auf die Bewertung hat nur die tatsächlich verbrauchte Löschmittelmenge.

Wird das Schaummittel vom Hersteller als Meerwasserverträglich angeboten ist die Prüfung mit Trinkwasser und künstlichem Meerwasser durchzuführen. Sollten Differenzen in der Löschleistung auftreten, sind diese gesondert anzugeben.

Tabelle 2 - Klassifizierung der Brandklasse A

Klassifizierung	Menge [l]	Aufgabezeit[Sek.]	Rotationen
A1	$\leq 3,75$	45	4,5
A2	$\leq 5,00$	60	6,0
A3	$\leq 6,25$	75	7,5
A4	$\leq 7,50$	90	9,0
A5	$\leq 8,75$	105	10,5
A6	$\leq 10,00$	120	12,0
A7	$\leq 11,25$	135	13,5
A8	$\leq 12,00$	150	15,0
A9	$\leq 13,75$	165	16,5
A10	$\leq 15,00$	180	18,0
A11	$\leq 16,25$	195	19,5
A12	$\leq 17,50$	210	21,0
A13	$\leq 18,75$	225	22,5
A14	$\leq 20,00$	240	24,0

Anhang I (normativ)

Prüfung des Löschvermögens

I.1 Allgemeines

Bei der Durchführung dieser Prüfungen muss die Bedienperson für diesen Zweck geeignete Schutzausrüstung tragen.

I.2 Prüfungen der Brandklasse A

Das Löschvermögen für Prüfobjekte der Brandklasse A ist nach Anhang I zu bestimmen.

I.2.1 Eigenschaften des Prüfobjektes

Das Prüfobjekt der Brandklasse A besteht aus gestapelten Holzstäben auf einem Metallgestell mit einer Höhe, Breite und Länge von 1 m (siehe Bild I.1).

Die Holzstäbe müssen aus *Pinus silvestris* (Kiefer) bestehen und einen Massenanteil von $(13 \pm 1) \%$ Feuchtigkeit bei der Bestimmung nach ISO 4470 ausweisen. Die Messungen sind an mindestens fünf Proben vorzunehmen. Weiterhin müssen die Holzstäbe auf einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von (40 ± 2) mm und einer Länge von (1000 ± 20) mm gesägt sein.

Die Dichte des Holzes muss $(0,52 \pm 0,10)$ kg/cm³ betragen und darf keine optischen Unregelmäßigkeiten wie Harzgänge oder Verastungen enthalten.

Die Holzstäbe sind in 25 Schichten zu je 10 Holzstäben mit dem gleichmäßigen Abstand von 0,06 m aufzustapeln.

I.2.2. Prüfgeräte

I.2.2.1 Das **Metallgestell der Unterkonstruktion** muss aus Winkelstahl (L · B) (50 · 50) mm nach ISO 657-1 bestehen; eine äußere Länge von 1,2 m und eine äußere Breite von 0,55 m aufweisen.

I.2.2.2 Die **Prüfungsplattform** hat die Drehung des Prüfkörpers um eine vertikale Achse über die gesamte Prüfdauer von 6 Umdrehungen in (60 ± 3) s sicherzustellen. Die Grundplatte der Plattform mit einer Breite und Länge von 1,4 m muss aus nichtrostendem Stahl (Güteklasse EN X5CrBiNi18-10) bestehen. Die Oberfläche der Plattform muss genau horizontal auszurichten sein. Die weitere Konstruktion ist freigestellt, kann jedoch nach Bild I.2. erfolgen.

I.2.2.3 Das **Schaumrohr** nach EN 1568-3:2008 Anhang I.1.3 mit einem Nenndurchfluss von 5 l/Min bei 7 bar ist zu verwenden. Für eine ausschließlich vertikale Schaumrohrbewegung ist dieses in einer geeigneten ortsfesten Halterung zu befestigen. Die Bewegung erfolgt durch eine menschliche Bedienperson. Die Konstruktion kann nach Bild I.3 erfolgen.

I.2.2.4 Als **Zündwanne** ist eine Metallwanne mit einer quadratischen Grundfläche und einer Kantenlänge von 1,2 m und einer Tiefe von 0,1 m zu verwenden.

I.2.2.5 Als **Brennstoff** ist industrielles Heptan mit folgenden Eigenschaften zu verwenden:

- Destillationskurve: 84 °C bis 105 °C
- Differenz zwischen Anfangs- und Endpunkt der Destillation: ≤ 10 °C
- Aromenanteil (V/V): ≤ 1 %
- Dichte bei einer Temperatur von 15°C: 0,680 bis 0,720

I.2.2.6 Die **Schaummittellösung** ist ausreichender Menge nach Herstellerangaben vor der Prüfung anzusetzen und innerhalb von 1 Std. zu verbrauchen.

I.2.2.7 Die **Kerntemperaturen** des verwendeten Heptans, Wassers und Schaummittels müssen $(17,5 \pm 2,5)$ °C betragen; die Temperatur des Holzes $(20 \pm 2,5)$ °C

Bild I.1 – Prüfobjekt der Brandklasse A (Vorderansicht)

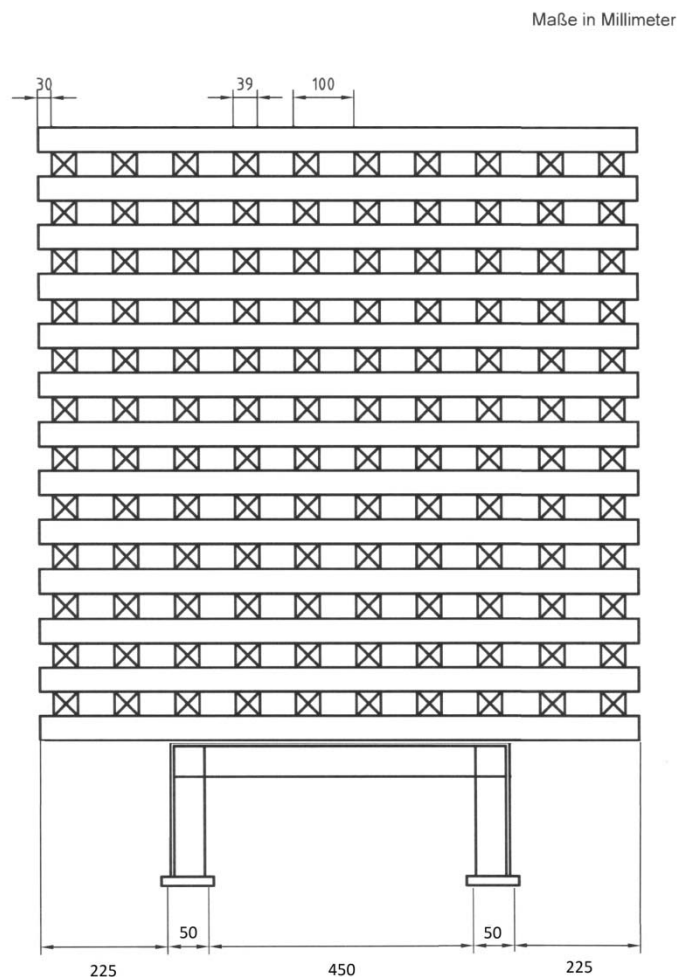
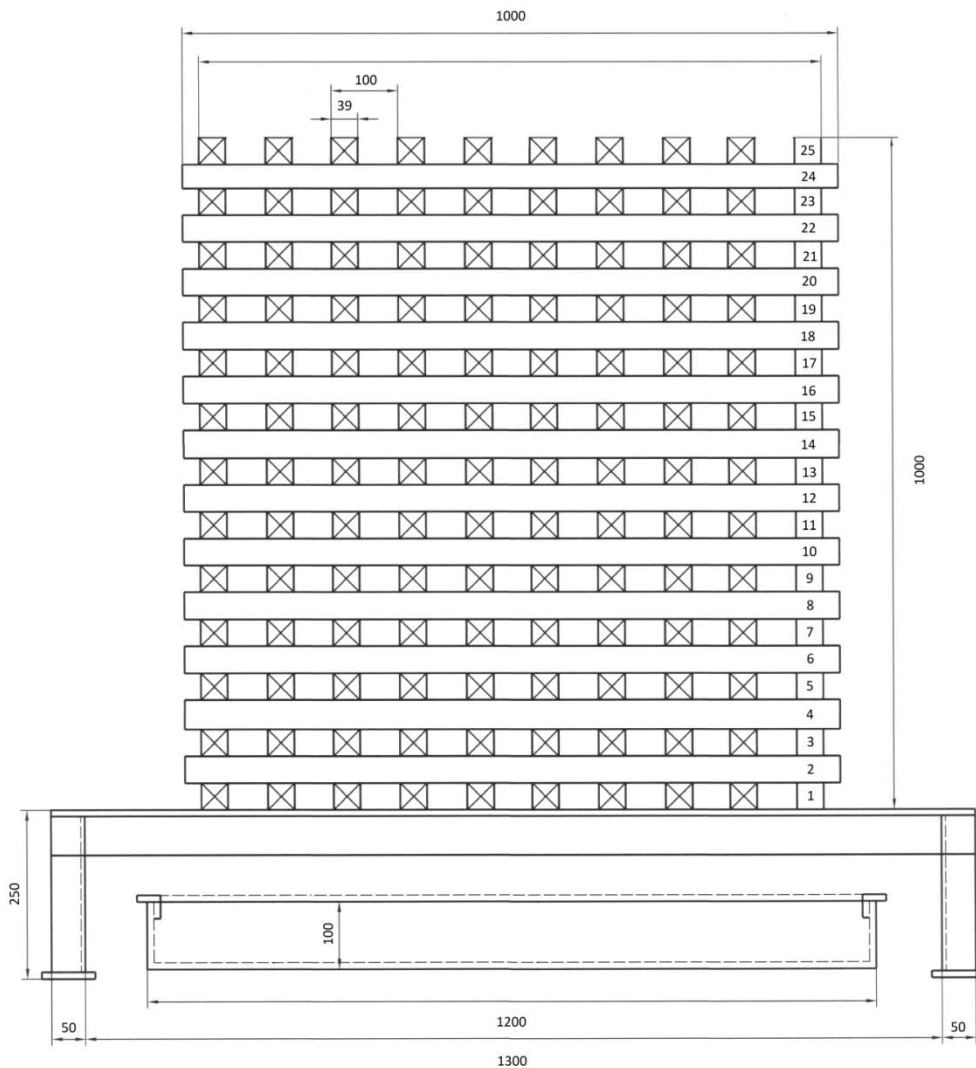


Bild I.2 – Prüfobjekt der Brandklasse A (Seitenansicht)



I.3 Prüfungsaufbau

Das Prüfobjekt muss vor Luftzug geschützt in einem Versuchsraum aufgestellt sein.

Die nächste Wand muss mindestens 6 m entfernt von der Drehachse des Prüfkörpers liegen. Die Raumhöhe muss mindestens 8 m betragen.

Die Schaumrohrhalterung ist in 2,5 m Entfernung von der vertikalen Drehachse des Prüfobjektes aufzustellen. Die Höhe der Halterung ist so zu wählen, dass das horizontal ausgerichtete Schaumrohr auf die oberste Holzstablage gerichtet ist.

Der Schaumrohrdurchfluss ist auf 5 l/Min. durch das Verstellen des Stellrings oder falls erforderlich durch das Verringern des Düsendrucks auf $(0,75 \pm 0,025)$ kg/min einzustellen. Dazu empfiehlt es für genau 6 Sekunden Schaum in ein tariertes Gefäß geben. Aus dem Volumen und der Dichte kann anschließend der Durchfluss bestimmt werden.

Die Unterkonstruktion und der Prüfkörper sind symmetrisch auf der Prüfplattform zu platzieren. Die Grundplatte der Plattformkonstruktion ist von Verunreinigungen zu säubern.

Die Zündwanne ist 0,03 m hoch mit Wasser sowie $(7,2 \pm 0,1)$ l Heptan zu füllen und symmetrisch unter dem Prüfkörper zu platzieren.

I.4 Prüfbedingungen

Die Umgebungstemperatur muss zwischen 0 °C und 30 °C betragen.

Der Umgebungsluftdruck ist zu Beginn der Prüfung zu bestimmen und ist während der gesamten Prüfung im Versuchsraum zu halten.

Die maximal zulässige Bewegungsgeschwindigkeit der Luft darf vor der Zündung des Prüfkörpers bei eingeschalteter Lüftung maximal 0,2 m/s betragen. Die Bewegungsgeschwindigkeit ist im unteren Bereich des Prüfkörpers in 0,1 m Höhe über der Oberfläche der Prüfungsplattform sowie in einem Meter Höhe über dem Prüfkörper zu messen. Die Ventilations- und Luftstromgegebenheiten dürfen anschließend während der Prüfung nicht mehr verändert werden. Nach der Beendigung der Beobachtungsphase am Ende der Prüfung hat die erneute Messung der Bewegungsgeschwindigkeit zu erfolgen und darf die Geschwindigkeit von 0,2 m/s nicht überschreiten.

Der Luftsauerstoff im Raum hat während der gesamten Prüfung (21 ± 1) Vol% zu betragen. Das Messgerät zur Bestimmung des Sauerstoffs ist neben der Schaumrohralterung zu platzieren.

I.5 Durchführung der Prüfung

Das Heptan wird gezündet.

Nach einer Vorbrennzeit von 2 Minuten ist die Zündwanne unter dem Holzstapel zu entfernen.

Anschließend wird der Holzstapel 6 Minuten brennen gelassen, wobei in der letzten Minute mit der Drehung der Plattform begonnen wird. Es ergibt sich eine gesamte Vorbrennzeit von 8 Minuten.

Die Schaumaufgabe kann begonnen werden und hat kontinuierlich ohne Unterbrechungen bis zum vollständigen Löscherfolg durchgeführt zu werden. Die Strahlrohrbewegung erfolgt durch den Strahlrohrführer.

Der Löscherfolg gilt als erreicht, sobald der komplette Prüfkörper mit einem Schaumteppich bedeckt ist, keine Flammenerscheinung mehr wahrnehmbar oder keine glimmende Glut mehr zu sehen sind.

Innerhalb der 20minütigen Beobachtungsphase nach dem Beenden der Schaummittelaufgabe ist es bei Bedarf zulässig einmalig Nachlöscharbeiten durchzuführen. Die Beobachtungsphase wird dann erneut mit derselben Dauer neu begonnen.

Die Drehung der Prüfungsplattform wird nach der Beobachtungsphase beendet. Die Strömungsgeschwindigkeit ist abermals zu bestimmen und darf den Grenzwert nicht überschreiten.

Nach der Beendigung der Beobachtungsphase ist eine Zündquelle an die Oberfläche der obersten Holzstablage zu führen. Sollte eine Zündung von brennbaren Gasen erfolgen, müssen diese wieder alleine verlöschen.

Im Anschluss wird die Oberfläche jeweils in der 1, 12 und 25 Holzstablage des Prüfkörpers in einem Radius von 0,1 m um die Drehachse freigelegt. Die gemessene Oberflächentemperatur darf nicht mehr als 100 °C betragen.

Bild I.3 - Prüfkörper auf dem Untergestell mit Zündwanne und Prüfungsplattform

