



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät 7, Maschinenbau und Sicherheitstechnik,

Fachgebiet „Chemische Sicherheit und abwehrender Brandschutz“

Untersuchungen zur Kühlung von Seecontainern auf Seeschiffen zur Verhinderung
oder Unterdrückung von exothermen Reaktionen

Masterarbeit

vorgelegt von

Eyck-Frederic Rohardt

Matrikel: 825175

am 30.09.2020

Betreuender Hochschullehrer: Univ.-Prof. Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Roland Goertz

Tag der Ausgabe: 01.07.2020

Tag der Abgabe: 30.09.2020

1. Gutachter: Prof. Dr. Roland Goertz

2. Gutachter: Andrea Bosnjak

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, Eyck-Frederic Rohardt, an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Hamburg, 30.09.2020

Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Goertz für die Möglichkeit, im Fachgebiet Chemische Sicherheit und Abwehrender Brandschutz meine Masterarbeit schreiben zu können sowie die fortlaufende Betreuung, die methodische Beratung und die stetige Hilfsbereitschaft.

Ich bedanke mich ebenfalls bei Frau Andrea Bosnjak für die Übernahme des Zweitgutachtens und die damit verbundene Hilfsbereitschaft.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Uwe Schieder vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft für die fachliche Unterstützung, die Kontakte sowie die Bereitstellung von finanziellen Mitteln zur Durchführung der experimentellen Versuche.

Dank gilt auch der Firma Friedrich Tiemann in Bremerhaven, die in Person von Herrn Kanning, Herrn Eisele und ihren Mitarbeitern die experimentellen Untersuchungen erst ermöglicht haben.

Bei der Firma FOGTEC bedanke ich mich für die Bereitstellung von Hochdruckwassernebel-Löschtechnik. Ein besonderer Dank gilt Herrn Sprakel und seinen Mitarbeitern Herrn Müller und Herrn Heumann, die an beiden Versuchstagen anwesend waren.

Sperrvermerk

Die vorliegende Masterrarbeit mit dem Titel „Untersuchungen zur Kühlung von Seecontainern auf Seeschiffen zur Verhinderung oder Unterdrückung von exothermen Reaktionen“ wurde von Herrn Eyck-Frederic Rohardt erstellt.

Die Arbeit enthält interne vertrauliche Informationen der Firma FOGTEC Brandschutz Systeme GmbH.

Die Einsicht in die Arbeit ist Unbefugten nicht gestattet. Ausgenommen hiervon sind die Gutachter sowie berechtigte Mitglieder des Prüfungsausschusses der Bergischen Universität Wuppertal. Die Weitergabe des Inhaltes der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften, auch in digitaler Form, sind grundsätzlich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung des vorher genannten Unternehmens.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	VIII
Verzeichnis der Tabellen	X
Verzeichnis der Abkürzungen	XI
1. Einführung in die Thematik	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Aufgabenstellung und Ziel	3
1.3 Vorgehensweise	5
2. Grundlagen für die Sicherheit auf Seeschiffen	6
2.1 International Maritime Organization (IMO)	6
2.2 Relevante Internationale Vorschriften	8
2.2.1 SOLAS	9
2.2.2 Codes	10
2.2.3 Resolutionen	12
2.2.4 Rundschreiben	13
2.3 Europäische Regelungen	14
2.4 Nationale Vorschriften im maritimen Brandschutz	16
2.4.1 Flaggenstaaten	16
2.4.2 Hafenstaatkontrolle	17
2.5 Bauvorschriften der Klassifikationsgesellschaften	18
3. Brandschutz auf Containerschiffen nach SOLAS	19
3.1 Allgemeine Grundlagen des Brandschutzes	19
3.2 Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen im Schiffbau	21
3.3 Laderäume auf Containerschiffen nach SOLAS Kapitel II und VII	22
4. Transport von Gefahrstoffen auf Seeschiffen	31
4.1 Brände auf Containerschiffen durch Gefahrstoffe	31
4.2 Calciumhypochlorid	32
4.2.1 Umgebungstemperatur	34
4.3 Lithium-Ionenbatterien	35
4.4 Begriffsdefinition thermisches Durchgehen	36
5. Versuche	37
5.1 Zielsetzung der Versuche	37
5.2 Versuchsnomenklatur	37
5.3 Versuchsaufbau	38

5.3.1	Verwendete Seecontainer	38
5.3.2	Wärmequelle	41
5.3.3	Vorhandene Lüftungsöffnungen	42
5.3.4	Verwendete Messtechnik	42
5.3.5	Verwendete Löschtechnik	44
5.4	Versuchsdurchführung	45
5.5	Versuchsablauf	49
6.	Interpretation der Ergebnisse	50
6.1	Auswertung Versuch 1-3	50
6.2	Auswertung Versuch 4 und 5	58
6.3	Auswertung Außentemperaturmessung	65
6.4	Messungenauigkeiten	67
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	67
7.	Numerische Simulationen im Brandschutz	68
7.1	Einführung in die Brandschutzingenieurmethoden	68
7.2	Vorstellung ausgewählter Modellarten	69
7.2.1	Zonenmodell	69
7.2.2	Feldmodell	70
7.3	Vorstellung FDS	72
7.4	Aufbau der Simulationsdateien	73
8.	Interpretation der Simulationsergebnisse	76
8.1	Beschreibung der Simulationsvarianten	76
8.2	Auswertung Simulation allgemein	77
8.2.1	Auswertung Simulationsvariante 3	80
8.2.2	Auswertung Simulationsvariante 4	83
8.3	Vergleich experimenteller Messergebnisse und Simulation	84
8.4	Mögliche Fehlerquellen des Simulationsprogramms	87
8.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	88
9.	Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes	89
9.1	Brandursachen	89
9.2	Mögliche Eskalationsketten	90
9.3	Rückschlüsse der Brandszenarien auf die Wirksamkeit von Brandschutzmaßnahmen	93
9.4	Mögliche Verbesserungen der vorhandenen Brandschutzmaßnahmen	94
9.5	Verbesserung und Empfehlungen zum Transport von Calciumhypochlorit	96

Zusammenfassung und Ausblick	98
Literaturverzeichnis.....	100
Anhang A Ergänzende Experimentaldaten.....	105
Anhang B: FDS-Eingangsparameter der Brandsimulation.....	111

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Grafik Welthandelsvolumen [Finanz und Wirtschaft]	1
Abbildung 2: Brand auf dem Containerschiff 'CCNI Arauco' im September 2016, Quelle Spiegel	2
Abbildung 3: Feuer und Explosionsereignisse nach MSC	2
Abbildung 4: Struktur IMO	7
Abbildung 5: Exemplarische Darstellung Laderaum	23
Abbildung 6: Brand auf der KMTC Hong Kong, Brandursache: Calciumhypochlorit	31
Abbildung 7: Brand auf der COSCO Pacific, Brandursache: Lithium-Ionenbatterie	32
Abbildung 8: Öffnung zum Einbringen von Hochdruckwassernebel	40
Abbildung 9: Heizplatte	41
Abbildung 10: Lüftungsöffnung	42
Abbildung 11: Anordnung Messtechnik Grundriss	43
Abbildung 12: Anordnung Messtechnik, Schnitt	43
Abbildung 13: FOGGUN und Sprühbild	44
Abbildung 14: 1. Löschdüse und Sprühbild	45
Abbildung 15: 2. Löschdüse und Sprühbild	45
Abbildung 16: Versuchsaufbau	46
Abbildung 17: Stauung Versuch 1-3, Draufsicht	47
Abbildung 18: Stauung Versuch 1-3, Seitenansicht	47
Abbildung 19: Positionierung Wärmequellen	48
Abbildung 20: Stauung Versuch 4-5, Draufsicht	49
Abbildung 21: Stauung Versuch 4-5, Seitenansicht	49
Abbildung 22: Temperaturschichtung Versuch 2 und 3	51
Abbildung 23: Einfluss Wasserkühlung	52
Abbildung 24: Temperaturverlauf Versuch 1	52
Abbildung 25: Temperaturverlauf Versuch 2	53
Abbildung 26: Temperaturverlauf Versuch 3	53
Abbildung 27: Vergleich Temperaturverlauf Thermoelement 5	55
Abbildung 28: Darstellung Thermoelement 1-3, Versuch 2	56
Abbildung 29: Vergleich Temperaturverlauf Thermoelement 4	57
Abbildung 30: Temperaturschichtung Versuch 4 und 5	59
Abbildung 31: Temperaturverlauf Versuch 4	60
Abbildung 32: Temperaturverlauf Versuch 5	61
Abbildung 33: Darstellung Sprühbeeinträchtigung	62
Abbildung 34: Vergleich Kühleffekt Graph 1, Versuch 4 und 5	63
Abbildung 35: Ausschnitt Kühlversuche, Versuch 4	64
Abbildung 36: Messpunkte Außentemperatur	65
Abbildung 37: Temperaturverlauf Außenhaut, Versuch 4	66
Abbildung 38: Übersicht zu Modellen der Brandsimulation	69
Abbildung 39: Container mit Beladungsgegenständen und Messtechnik	74
Abbildung 40: Aufbau Simulationsvariante 3	77
Abbildung 41: Aufbau Simulationsvariante 4	77
Abbildung 42: Temperaturverlauf Simulation, Versuch 3 ohne Kühlung	78

<i>Abbildung 43: Temperaturverlauf Simulation, Versuch 4 ohne Kühlung</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 44: Temperaturverlauf Versuch 3, Zeitpunkt 300 s</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 45: Temperaturverlauf Versuch 3, Zeitpunkt 751 s, Einbringen Hochdruckwassernebel.....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 46: Temperaturschichtung Simulation, Versuch 3</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 47: Vergleich Kühleffekt in Abhängigkeit zur Tröpfchengröße</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 48: Temperaturschichtung Simulationsvariante 4</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 49: Vergleich Temperaturschichtung experimentell gegen Simulation.....</i>	<i>85</i>
<i>Abbildung 50: Temperaturverlauf Simulationsvariante 3, Zeitpunkt 300 Sekunden.....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 51: Mögliche Brandausbreitungswege auf angrenzende Container im Laderaum</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 52: Darstellung Containertyp</i>	<i>93</i>
<i>Abbildung 53: Brand MSC Flaminia, Wind von der Steuerbordseite</i>	<i>94</i>

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Kritische Temperatur nach Verpackung	34
Tabelle 2: Ausgewählte durchschnittliche Temperaturen	35
Tabelle 3: Versuchsnomenklatur	38
Tabelle 4: Abmessungen Container	39
Tabelle 5: Materialstärke Container	39
Tabelle 6: Zeitpunkte Kühlversuche	54
Tabelle 7: Temperaturdifferenz Versuch 1	57
Tabelle 8: Temperaturdifferenz Versuch 2	57
Tabelle 9: Temperaturdifferenz Versuch 3	58
Tabelle 10: Ausgangstemperaturen Versuch 4 und 5, Ausschnitt	60
Tabelle 11: Zeitpunkte Kühlversuche	61
Tabelle 12: Legende zur Abbildung 51	92
Tabelle 13: Beladungsgegenstände	105

Verzeichnis der Abkürzungen

BRZ	Bruttoraumzahl (Schiffsmaß; dimensionslos)
CFD	Numerische Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics)
Circ.	Rundschreiben des Schiffssicherheitsausschusses (engl. Circular)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEBD	Fluchttreter (engl. Emergency Escape Breathing Device)
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FDS	Fire Dynamics Simulator (Brandsimulationsprogramm)
FSS	Brandschutzsysteme (engl. Fire Safety Systems)
FSA	Formal Safety Assessment
FTP	Brandprüfverfahren (engl. Fire Test Procedures)
HRR	Wärmefreisetzungsrate (engl. Heat Release Rate)
IMDG	Transport gefährlicher Güter (engl. International Maritime Code for Dangerous Goods)
IMO	Internationale Seeschifffahrtsorganisation (engl. International Maritime Organization)
ISM	Sicherer Schiffsbetrieb (engl. International Safety Management)
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. International Organization for Standardization)
LSA	Rettungsmittel (engl. Life Saving Appliances)
MARPOL	Internationalen Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)

MBO	Musterbauordnung
MSC	Schiffsicherheitsausschuss der IMO (engl. Maritime Safety Committee)
NIST	National Institute of Standards and Technology
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
SchSG	Schiffsicherheitsgesetz
SOLAS	Internationale Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (engl. International Convention for the Safety of Life at Sea)
SRtP	Safe Return to Port
STCW	Internationales Übereinkommen über Normen für die Ausbildung, die Erteilung von Befähigungszeugnissen und den Wachdienst von Seeleuten (engl. Standards of Training, Certification and Watchkeeping)
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit (20'-Standardcontainer) ist eine international stan- dardisierte Einheit zur Zählung von ISO-Containern verschiedener Größen.

1. Einführung in die Thematik

1.1 Einleitung

Das Verständnis über das Brandverhalten von chemischen (Gefahr-)Stoffen und weiteren zu transportierenden Gütern ist in Anbetracht des stetig steigenden Welthandelsvolumens eine zentrale Aufgabe des Brandschutzes. Das Welthandelsvolumen steigt über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich an, wobei ein Großteil (ca. 90 %) über den Seeweg per Schiff abgewickelt wird.¹ Folglich führt ein steigendes Welthandelsvolumen zwingend zu steigenden Umschlagzahlen in den Häfen. Dieser Umstand macht die kapazitäre Anpassung der Welthandelsflotte notwendig, welche über die Anzahl oder die Größe (BRZ) der Schiffe erfolgen kann.



Abbildung 1: Grafik Welthandelsvolumen [Finanz und Wirtschaft]

Containerschiffe sind heutzutage hochkomplexe maritime Bauwerke, die durch den Einsatz neuester Technik und Verfahren stetig größer gebaut werden, wodurch die Ladekapazität des einzelnen Schiffes steigt. Dementsprechend werden höchste Sicherheitsanforderungen zu Grunde gelegt, denen diese Schiffe gerecht werden müssen.

Im Gegensatz zu der steigenden Schiffsgröße steht die Besatzungsstärke, die infolge von zunehmender Automatisierung weiter abnimmt. Dieser Umstand erfordert die Entwicklung und Optimierung von sicherheitsrelevanten Komponenten, Systemen und Betriebsabläufen auf Seeschiffen.

Die Relevanz dieser Punkte für die Sicherheit eines Schiffes lässt sich daraus ableiten, dass Seeschiffe als autonome Systeme angesehen werden können. Ein Großteil der Zeit ist die Besatzung auf sich allein gestellt, woraus sich lange Vorlaufzeiten für die Hilfe von außen in einer Notlage ergeben. Sofern Hilfe überhaupt möglich ist. Zur Abwendung oder Abmilderung einer Gefahrenlage befindet sich die relevante Sicherheitstechnik meist an Bord, wobei die Entwicklung der Sicherheitstechnik nicht mit der Entwicklung der Schiffe (insbesondere der Schiffsgröße)

¹ Third IMO GHG Study 2014, Executive Summary and Final Report

mitgehalten hat. In Abhängigkeit von dem Schadenereignis kann die relevante Sicherheitstechnik an Bord betroffen oder unbrauchbar sein².

Unfalldaten zeigen allerdings auch, dass Containerschiffe im Allgemeinen ein sicherer Schiffstyp für die Besatzung und Fracht sind.³ Ebenso zeigt die Vergangenheit, dass schon kleine Unglücke eine ernstzunehmende Gefahr für den Betrieb des Schiffes darstellen, egal ob zur See oder im Hafen. Verbunden mit taktisch falschem Eingreifen kann dies schnell zu einem verheerenden Ausmaß führen, indem Menschenleben gefährdet werden und hohe finanzielle Schäden, wie z.B. Schiffsverlust, eintreten. So tragen Feuer und Explosionen nach Tos-



Abbildung 2: Brand auf dem Containerschiff 'CCNI Arauco' im September 2016, Quelle Spiegel

sevikeu und Bergmann zu mehr als einem Drittel der Todesopfer und Verletzungen an Bord von Containerschiffen bei und liefern den zweitgrößten Beitrag zu den Unfallkosten.⁴

Die meisten Feuer- und Explosionsereignisse ereignen sich in den Maschinenräumen, gefolgt von den Frachträumen.⁵ Diese machen etwa 24 % der Feuer- und Explosionsereignisse an Bord aus. Davon entstehen 62 % im Laderaum und etwa 19 % auf dem Deck.⁶ Moderne Containerschiffe sind mit festen Feuerlöschanlagen, meist CO₂-Systeme, für geschlossene Laderäume ausgestattet. Solche Sys-

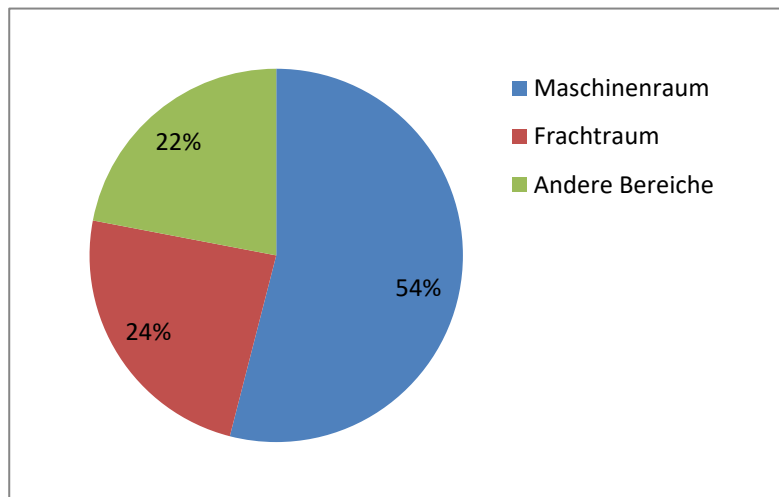


Abbildung 3: Feuer und Explosionsereignisse nach MSC

Ladeluken geschlossen sind und nicht z.B. oxidierend wirkende Gefahrstoffe

² Joachim Hahne (Hrsg), Handbuch Schiffssicherheit, Seehafen Verlag, 1. Auflage 2006, S.58

³ Internetseite Lloyds List Intelligence, Stand: 03.03.2017

⁴ Tossevikeu, A. and Bergmann, J. Cargo fires on container ships. DNV Technical Paper Paper Series No. 2003-P013, DNV, (2003)

⁵ MSC 83/INF.8 FSA-Container vessels. Details of the Formal Safety Assessment, 2007

⁶ MSC FSA-Container fire on deck. Details of the Formal Safety Assessment, 2009

(z.B. Calciumhypochlorit) geladen sind. Die Analyse der großen Brandereignisse an Bord von Containerschiffen nach Tossevikeu und Bergmann⁷ zeigt, dass die Effizienz eines festeingebauten Feuerlöschsystems (vor allem CO₂) nach Explosion beeinträchtigt ist und die Brandunterdrückung im Laderaum erschwert wird.

Kommt es zu Brandereignissen auf offenen Decks, sind diese wegen des Mangels an thermischer oder struktureller Unterteilung schwer zu kontrollieren. Zusätzlich erschweren Zugangsprobleme die Löscharbeiten, da bedingt durch die Stauung nur wenige Container zugänglich sind. Das Equipment (Feuerlöschschläuche und tragbaren Feuerlöscher) welches auf den offenen Decks verwendet wird, ist nur unzureichend für die hohen Containerstapel geeignet, da es für wirksame Löscharbeiten eine Anwendung aus kurzer Distanz oder große Wurfweiten zur Kühlung und Abschirmung angrenzender Container erfordert. Dies ist bei den vorhandenen Umgebungsbedingungen nur selten bzw. nicht möglich.

Die Unglücke aus der Vergangenheit zeigen auch, dass die internationalen SOLAS-Vorschriften lediglich eine Mindestanforderung darstellen und eine Einhaltung der Vorschriften nicht den Eintritt zukünftiger Unglücke verhindern kann, trotz regelmäßiger Anpassung⁸.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

Diese Master Thesis hat zum Ziel, den Kühleffekt von Hochdruckwassernebel in Seecontainern für unterschiedliche Szenarien zu untersuchen. Hierfür werden zunächst die gängigen Regelwerke in der Schifffahrt dargestellt und im Weiteren eine experimentelle Versuchsreihe durchgeführt. Anschließend wird versucht die Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihe mithilfe eine Computersimulation zu reproduzieren bzw. zu validieren.

Im Einzelnen werden folgende Punkte bearbeitet:

- Zusammenstellung der Regeln für die Sicherheit von Seeschiffen
 - Relevante Vorschriften im maritimen Bereich
 - Ausbildung der Crew nach STCW Code

⁷ Tossevikeu, A. and Bergmann, J. Cargo fires on container ships

- Darstellen der vorhandenen brandschutztechnischen Systeme und Schutzmaßnahmen
- Calciumhypochlorit im Seetransport
 - Exemplarische Unfälle auf See
 - Gefahren
 - Transportvorschriften
- Durchführung experimenteller Untersuchungen in einem 40' Container
 - Entwickeln eines Versuchsaufbaus
 - Entwickeln verschiedener Szenarien und Durchführung
 - Bewertung und Analyse der Ergebnisse
- Computersimulation mittels FDS
 - Erstellen von Simulationen zum Temperaturverlauf und Kühleffekten für verschiedene Szenarien
 - Bewertung der Ergebnisse der Brandsimulation
 - Vergleich experimenteller Ergebnisse und der Brandsimulation
- Ableiten und Entwicklung von Empfehlungen für vorbeugenden und abwehrenden BS
 - Organisatorische Maßnahmen
 - Anlagentechnische Maßnahmen
 - Abwehrenden Maßnahmen

1.3 Vorgehensweise

Die grundsätzliche Struktur der vorliegenden Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil umfasst die nationale und internationale Literaturrecherche und führt die relevanten Vorschriften für Containerschiffe und deren Besatzung auf. Hierzu werden in Kapitel 2 die Grundlagen für die Sicherheit auf Seeschiffen behandelt. Das Kapitel 3 widmet sich den Vorschriften hinsichtlich des baulichen Brandschutzes auf Containerschiffen, im speziellen der Laderäume. Weiterhin wird in Kapitel 4 auf die Charakteristika von Calciumhypochlorit und Lithium-Ionenbatterien eingegangen.

Im zweiten Teil der Arbeit folgt im Kapitel 5 die detaillierte Beschreibung, Durchführung und Interpretation der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung.

Anschließend werden verschiedene ingenieurwissenschaftliche Verfahren zur Modellierung von Bränden sowie den spezifischen Zielen der Brandsimulation in Kapitel 7 vorgestellt. Für das verwendete Brandsimulationsprogramm erfolgt dazu eine anwendungsorientierte Einführung in FDS (Fire Dynamics Simulator), der Aufbau der Simulationsdatei, die Abbildung des Containers innerhalb des Programms sowie die anschließende Simulation und Auswertung verschiedener Szenarien.

Im Kapitel 9 werden unter Berücksichtigung der Experimentellen- und der Simulationsergebnisse mögliche Eskalationsketten dargestellt sowie abschließende Empfehlungen formuliert, die Ansätze zur Verbesserung des Brandschutzes liefern.

2. Grundlagen für die Sicherheit auf Seeschiffen

Grundsätzlich lässt sich zwischen internationalem Seeverkehr und inländischen Fahrten unterscheiden, wobei ein Großteil der weltweiten Schiffsflotte über Landesgrenzen hinweg operiert, sodass die Schiffe die jeweiligen Gesetze des gastgebenden Landes befolgen müssen. Dabei wird nicht unterschieden, ob es sich lediglich um eine Durchfahrt der Hoheitsgebiete oder eine Anlandung handelt.⁹

Das Schiffsicherheitsgesetz (SchSG) der Bundesrepublik Deutschland regelt die Anforderungen an die bauliche Ausführung, die sicherheitstechnische Ausrüstung, die Ausbildung der Besatzung sowie weitere Bereiche. Die Anforderungen, welche das SchSG setzt, gelten für alle Schiffe, die sich in deutschen Hoheitsgewässern aufhalten. Anforderungen an die Schiffssicherheit können von Nation zu Nation abweichen.¹⁰

Um diese Vielzahl einzelner nationaler Sicheranforderungen nicht all zu komplex zu gestalten, ist man auf eine einheitliche Gestaltung der Anforderung bedacht. Dazu wurde 1948 die International Maritime Organisation gegründet, die die Vereinheitlichung internationaler Anforderungen beabsichtigte.¹¹ Im Folgenden werden nun die nationalen und internationalen Zuständigkeiten genauer ausgeführt.

2.1 International Maritime Organization¹² (IMO)

Die Internationale Seeschiffahrt-Organisation IMO¹³ hat ihren Hauptsitz in London und ist rechtlich gesehen eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UN). Unter dem Namen „Inter Governmental Maritime Consultative Organization“ (IMCO) wurde sie 1948 gegründet und erhielt 1982 ihren heutigen Namen. Neben dem Namen wurden auch die Befugnisse und Aufgaben reformiert und erweitert. In den vergangenen Jahrzehnten ist die IMO immer weitergewachsen

⁹ Vgl. Übereinkommen über das Küstenmeer und die Anschließzone

¹⁰ Vgl. SchSG – Schiffssicherheitsgesetz

¹¹ Vgl. Internetseite International Maritime Organisation

¹² Vgl. Internetseite Maritime Organization

¹³ Sofern im Text nicht anders vermerkt, steht IMO für International Maritime Organisation

und umfasst heute 171 Vollmitglieder und drei assoziierte Mitglieder (Hongkong, Macau, Färöer-Inseln).

Die IMO gliedert sich in eine Versammlung, einen Rat und fünf Hauptausschüsse. Die Versammlung tagt alle zwei Jahre, zu der alle Mitgliedsstaaten zusammenkommen. Während dieser Sitzung wird die zukünftige Ausrichtung geplant, die Agenda gestaltet, Finanzmittel verwaltet und der Rat, der aus 40 Mitgliedern besteht, für die kommende Periode gewählt.

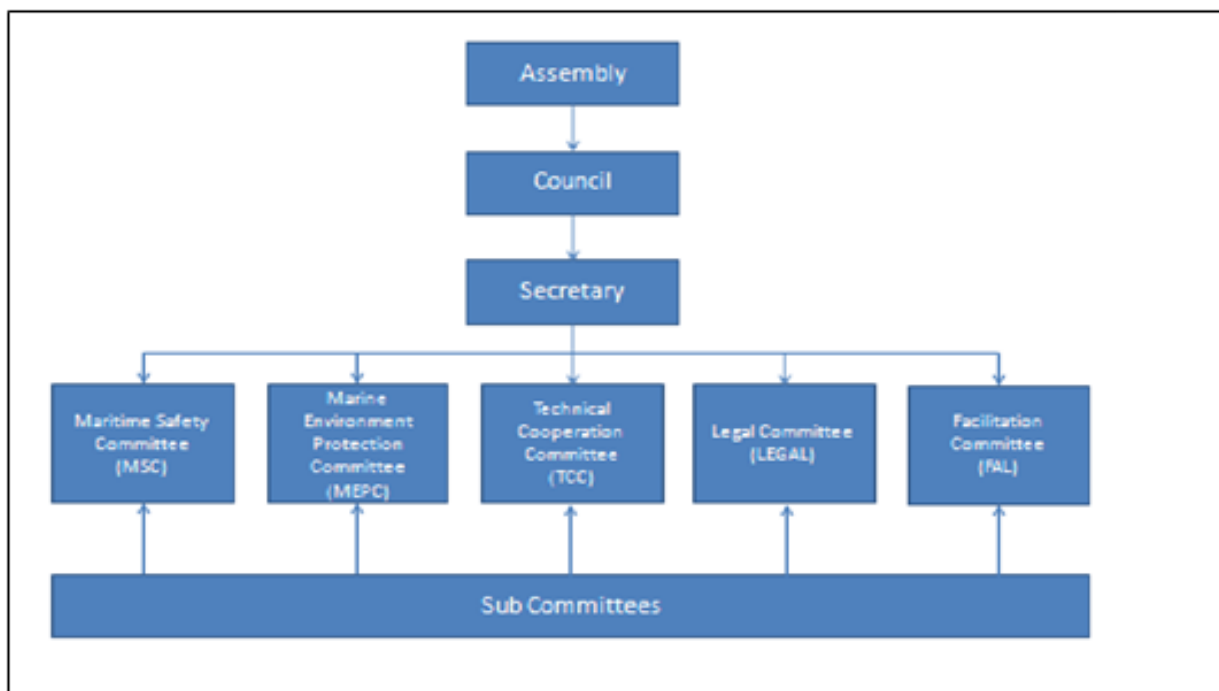


Abbildung 4: Struktur IMO

Der Rat ist das exekutive Organ und dient zur Überwachung der Organisation. Ihm unterstehen das Sekretariat und die fünf Fachausschüsse, welche sich aus allen Mitgliedsstaaten zusammensetzen.

Der bedeutendste Rat ist der aus allen Mitgliedern bestehende Schiffssicherheitsausschuss (MSC) in den alle Mitgliedsstaaten Abgeordnete entsenden. Seine Hauptaufgabe ist die Prüfung der unmittelbaren Schiffssicherheit. Ebenso ist die Erstellung von sicherheitstechnischen Vorschriften und Richtlinien von Bedeutung, welche sodann durch die Versammlung verabschiedet werden.

Die weiteren Räte befassen sich mit der Verhütung und Bekämpfung von Umweltverschmutzungen (MEPC, seit 1985), Rechtsangelegenheiten der Organisation (LEGAL, seit 1967), technischen Kooperationsprojekten (TCC, seit 1969) und mit der Förderung des Maritimen Handels durch Abbau von Bürokratie (FAL, seit 1972). Wie der Abbildung 4 zu entnehmen ist, sind den

einzelnen Ausschüssen weitere Unterausschüsse zugeordnet. Diese sind auf Fachgebiete spezialisiert und arbeiten dem jeweiligen Ausschuss zu.

Die Hauptanliegen der IMO sind die Regelung der Zusammenarbeit der Staaten auf dem Gebiet technischer Fragen im Bereich der internationalen Seeschifffahrt. Dies umfasst,

- die Meeresverschmutzung durch Schiffe zu verringern und möglichst ganz zu verhüten,
- die Schiffssicherheit sowie die Sicherheit der Seefahrt insgesamt zu verbessern.

Der Aufgabenbereich wird durch folgendes **Zitat**¹⁴ deutlich verdeutlicht.

"The mission of the International Maritime Organization (IMO) as a United Nations specialized agency is to promote safe, secure, environmentally sound, efficient and sustainable shipping through cooperation. This will be accomplished by adopting the highest practicable standards of maritime safety and security, efficiency of navigation and prevention and control of pollution from ships, as well as through consideration of the related legal matters and effective implementation of IMO's instruments with a view to their universal and uniform application."

Über Konventionen, Codes, Resolutionen und sog. Rundschreiben führt die IMO neue Vorschriften ein.

Allerdings besitzt die IMO keine Befugnis, Konventionen gegenüber einzelnen Staaten oder Schiffen durchzusetzen. Sie haben lediglich empfehlenden Charakter und der Staat kann freiwillig diese in nationale Gesetzgebung überführen.

2.2 Relevante Internationale Vorschriften

Im Folgenden sollen das Internationale Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (engl. International convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS), welches neben dem Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) zu den Hauptdokumenten zählt, ausführlich beschrieben werden.

¹⁴ Internetseite IMO

2.2.1 SOLAS¹⁵

Die SOLAS ist eines der beiden Hauptdokumente der IMO und sie kann als der bedeutendste Vertrag über die Sicherheit der Handelsschifffahrt gesehen werden. Das Hauptanliegen des SOLAS-Abkommens ist die Implementierung von Mindestanforderungen an die Konstruktion, die Ausrüstung und den Betrieb von Schiffen nach dem heutigen Stand der Technik.

Ausschlaggebend für die Einführung der SOLAS war der Untergang der Titanic im Jahr 1912, welcher über 1500 Menschenleben forderte. Daraufhin wurde im folgenden Jahr eine Konferenz einberufen, die einen Internationalen Mindeststandard auf Seeschiffen zum Ziel hatte. Im Jahr 1914 wurde die erste Fassung des SOLAS-Abkommens verabschiedet und seitdem regelmäßig überarbeitet. Einschneidende Änderungen erfolgten zumeist als Reaktion auf verheerende Schiffsunglücke. Seitdem Inkrafttreten sind fünf Fassungen erschienen (1914, 1929, 1948, 1960 und 1974), wobei die fünfte Fassung bis heute Gültigkeit besitzt und stetig durch Änderungen ergänzt wird. Weitere Neuerungen lassen sich auf der Basis der fünften Fassung der SOLAS leichter realisieren, da die Version um das Verfahren der stillschweigenden Zustimmung ergänzt wurde. Das bedeutet, dass vorgenommenen Änderungen zu einem festgelegten Zeitpunkt in Kraft treten und nicht mehr jeder Mitgliedsstaat einzeln zustimmen muss. Die Änderungen treten allerdings nur in Kraft, wenn eine im Vorwege festgelegte Anzahl von Mitgliedsstaaten keine Einwände hat.

Die SOLAS ist ähnlich wie die Musterbauordnung im Landbau ein zentrales Standardwerk, welches die Sicherheitsanforderungen für die Schifffahrt regelt. Die Regeln finden grundsätzlich für Schiffsneubauten Anwendung, wobei sich die Kapitel mit den folgenden Themen befassen:

In Kapitel I „Allgemeine Vorschriften“ werden Anwendungsbereiche und Definitionen zusammengefasst. Weiterhin lassen sich Regelungen über die Inspektion von Schiffstypen und die Gültigkeit von Zertifikaten finden.

Das Kapitel II-1 regelt die Anforderungen an die Konstruktion von Schiffen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Struktur, Stabilität, wasserdichten Schotts sowie auf technischen Anlagen.

¹⁵ Vgl. SOLAS; Consolidated Edition, 1st January 2015

Das Kapitel II-2 regelt als Unterkapitel ebenfalls die Anforderungen an die Konstruktion, wobei der Brandschutz im Fokus steht. Dabei sind detaillierte Vorschriften für den Brandschutz für alle Schiffstypen enthalten und spezielle Vorschriften für Fracht-, Tank- und Passagierschiffe.

Die Passagen untergliedern sich wie folgt:

- Teil A: Allgemeines
- Teil B: Verhütung einer Brandentstehung oder einer Explosion
- Teil C: Brandunterdrückung
- Teil D: Flucht
- Teil E: Operative Anforderungen
- Teil F: Alternatives Design
- Teil G: Spezielle Anforderungen

Das Kapitel III befasst sich mit Rettungsmitteln und -einrichtungen. In Abhängigkeit vom Schiffstyp werden die Anforderungen an Rettungsboote, Schwimmwesten und Überlebensanzüge behandelt.

Die Kapitel IV-XII thematisieren technische Anforderungen an den Sprechfunk und Navigation sowie den sicheren Schiffsbetrieb. Auch wird auf spezielle Schiffstypen eingegangen, wie Nuklearschiffe, Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge und auf weitere Sicherheitsvorschriften für Massengutfrachter. Die Beförderung von Gütern und Ölkraftstoffen ist Gegenstand des Kapitels VII.

2.2.2 Codes

Die IMO verwendet Codes in den Fällen, in welchen sie den Erlass von Vorschriften als Konventionen für nicht sinnvoll erachtet. Erfolgt in einer Konvention ein Verweis auf einen Code, so kann dieser entweder bindenden oder auch nur empfehlenden Charakter haben. Der Vorteil dieser Vorgehensweise Codes in Konventionen einzubinden ist, dass im Falle von späteren Änderungen nicht die Konvention, sondern lediglich der Code geändert werden muss.

Im Folgenden sollen folgende Codes kurz vorgestellt werden:

- FSS-Code für den Brandschutz
- FTP-Code für Brandprüfverfahren
- LSA-Code für die Rettungsmittel
- ISM-Code für die Organisation eines sicheren Schiffsbetriebs
- IMDG-Code für den Transport von gefährlichen Gütern
- STCW-Code für Standards in der Ausbildung

FSS-Code¹⁶

Der FSS-Code für den Brandschutz nimmt Bezug auf die in SOLAS Kapitel II-2 brandschutztechnische Anforderungen. Dieser Code formuliert hauptsächlich Anforderungen an den Anlagentechnischen Brandschutz, welcher sich mit folgenden Kapiteln befasst:

- Feuerlöscher
- stationäre Gas-, Schaum- und Wassernebel-Löschanlagen
- stationäre Inertgas-Löschsysteme und stationäre Hydrocarbongas-Löschsysteme
- automatische Sprinkler, Feuerdetektions- und Alarmsysteme
- Entrauchungsanlagen, Notbeleuchtungssysteme, stationäre Notfeuerlöschpumpen

Weiterhin formuliert er Anforderungen an die Anordnung von Flucht- und Rettungswegen sowie an die persönliche Schutzausrüstung von Seeleuten zur Brandbekämpfung.

FTP-Code¹⁷

Der 'Code for the Application of Fire Test Procedures' regelt die Anwendung verschiedener Brandprüfverfahren, wobei er als Hilfestellung für Flaggenstaaten und deren Behörden dienen soll, zu dessen Aufgabe es gehört, den Einbau unterschiedlicher Stoffe und Materialien zu genehmigen.

¹⁶ International Code for Fire Safety Systems, IMO, London 2012

¹⁷ International Code for Application of Fire Test Procedures, IMO, London 2010

LSA-Code¹⁸

Für die Schaffung internationaler Standards für Rettungsmittel ist der LSA-Codes (engl. Code for Life Saving Appliances) geschaffen worden, welche in Kapitel III der SOLAS-2015 gefordert werden. Die Vorschriften umfassen einerseits die persönliche Schutzausrüstung (z.B. Schwimmwesten, Überlebensanzüge) aber auch die kollektiven Rettungsmittel wie Boote und Flöße sowie die dazugehörigen Anlagen für den Einbootungs- und Ausbringungsprozess.

ISM-Code¹⁹

Im `International Safety Management Code´ ist der sichere Schiffsbetrieb das Ziel. Dieser Code ergänzt das Kapitel IX der SOLAS, wobei die Betreiber eines Schiffes in die Pflicht genommen werden, ein `Safety Management System´ einzuführen.

IMDG-Code²⁰

Der `International Maritime Code for Dangerous Goods´ ist eine Ergänzung zum Kapitel VII der SOLAS. Hier wird die explizite Kennzeichnung, Behandlung und Stauung von gefährlichen Gütern im Seeverkehr geregelt.

STCW-Code²¹

Der `Code for Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers´ gilt auf allen Handelsschiffen, die unter der Flagge eines Staates fahren, der das STCW-Übereinkommen unterzeichnet hat. Ziel des Übereinkommens ist es, einen einheitlichen Standard für die Ausbildung, die Erteilung von Befähigungszeugnissen und Wachdienst von Seeleuten festzulegen, um eine internationale Vergleichbarkeit im Bereich der Ausbildung von Seeleuten zu schaffen.

2.2.3 Resolutionen

Im Turnus von zwei Jahren tagt die Vollversammlung der IMO und ihre Beschlüsse werden über sog. Resolutionen kommuniziert. Diese Entschlüsse (Resolutionen) haben in erster Linie

¹⁸ International Code for Life Saving Appliances, IMO, London

¹⁹ International Safety Management Code, IMO, London 2013

²⁰ International Maritime Code for Dangerous Goods, IMO, London 2018

²¹ Code for Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, IMO, London 2013

erklärenden Charakter. So dienen sie hauptsächlich zur Interpretation und Verdeutlichung verabschiedeter Konventionen.

Beispielsweise sei an dieser Stelle die Resolution A.952(23) „Graphical Symbols for Shipboard Fire Control Plans“ genannt. Hier erfolgt in Anlehnung an internationale Normen (ISO) die Definition von Piktogrammen für Bauteile, Feuerlöschanlagen und weitere Brandschutzkomponenten.²²

2.2.4 Rundschreiben

Vergleichbar zu den Resolutionen der Vollversammlung sind die Rundschreiben. Diese werden auch Zirkulare genannt und von den Unterausschüssen der IMO zur Publikation von Dokumenten verwendet. Dabei dienen sie der Interpretation und oder der Klarstellung von Konventionsvorschriften.²³

Beispielhaft sind die folgenden Rundschreiben aus dem Schiffsicherheitsausschuss (MSC):

Das MSC.1/Circular 850 “Guidelines for the Maintenance and Inspection of Fire-Protection Systems and Appliances” befasst sich mit Wartungsintervallen. Die empfohlenen Intervalle für brandschutztechnische Anlagen variieren in Abhängigkeit von ihrer Ausfallwahrscheinlichkeit und Bedeutung. So werden z.B. Sicht- und Funktionsprüfungen im wöchentlichen Turnus gefordert bis hin zu Prüfungen, die alle fünf-Jahre durchgeführt werden.²⁴

Die Verfahrensweise, wie ein Alternatives Design im Brandschutz zu erstellen ist, wird im MSC.1/Circular 1002 “Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety” erläutert. Als Folge der Weiterentwicklung der SOLAS gibt es seit dem Jahre 2002 die Möglichkeit, den Nachweis gleicher Sicherheit anhand eines Referenz Designs zu erbringen. Das Referenz Design muss den Anforderungen nach Kapitel II-2 der SOLAS genügen.²⁵

²² Resolution A.952(23), GRAPHICAL SYMBOLS FOR SHIP BOARD FIRE CONTROL PLANS

²³ Basiswissen Schifffahrt

²⁴ MSC/Circ. 850, Guidelines for the Maintenance and Inspection of Fire-Protection Systems and Appliances

²⁵ MSC/Circ. 1002, Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety

2.3 Europäische Regelungen

Schwere Seeunglücke führten dazu, dass einzelne Staaten oder Staatengemeinschaften eigene oder zusätzliche Vorschriften zu den internationalen Regularien der IMO in Verkehr gebracht haben. In der Europäischen Union ist die Europäische Agentur für die Sicherheit des Seeverkehrs (EMSA)²⁶ dafür verantwortlich und in den USA beispielsweise die US Coast Guard²⁷. Die erlassenen Regelungen werden in Form von Richtlinien in der EU verabschiedet und besitzen aus sich heraus keine gesetzliche Bedeutung. Die Mitgliedsstaaten sind lediglich verpflichtet, diese innerhalb einer Frist in nationales Recht umzusetzen. Sodann besitzen diese Vorschriften für Schiffe in den Hoheitsgebieten des jeweiligen Staates oder für Schiffe unter der Flagge des Staates Gültigkeit. Ein Beispiel ist die Richtlinie 2005/33/EG über die Reduzierung von Schwefelemissionen für Häfen in der EU.²⁸

Als Reaktion auf die Havarie des Öltankers 'Erika' im Jahre 1999 begründete die EU die EMSA in 2002, welche folgende Aufgaben wahrnimmt²⁹:

- Beratung der Europäischen Kommission und der Mitgliedsstaaten bei der Umsetzung von Gesetzen und Richtlinien. Überwachung selbiger durch Inspektionen. Weitere Beratung auf den Gebieten der Seeverkehrssicherheit und der Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe,
- Mitarbeit bei der Sammlung und Bereitstellung von Daten,
- Unterstützung bei der Unfalluntersuchung und Hafenstaatskontrollen,
- Unterstützung bei sicherheitsrelevanten Feldern auch von Nicht-EU Staaten.

Die Ziele der EMSA sind ähnlich der IMO und zwar die Schaffung einheitlicher Regularien für die Sicherheit auf See und die Bekämpfung der Meeresverschmutzung innerhalb der EU. Somit fordert sie die Mitgliedsstaaten dazu auf, die von der IMO verabschiedeten Konventionen zu

²⁶ Internetseite EU

²⁷ Internetseite USCG

²⁸ Richtlinie 2005/33/EG

²⁹ Internetseite EMSA

unterzeichnen und eigene Vorschriften einzuführen, welche überwiegend auf Fahrten innerhalb der EU abzielen.

2.4 Nationale Vorschriften im maritimen Brandschutz

Zu den wichtigen nationalen Vorschriften, welche auch den Brandschutz betreffen, gehören die Flaggenstaaten und die Hafenstaatkontrolle. Der Ursprung sowie die Aufgaben dieser Organe werden nachfolgend beschrieben.

2.4.1 Flaggenstaaten

Flaggenstaat ist der Staat, in welchem Register das Schiff eingetragen ist und welche Flagge es führt. Somit gilt nach Art. 91 des internationalen Seerechtsübereinkommens zu jeder Zeit das Recht des Flaggenstaates auf dem Schiff, aber zugleich ist das Schiff kein Bestandteil von dessen Staatsgebiet.³⁰

Zu den Aufgaben eines Flaggenstaates gehört die Einhaltung und Überwachung internationaler und nationaler Standards auf den Schiffen. Weiterhin hinterlegt der Flaggenstaat alle wichtigen Informationen wie z.B. Größe und Art des Schiffes, Reeder und Klassifikationsgesellschaft in einem Schiffsregister. Fährt das Schiff unter der Flagge der Bundesrepublik Deutschland, müssen die hiesigen Arbeits- und Lebensbedingungen eingehalten werden. Dazu gehört das deutsche Steuerrecht ebenso wie die Sozialleistungen für Seeleute, woraus unterschiedlich hohe Kosten resultieren. Aufgrund der freien Flaggenwahl führt dies dazu, dass Schiffe oftmals ausgeflaggt werden und unter Flaggen anderer Nationen fahren. Führende Nation der Flaggenstaaten ist Panama vor Liberia.

Neben seiner Funktionsweise als Verbindungsglied zum Schiff, Reeder, Besatzung, Haftungspersonen und anderen Staaten ist der Flaggenstaat auch zur Hafenstaatkontrolle berechtigt (siehe Kapitel 2.4.2). Weiterhin stellt er Zertifikate aus z.B. Safety Management Certificate (SMC) oder das International Ship Security Certificate (ISSC), welche in regelmäßigen Abständen aufgrund der Besichtigung des Flaggenstaates oder von Klassifikationsgesellschaften erneuert werden. Dem Flaggenstaat obliegt es, eine Klassifikationsgesellschaft zu ermächtigen.³¹

³⁰ Art.91 Internationalen Seerechtsübereinkommens

³¹ Internetseite deutsche Flagge

2.4.2 Hafenstaatkontrolle³²

Im Jahr 1978 havarierte der Öltanker `Amoco Cadiz´ vor der Küste der Bretagne/Frankreich. Während der Untersuchungen des Unglücks stellten sich erheblichen Lücken bei der technischen Überwachung heraus. Als Folge dessen wurde vier Jahre später die Hafenstaatkontrolle als `Memorandum of Understanding on Port State Control´ (MoU) gegründet. Die Kontrollinstanz wurde zunächst von 14 europäischen Staaten unterzeichnet und erlaubt unangemeldete Kontrollen hinsichtlich der Einhaltung internationaler Vorschriften, auf Schiffen fremder Flaggenstaaten durchzuführen.

Bis heute haben 27 Staaten das Pariser Memorandum unterzeichnet, welches durch weitere Unglücke ergänzt und verschärft wurde. In Deutschland ist für die Durchführung der Kontrollen die `Dienststelle Schiffssicherheit der Berufsgenossenschaft Verkehr´ verantwortlich.

Neben dem Pariser Memorandum, welches für Europa gilt, gibt es noch acht weitere Regionen weltweit. Dort fordert die IMO ihre Mitgliedsstaaten auf, regionale Hafenstaatkontrollen einzuführen.

Die Regionen teilen sich wie folgt auf:³³

- Europa und Nordatlantik
- Asien und Pazifik
- Lateinamerika
- Karibik
- West und Zentralafrika
- Schwarzes Meer
- Mittelmeer
- Indischer Ozean
- Golf Region

³² Vgl. Internetseite deutsche Flagge

³³ MoU Paris

2.5 Bauvorschriften der Klassifikationsgesellschaften³⁴

Klassifikationsgesellschaften sind private Organisationen, die als Vertreter des Flaggenstaates ermächtigt werden, technische Kontrollen auf Schiffen durchzuführen, die unter seiner Flagge fahren. Hierbei kommt den Klassifikationsgesellschaften die Aufgabe des technischen Prüfdienstes zu, die relevanten Vorschriften bei der Konstruktion und Fertigung zu kontrollieren sowie regelmäßige Besichtigungen des Schiffes während des Betriebes durchzuführen. Die in Intervallen wiederkehrenden regelmäßigen Prüfungen werden auch als 'Klassen-Tätigkeit' bezeichnet und können mit den unterschiedlichen Standards der Klassenzeichen eine Aussage über die Qualität des Schiffes liefern. Dies geht auf das Bedürfnis von Versicherungen und Kaufleuten zurück, eine objektive Feststellung über den Zustand eines Schiffes zu erhalten.

Weltweit existieren derzeit zwölf anerkannte Klassifikationsgesellschaften, die im Internationalen Verband der Klassifikationsgesellschaften organisiert sind.³⁵ Durch ein weltweites Netz an Inspektoren besitzen die Klassifikationsgesellschaften die Möglichkeit, die Schiffe zum fälligen Zeitpunkt zu besichtigen. Um die Schiffe auf einem einheitlichen und definierten Sicherheitsniveau überprüfen zu können, haben die Klassifikationsgesellschaften technische Vorschriften und Richtlinien auf Grundlage der internationalen Regelwerke entwickelt.

³⁴ Vgl. Basiswissen Schifffahrt

³⁵ International Association of Classification Societies, IACS

3. Brandschutz auf Containerschiffen nach SOLAS

Das folgende Kapitel soll den geforderten Brandschutz auf Containerschiffen, im speziellen der Laderäume, darstellen. Zuerst werden die Anforderungen an das Brandverhalten und die brandschutztechnische Ausbildung der Laderäume nach den SOLAS Standards eingegangen.

Im Weiteren werden die anzuwendenden Vorschriften bzgl. Brandschutzeinrichtungen in Laderäumen detailliert aufgezeigt. In diesem Zusammenhang wird auch der FSS-Code besprochen, der die technischen Anforderungen an die Brandschutzsysteme, gemäß der SOLAS regelt. Wie schon in Kapitel 2.2.1 erwähnt, umfasst die SOLAS eine Vielzahl von Sicherheitsanforderungen, wobei das Kapitel II-2 'Bauart von Schiffen - Brandschutz, Branderkennung und Brandbekämpfung' und Kapitel VII 'Beförderung gefährlicher Güter' genauer untersucht werden sollen.

3.1 Allgemeine Grundlagen des Brandschutzes

Grundsätzlich gliedert sich der Brandschutz auf See ebenso wie an Land in die folgenden Arten des Brandschutzes:

- baulicher Brandschutz
- anlagentechnischer Brandschutz
- organisatorischer Brandschutz
- abwehrender Brandschutz

Der Abwehrende Brandschutz auf See beinhaltet alle passiven und aktiven Maßnahmen, die hilfeleistende Stellen während des Brandereignissen treffen. Anders als an Land ist hier mit langen Vorlaufzeiten zu rechnen, sodass dem abwehrenden Brandschutz durch externe Stellen in der Seefahrt nur eine untergeordnete Rolle zukommt.

Weiterhin ähneln sich die Schutzziele, welche in der Musterbauordnung und der SOLAS beschrieben werden. So sind nach der MBO „Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass

- der Entstehung eines Brandes und
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und
- bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.“³⁶

Die SOLAS verweist in Ihrem Kapitel II-2 auf ein Mindestsicherheitsniveau das für Personen und Sachgüter sichergestellt werden muss. Konkret werden in dem Kapitel ‘fire safety objectives and functional requirements’ folgende Schutzziele aufgeführt:

- das Auftreten von Feuer und Explosion vermeiden,
- verringern der Personengefährdung durch Feuer und Rauch,
- reduzieren von Schäden durch Feuer und Rauch am Schiff, der Ladung und der Umwelt,
- eindämmen, kontrollieren und unterdrücken von Bränden und Explosionen am Ort der Entstehung
- bereitstellen von ausreichend dimensionierten und leicht zugängliche Fluchtwegen.

Im folgenden Abschnitt II-2 werden funktionale Anforderungen aufgeführt, die durch technische Maßnahme konkretisiert werden. Ziel ist die Einhaltung der Schutzziele.³⁷

- Unterteilung des Schiffes in vertikale und horizontale Brandabschnitte durch wärmedämmende und bauliche Trennungen,
- wärmedämmende und bauliche Trennung der Aufenthaltsräume vom übrigen Schiff,
- Vermeidung brennbarer Materialien,
- frühzeitige Branddetektion,

³⁶ MUSTERBAUORDNUNG – MBO – FASSUNG NOVEMBER 2002, § 14 Brandschutz

³⁷ SOLAS, Part A – General, Regulation 2 - Fire Safety Objectives and Functional Requirements

- wirksame Löscharbeiten am Entstehungsort,
- Sicherung von Angriffs- und Fluchtwegen,
- Verfügbarkeit von Feuerlöschgeräten.

3.2 Anforderungen an das Brandverhalten von Bauteilen im Schiffbau³⁸

Ebenso wie im Landbau werden auch im Schiffbau spezielle brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile gestellt, wobei der Begriff 'Bauteil' einzelne Bestandteile von Gebäuden, wie bspw. tragende und nichttragende Wände, Stützen, Pfeiler und Decken umfasst. Im Hinblick auf die brandschutztechnischen Anforderungen unterscheidet sich die Klassifizierung der umliegenden Bauteile im Schiffbau in ihrer Terminologie von der Normung des europäischen Bauwesens. Nach SOLAS werden trennende Bauteile in drei unterschiedliche Klassen (A, B, C) eingestuft.

Die Einstufung erfolgt anhand der Kriterien des maximalen Temperaturanstiegs, Durchgang von Feuer und Rauch und Einhaltung der Höchsttemperatur. Die Typ-Bezeichnung (A, B) wird im Folgenden um die Einhaltung des Temperaturkriteriums in Minuten ergänzt (A-0, A-15, A-30, A-60, B-0, B-15). Die höchstmögliche brandschutztechnische Klassifizierung nach SOLAS ist A-60, wohingegen die Klasse C lediglich die Verwendung von nichtbrennbaren Bauteilen fordert.

Öffnungen für Kabel etc. sind rauch- und flammendicht auszuführen. Türen in Wänden sind zur Zufriedenheit der Flagge auszuführen, wenn die Wand nicht A-klassifiziert ist. Das bedeutet, dass die zuständige Behörde des Flaggenstaates eigene Regeln an die Anforderungen aufstellen kann.

Folgende Bedingungen sind für trennende Bauteile vom Typ A erforderlich:

- Errichtet aus Stahl oder Materialien mit vergleichbaren Eigenschaften.
- Mit zugelassenen nichtbrennbaren Materialien isoliert, sodass die Brandeinwirkung im Normal-Brandversuch die mittlere Temperatur auf der dem Brand abgekehrten Seite um nicht mehr als 140 °C von der Umgebungstemperatur ansteigt. Die Temperatur an einem beliebigen Punkt darf um nicht mehr als 180 °C über der Umgebungstemperatur liegen.

³⁸ Vgl. SOLAS Kapitel-II

- Durchgang von Feuer und Rauch muss bis zum Ende des „One-hour standard fire test“ (nach FTP Code) verhindert werden.

Folgende Bedingungen sind für trennende Bauteile vom Typ B erforderlich:

- Errichtet aus nichtbrennbaren Materialien. Bezug/Verblendung darf aus brennbaren Materialien bestehen.
- Isoliert, sodass die Brandeinwirkung im Normal-Brandversuch, die mittlere Temperatur auf der brandabgekehrten Seite um nicht mehr als 140 °C von der Umgebungstemperatur ansteigen. Die Temperatur an einem beliebigen Punkt darf um nicht mehr als 225 °C über die Umgebungstemperatur ansteigen.
- Durchgang von Feuer muss bis zum Ende des „half-hour standard fire test“ (nach FTP Code) verhindert werden.

Folgende Bedingungen sind für trennende Bauteile vom Typ C erforderlich:

- Errichtet aus nichtbrennbaren Materialien. Bezug/Verblendung darf aus brennbaren Materialien bestehen.

3.3 Laderäume auf Containerschiffen nach SOLAS Kapitel II und VII

Laderäumen müssen aus Stahl errichtet werden und sind in der Containerschiffahrt wie folgt definiert:

„Alle für die Ladung benutzte Räume (einschließlich Ladeöltanks) sowie Schächte und Luken zu diesen Räumen, mit Ausnahme von Sonderräumen.“³⁹

Zunächst kann zwischen zwei Varianten an Laderäumen unterschieden werden, nämlich der klassischen Variante mit Ladeluke, die zusätzliche Containerstellplätze auf dem offenen Deck und den Ladeluken bietet und zum anderen in sogenannte `Open Top Containerschiffe`. Bei diesem Schiffstyp wird auf die Installation von Ladeluken verzichtet, wodurch die Container direkt im Schiffsrumpf gestapelt werden. Die Führung der Container erfolgt durch senkrecht installierte

³⁹ Germanischer Lloyd Bauvorschriften und Richtlinien, I - Schiffstechnik: Teil 1: Kapitel 2: Abschn.: 12, Germanischer Lloyd, 2009

Stahlschienen. Der Vorteil dieser Bauart ist die schnellere Bauzeit, höhere Ladekapazität sowie geringere Kosten im Vergleich zu klassischen Containerschiffen. Nachteilig ist hingegen die höhere Bruttoreaumzahl, welche eine dimensionslose Kennzahl ist, in die das Volumen der nutzbaren Räume eines Schiffes und ein größenbezogener Faktor einfließen. Anhand der BRZ werden unter anderem Hafen- und weitere Dienstleistungsgebühren berechnet.

Eine weitere gebräuchliche Größenangabe für Containerschiffe ist die Stellplatzkapazität für 20ft Seecontainer, gemessen in TEU (Twenty Feet Equivalent Unit). Die folgende Abbildung stellt exemplarisch die Aufteilung der Containerplätze für ein 2500 TEU Schiff dar.

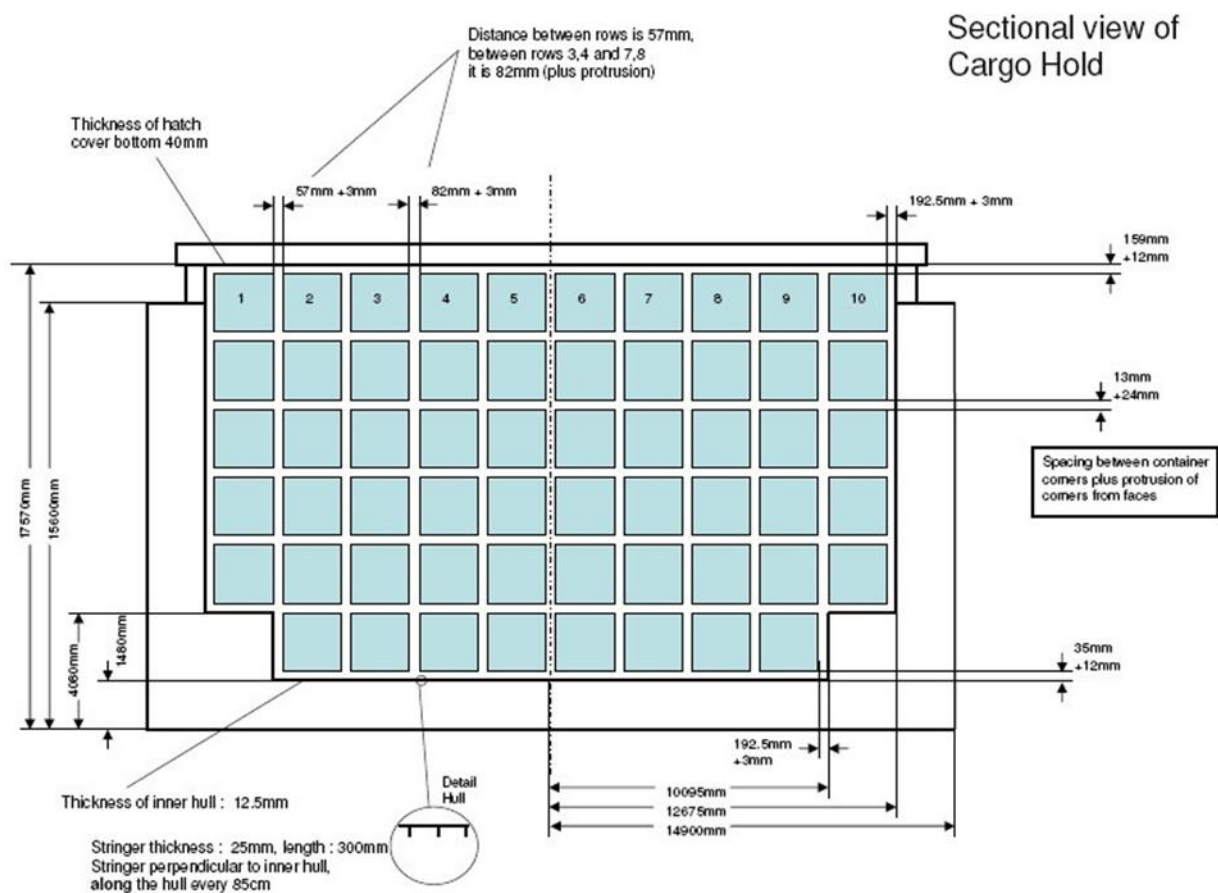


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung Laderaum⁴⁰

Im Folgenden sind die wichtigsten Vorschriften der SOLAS für die Brandschutzeinrichtungen auf Frachtschiffen aus Kapitel II 'Brandschutz, Branderkennung und Brandbekämpfung' sowie aus Kapitel VII 'Beförderung gefährlicher Güter' in Laderäumen teilweise verkürzt aufgeführt:

⁴⁰ Schulungs- und Arbeitsunterlagen DNV GL

Meldung und Anzeige, Kapitel II, Teil C, Regel 741

Abs. 1.1 "Fest eingebauter Brandmelde- und Feueranzeigesysteme müssen für die Eigenart der Räume, das Brandentwicklungsvermögen und die zu erwartende Entwicklung von Rauch und Gasen geeignet sein;"

Brandbekämpfung, Kapitel II, Teil C, Regel 1042

Abs. 1 Ziele

Abs. 1.1 "Es müssen fest eingebaute Feuerlöschsysteme installiert sein, wobei das Brandentwicklungsvermögen der geschützten Räume angemessen zu berücksichtigen ist.

Abs. 1.2 "Die Feuerlöscheinrichtungen müssen sofort einsatzbereit sein"

Abs.2 Löschwasser-Versorgungssysteme

"Schiffe müssen mit Feuerlöschpumpen, Feuerlöschleitungen, Anschlussstutzen und Schläuche ausgestattet sein, die den geltenden Anforderungen/Vorschriften entsprechen."

Abs. 2.1.3 Durchmesser von Feuerlöschleitungen

Der Durchmesser von Feuerlöschleitungen ist auf Frachtschiffen so zu wählen, dass ein Durchfluss von 140 m³/h gewährleistet ist.

Abs. 2.2.5 Anzahl und Lage von Anschlussstutzen

Abs. 2.1.5.1 "Die Anzahl und Lage der Anschlussstutzen müssen so gewählt werden, dass mindestens zwei Wasserstrahlen, die nicht vom gleichen Anschlussstutzen ausgehen, von denen einer aus einer einzigen 'Schlauchlänge' gespeist wird, jede Stelle eines in Fahrt befindlichen Schiffes erreichen kann, welche normalerweise den Fahrgästen oder der Besatzung zugänglich ist. (...) Darüber hinaus sind Anschlussstellen in der Nähe von Zugängen zu geschützten Räumen zu positionieren."

Abs. 2.1.6 Drücke an Anschlussstutzen

An allen Anschlussstutzen müssen folgende Mindestdrücke eingehalten werden:

⁴¹ SOLAS, S.217

⁴² SOLAS, S.272 ff.

Auf Frachtschiffen mit einer Bruttoreaumzahl $> 6000 \cdot 0.27 \text{ N/mm}^2$ (2,7 Bar) und $< 6000 \cdot 0.25 \text{ N/mm}^2$ (2,5 Bar).

Abs. 2.1.7 Internationaler Landanschluss

Abs. 2.1.7.1 "Auf Schiffen mit einer Bruttoreumzahl < 500 , muss mindestens ein internationaler Landanschluss vorhanden sein"

Abs. 2.2 Feuerlöschpumpen

Abs. 2.2.1 Als Feuerlöschpumpen akzeptierte Pumpen

"Sanitär-, Ballast-, Lenz- oder allgemeine Betriebspumpen können als Feuerlöschpumpen anerkannt werden, sofern diese gewöhnlich nicht als Ölpumpen verwendet werden und wenn doch, geeignete Umschaltvorrichtungen installiert sind."

Abs. 2.2.2 Anzahl der Feuerlöschpumpen

Abs. 2.2.2.2 "Schiffe sind wie folgt mit unabhängigen Feuerlöschpumpen auszustatten:

- auf Frachtschiffen mit einer Bruttoreumzahl von > 1000 mindestens zwei Feuerlöschpumpen;
- bei einer Bruttoreumzahl von < 1000 mindestens zwei kraftbetriebene Pumpen, eine davon mit unabhängigem Antrieb."

Abs. 2.2.3.1 Feuerlöschpumpen

Abs. 2.2.3.1.2 "...auf Frachtschiffen ist eine Rückfallebene sicherzustellen, wenn ein Brand in einer einzelnen Abteilung alle Pumpen außer Betrieb setzen könnte. Die Rückfallebene ist konform des FSS-Codes auszuführen und muss aus einer Notfeuerlöschpumpe bestehen, deren Energiequelle und Seewasseranschluss außerhalb des Raumes liegen, in dem sich die Hauptfeuerlöschpumpen oder ihre Energiequellen befinden."

Abs. 2.2.3.3 Zusätzliche Pumpen auf Frachtschiffen

"Auf Frachtschiffen, auf denen andere Pumpen (z.B. allgemeine Betriebspumpen, Lenz- und Ballastpumpen etc.) in einem Maschinenraum installiert sind, muss sichergestellt sein, dass mindestens eine dieser Pumpen mit einem vorgeschriebenen Druck und Volumenstrom die Feuerlöschleitungen mit Wasser versorgen kann."

Abs. 2.2.4.1 Leistungsfähigkeit der vorgeschriebenen Feuerlöschpumpen

Abs. 2.2.4.1.2 "...bei Pumpen auf Frachtschiffen, die keine Notfallpumpen sind, braucht der Gesamt-Volumenstrom der Feuerlöschpumpen nicht größer als 180 m³/h zu sein."

Abs. 2.3 Feuerlöschschläuche und Strahlrohre

Abs. 2.3.1 Allgemeine Anforderung

Abs. 2.3.1 "..., ihre Länge muss ausreichen, um mit einem Wasserstrahl jede Stelle erreichen zu können, an der sein Einsatz nötig sein könnte. Jeder Schlauch muss mit einer Düse und den notwendigen Kupplungen versehen sein. Die in diesem Kapitel als "Feuerlöschschläuche" bezeichneten Schläuche müssen zusammen mit allen erforderlichen Armaturen und Werkzeugen in auffälligen Positionen in der Nähe der Hydranten einsatzbereit gehalten werden."

Feuerlöschschläuche müssen eine Länge von mindestens 10 m haben, jedoch nicht mehr als:

- 15 m in Maschinenräumen,
- 20 m in anderen Räumen und freie Decks,
- 25 m für freie Decks auf Schiffen mit einer größten Breite von mehr als 30 m.

Abs. 2.3.2 Anzahl und Durchmesser der Feuerlöschschläuche

Abs. 2.3.2.3.1 "Auf Frachtschiffen mit einer Bruttoreaumzahl > 1000 müssen für jeweils 30 m Schiffslänge ein Feuerlöschschlauch sowie ein Reserveschlauch vorhanden sein, jedoch mindestens fünf Schläuche insgesamt. Hierbei ist die Anzahl für Maschinen- oder Kesselräume vorgeschriebenen Schläuche nicht enthalten. Schiffe die gefährliche Güter (nach Regel 19) befördern, müssen neben zu den oben vorgeschriebenen Feuerlöschschläuchen drei weitere Schläuche zusätzlich mitführen, inklusive Strahlrohren."

Abs. 2.3.3 Größe und Typ der Strahlrohre

Abs. 2.3.3.3 "Für Maschinenräume und im Freien müssen die Strahlrohrmündungen so groß sein, dass die kleinste Pumpe zwei Wasserstrahlen mit dem vorgesehenen Druck nach 2.1.6 fördern kann. Es genügt ein Mündungsdurchmesser von 19 mm."

Abs. 7 Feuerlöscheinrichtungen in Laderäumen

Abs. 7.1 Fest eingebaute Gas-Feuerlöschsysteme für normale Ladung

Abs. 7.1.3 Laderäume auf Frachtschiffen mit einer Bruttoreaumzahl > 2000 müssen durch ein fest eingebautes CO₂-Feuerlöschsystem, Inertgas-Feuerlöschsystem oder einem Feuerlöschsystem geschützt sein, welches einen äquivalenten Schutz bietet. Die Feuerlöschsysteme müssen die Vorgaben des FSS-Codes erfüllen.

Abs. 7.2 Fest eingebaute Feuerlöschsysteme für gefährliche Ladung

Frachtschiffe die gefährliche Güter in Laderäumen befördern, müssen ein fest eingebautes CO₂-Feuerlöschsystem, Inertgas-Feuerlöschsystem oder ein Feuerlöschsystem, das nach Auffassung der Verwaltung einen gleichwertigen Schutz für die beförderte Ladung bietet, vorgesehen sein. Die Feuerlöschsysteme müssen die Vorgaben des FSS-Codes erfüllen.

Abs. 10 Ausrüstung für die Brandbekämpfung

Abs. 10.2 Anzahl der Schutzausrüstungen für die Brandbekämpfung

Abs. 10.2.1 Alle Schiffe müssen mindestens zwei Schutzausrüstungen für die Brandbekämpfung mitführen.

Teil der vorgeschriebenen Schutzausrüstungen für die Brandbekämpfung gemäß dem FSS-Code sind jeweils⁴³:

- ein Pressluftatmer mit Vollmaske und Reserve Pressluftflasche(n), Luftvolumen mind. 1200 Liter,
- eine feuerfeste Sicherheitsleine von mindestens 30m Länge mit Karabinerhaken,
- ein Hitzeschutzanzug mit Wasser undurchlässiger Oberfläche,
- ein Paar Schutzstiefel aus Gummi oder aus einem anderen nichtleitenden Material,
- ein Schutzhelm
- eine Feueraxt mit hochspannungsisoliertem Griff
- eine elektrische Sicherheitslampe mit mind. 3 h Brenndauer

Anleitung, Bordtraining und Übungen, Kapitel VII, Teil E, Regel 15

⁴³ Vgl. FSS-Code, Kapitel 3, Abs. 2.1.1 ff.

2.1. Anweisungen, Aufgaben und Organisation

2.1.1. „Die Besatzungsmitglieder erhalten Anweisungen über den Brandschutz an Bord des Schiffes.“

2.1.2. „Die Besatzungsmitglieder erhalten Anweisungen zu den ihnen übertragenen Aufgaben.“

2.1.3. „Die für das Feuerlöschen zuständige Besatzung ist zu organisieren, welche jederzeit die Möglichkeit haben, ihre Pflichten zu erfüllen auch während das Schiff in Betrieb ist.“

2.2. Onboard Schulungen und Übungen

2.2.1. „Die Besatzungsmitglieder müssen mit den Vorkehrungen des Schiffes sowie mit der Lage und dem Betrieb der Systeme und Geräte, die für eine Brandbekämpfung erforderlich ist, vertraut sein.“

2.2.3. „Regelmäßig Bewertung der Ausbildung von Besatzungsmitgliedern im abwehrenden Brandschutz durch die Durchführung von Onbord-Trainings und Übungen.“

2.2.4. „Die Ausbildung für die an Bord befindlichen Feuerlöschsysteme und -geräte ist nach Maßgabe der Richtlinie III / 19.4.1 durchzuführen.“

2.3. Schulungsunterlagen

2.3.2. „Das Ausbildungshandbuch ist in der Arbeitssprache des Schiffes zu verfassen.“

2.3.4. „Das Trainingshandbuch soll im Einzelnen Folgendes erklären:

- .1. Allgemeine Brandschutzpraxis und Vorsichtsmaßnahmen bezüglich der Gefahren des Rauchens, elektrischer Gefährdungen, brennbarer Flüssigkeiten und weiteren Bordgefahren;
- .2. Allgemeine Hinweise zur Brandbekämpfung einschließlich Techniken zur Brandbekämpfung sowie die Benutzung von Feuermeldestellen.
- .3. Bedeutungen der Schiffsalarme;
- .4. Betrieb und Verwendung von Feuerlöschsystemen und -geräten;
- .5. Betrieb und Verwendung von Brandschutztüren;
- .6. Betrieb und Verwendung von Brand- und Rauchschutzklappen; und
- .7. Escape-Systemen und Geräten“

Abs. 1 Ziele

Abs. 1.1 Brandschutzsysteme sind vorzusehen, die das Schiff vor den zusätzlichen Brandgefahren, die mit der Beförderung gefährlicher Güter verbunden ist, zu schützen;

Abs. 1.2 gefährlichen Güter müssen von Zündquellen ausreichend getrennt sein, und

Abs. 1.3 für die mit der Beförderung von gefährlichen Gütern ausgehenden Gefahren muss geeignete persönliche Schutzausrüstung vorhanden sein.

Abs. 3 Besondere Vorschriften

Abs. 3.1 Wasserversorgung

Abs. 3.1.2 Die verfügbare Wassermenge muss entsprechend Regel 10.2 ausreichen, um die Versorgung von vier Strahlrohren zu ermöglichen; dabei muss jeder Teil des leeren Laderaums erreicht werden können.

Abs. 3.1.3 In Frachträumen sind Einrichtungen vorzusehen, mit denen der vorgesehene Laderaum unter Deck gekühlt werden kann. Die dafür vorgesehene Wassermenge entspricht mindestens 5 l/m² der waagerechten Fläche. Dies kann entweder durch die Anordnung fest eingebauter Sprühdüsen oder durch Fluten des Laderaums mit Wasser erreicht werden.

Abs. 3.3 Anzeigesystem

In allen Arten von Laderäumen muss entweder ein fest eingebautes Feuermelde- und Feueranzeigesystem oder ein Absaugrauchmeldesystem vorhanden sein, dass den Anforderungen des FSS-Codes entspricht.

Abs. 3.6 Persönliche Schutzausrüstung

Zusätzlich zu den in Regel 10.10 vorgeschriebenen Brandschutzausrüstungen muss eine vollständige Schutzausrüstung für vier Personen vorgehalten werden, die gegen das einwirken von Chemikalien unempfindlich ist. Die Schutzausrüstung muss die gesamte Haut bedecken, so dass kein Teil des Körpers ungeschützt ist. Weiterhin sind zwei umluftunabhängige Pressluftatmer vorzuhalten mit mind. zwei Reserveflaschen. Frachtschiffe, die über die Möglichkeit verfügen, diese ohne jegliche Kontamination aufzufüllen, benötigen nur eine Reserveflasche.

Abs. 3.7 Tragbare Feuerlöscher

Für die Laderäume sind tragbare 12kg Pulverfeuerlöscher oder vergleichbar vorzusehen. Diese Feuerlöscher sind zusätzlich zu den bereits vorhandenen tragbaren Feuerlöscher vorzuhalten.

4. Transport von Gefahrstoffen auf Seeschiffen

In diesem Kapitel werden zwei Gefahrgüter vorgestellt, die in den vergangenen Jahren zu einer Reihe von Schäden im Seeverkehr, durch thermisches Durchgehen, beigetragen haben. Zunächst wird jeweils ein Seeunfall und deren Ursache vorgestellt.

4.1 Brände auf Containerschiffen durch Gefahrstoffe

Am 25. Mai 2019 kam es im Hafen von Laem Chabang (Thailand) zu einem Brandereignis, für das Calciumhypochlorit verantwortlich gemacht wird. Das koreanische Vollcontainerschiff KMTC Hong Kong mit 1585 TEU ist 1998 vom Stapel gelaufen und befand sich auf einer Reise von Busan nach Laem Chabang. Auf dem Weg wurden unter anderem chinesische Häfen und Ho Chi Minh Stadt angelaufen.



Abbildung 6: Brand auf der KMTC Hong Kong, Brandursache: Calciumhypochlorit⁴⁴

Der Brand konnte vor Tagesende eingedämmt werden, jedoch zogen sich die Löscharbeiten über einen längeren Zeitraum hin. Insgesamt wurden 35 Container durch den Brand zerstört, wobei die thailändische Hafenbehörde einen Container mit Calciumhypochlorit und chloriertem Paraffinwachs als brandursächlich ansieht.⁴⁵

⁴⁴ Internetseite shippingandfreightresource, Stand: 20.09.2020

⁴⁵ Internetseite Cox Claims Group, Stand: 20.09.2020

Anfang des Jahres brach auf der Cosco Pacific ein Feuer im Laderaum aus. Am 04.01.2020 hatte das Vollcontainerschiff den Hafen Klang (Malaysia) verlassen und nahm Kurs auf den indischen Hafen Nhava Sheva. Die Cosco Pacific wurde 2008 in den Dienst gestellt und besitzt eine Kapazität von 10.000 TEU. Im Endeffekt konnte das Feuer mit Hilfe der CO₂-Löschanlage an der Ausbreitung gehindert und schlussendlich im Hafen von Columbo gelöscht werden.



Abbildung 7: Brand auf der COSCO Pacific, Brandursache: Lithium-Ionenbatterie⁴⁶

Nach den Angaben von COCSO China war die Brandursache für den Zwischenfall das thermische Durchgehen einer Lithium-Ionenbatterie Ladung. Wie im IMDG-Code angegeben, werden Batterien unabhängig von der verwendeten Chemie, aufgrund ihres korrosiven Charakters als gefährliche Güter eingestuft. Als solche müssen sie ordnungsgemäß deklariert werden, um ordnungsgemäß gelagert zu werden und eine Brandgefahr zu vermeiden. COSCO hat Berichten zufolge festgestellt, dass die Batterien nicht ordnungsgemäß deklariert wurden.⁴⁷

4.2 Calciumhypochlorid

⁴⁶ Internetseite ghforwarding, Stand: 20.09.2020

⁴⁷ Internetseite maritimebulletin, Stand: 20.09.2020

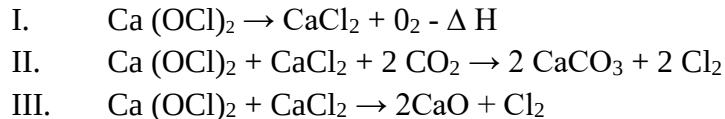
Calciumhypochlorit ist eine Chemikalie, die Weltweit in großen Mengen produziert und transportiert wird. Hauptsächlich wird es bei der Aufbereitung/Desinfektion von Wasser (Trinkwasser, Schwimmbäder) verwendet.

Die marktüblichen Formen von Calciumhypochlorit sind eine Mischung aus chemischen Verbindungen, die aus Calciumhypochlorit, Natriumhypochlorit, Calciumhydroxid, Calciumchlorid und geringfügigen Mengen anderer Verbindungen bestehen.

Alle Formen von Calciumhypochlorit haben starke chemische Eigenschaften, weshalb es als Gefahrstoff nach IMDG Class 5.1 geführt wird.⁴⁸ Die Hauptformen sind die wasserfreien und hydratisierten hochfesten Formen von Calciumhypochlorit. Formen mit geringerer Festigkeit werden z.B. als Bleichpulver eingesetzt.

Die von Calciumhypochlorit ausgehende Gefahr ist die Zersetzung bei niedrigen Temperaturen, ohne das organische Materialien vorhanden sein müssen.

Die Zersetzungsreaktion von Calciumhypochlorit wird wie folgt angenommen:⁴⁹



Die Reaktion kann schon bei 20 °C beginnen, obwohl sie in diesem Temperaturbereich noch sehr langsam verläuft. Bei steigenden Temperaturen nimmt Reaktionsgeschwindigkeit zu.⁵⁰ Hinzu kommt, dass bei der Zersetzung Wärme erzeugt wird, sodass die weitere Reaktionsgeschwindigkeit von folgenden Faktoren abhängt:

- Umgebungstemperatur
- Lüftungsbedingungen im Container und am Gebinde
- Schüttdichte
- Material, Form und Größe der Verpackung
- Größe des Containers

⁴⁸ Guidelines for the Carriage of Calcium Hypochlorite in Containers A Joint Publication of CINS and the International Group of P&I Clubs May

⁴⁹ Brian F. Gray, Brendan Halliburton, The thermal decomposition of hydrated calcium hypochlorite (UN 2880)

⁵⁰ Brian F. Gray, Brendan Halliburton, The thermal decomposition of hydrated calcium hypochlorite (UN 2880)

Bei der Zersetzung des Produkts werden Chlorgas und Sauerstoff freigesetzt. Neben seinen Eigenschaften als starkes Oxidationsmittel gehen viele organische Substanzen wie Öle, Fette und Lösungsmittel bei Kontakt mit der Chemikalie in Flammen auf.

4.2.1 Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur, bei der sich ein Stoff gefährlich zu zersetzen beginnt, wird als kritische Umgebungstemperatur (Critical Ambient Temperature, CAT) bezeichnet. Dabei handelt es sich um die niedrigste Umgebungstemperatur für eine zu untersuchende Probengröße, oberhalb derer sich die normalerweise langsam verlaufende Reaktion sich zu einer schnell verlaufenden Reaktion beschleunigt (Thermal Runaway).

Die kritische Umgebungstemperatur für den Transport von Calciumhypochlorit wurde von Prof. Gray in einem 20' Container ohne effiziente Belüftung ermittelt:

Tabelle 1: Kritische Temperatur nach Verpackung

Gebinde	Temperatur
Kunststofffass (40 kg Nettogewicht)	37°C
Fass, Pappe (200 kg Nettogewicht)	30°C

Die kritische Umgebungstemperatur kann zum einen durch die Lufttemperatur erreicht werden, andererseits sind ebenfalls Einflussgrößen wie Sonneneinstrahlung oder Wärmequellen an Bord (Bunkertanks) zu berücksichtigen. Die folgende Tabelle⁵¹ zeigt die längerfristig gemessenen durchschnittlichen Temperaturen auf Schiffen in Abhängigkeit zum Gebiet. Die Werte berücksichtigen Änderungen der Lufttemperatur zwischen Tag und Nacht sowie höhere Temperaturen, die in Häfen oder der Nähe von Ladmassen gemessen wurden. Somit können diese Temperaturen auch über einen längeren Zeitraum auftreten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Daten mittlerweile ca. 50 Jahre alt sind und sich die klimatischen Bedingungen, in der Zwischenzeit, in weiten Teilen der Erde verändert haben. Ebenfalls mag die kontinuierliche Entwicklung der Containerschifffahrt zu größeren Schiffen Einflüsse auf die Temperatur im Laderaum haben.

⁵¹ P C Bowes, "High Mean Temperatures in Ships Holds", The Marine Observer, 1968, 68, 17

Tabelle 2: Ausgewählte durchschnittliche Temperaturen

Gebiet	Max. Lufttemperatur in °C	Max. Temperatur im Laderaum in °C
Persischer Golf	38	48
Rotes Meer	35	45
Westküste Afrika	29	39
Karibische See und Panama	32	42

Die in der Tabelle genannten Temperaturen weisen darauf hin, dass sich die vorherrschenden Temperaturen auf bestimmten Reisen (Fahrgebieten) der kritischen Umgebungstemperatur für Calciumhypochlorit annähern oder überschreiten. Generell ist die Dauer der Exposition der Ladung gegenüber solchen Temperaturen begrenzt, jedoch kann es im Verlauf einer Reise Verzögerungen kommen, sodass Schiff und Ladung der Exposition über einen längeren Zeitraum ausgesetzt sind.

4.3 Lithium-Ionenbatterien

Lithium-Ionenbatterien werden heutzutage in immer mehr Produkten eingesetzt, sodass es über die vergangenen Jahre zu einem Anstieg der Produktion, gerade im Bereich des Automobilsektors, und des Transports gekommen ist.

Der Transport und Betrieb von Lithium-Ionenbatterien beinhaltet grundsätzlich das Risiko, dass die Bestandteile der Batterie alle für eine Verbrennung notwendigen Stoffe bereitstellt, weshalb sie als Gefahrstoff nach IMDG Class 2.9.4 geführt werden.⁵² Sofern die thermische und elektrochemische Stabilität der Zellkomponenten nicht mehr gewährleistet ist, verlässt die Batterie den betriebssicheren Zustand. Die Überführung in diesen Zustand kann folgende Ursachen haben:

- Internen oder externer Kurzschluss
- Über- oder Tiefenentladung
- Thermische Ursachen (zu hohe oder zu niedrige Temperaturen)

Ausschlaggebend für den sicheren Betriebszustand ist die Integrität des Separators, der die Anode von der Kathode trennt. Durch z.B. unsachgemäßen Transport bei dem beladen oder

⁵² ⁵² International Maritime Code for Dangerous Goods, IMO, London 2018

durch extreme Schiffsbewegungen besteht die Gefahr mechanischer Einwirkungen auf die Batterie. Durch Stauchen, Quetschen oder Erschütterungen kann es zur teilweisen oder kompletten Zerstörung der Zellschichtung kommen, sodass ein Kurzschluss die Folge ist.

Ähnlich wie bei Calciumhypochlorit führt die eintretende chemische Reaktion zu einem Anstieg der Zelltemperatur. Kann der ansteigenden Zelltemperatur nicht durch eine ausreichende Wärmeabfuhr begegnet werden, führt dies letztendlich zum thermischen Durchgehen.

4.4 Begriffsdefinition thermisches Durchgehen

Als thermisches Durchgehen wird ein Prozess bezeichnet, bei dem exotherme chemische Reaktionen zu einer ansteigenden Temperatur führen, die einen weiteren Temperaturanstieg bedingt. Dieser sich verstärkende Wärme produzierende Prozess mündet oftmals in einem Brand oder einer Explosion.⁵³

⁵³ Internetseite Universität Stuttgart, Stand: 30.09.2020

5. Versuche

5.1 Zielsetzung der Versuche

Das Hauptanliegen für die Versuchsreihe bestand darin, das thermische Verhalten im Container, in Kombination mit dem Einbringen von Hochdruckwassernebel, zu untersuchen. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob das Einbringen von Wassernebel in Seecontainern zu einer Kühlung und damit verbunden zu einer Kontrolle der Situation (Vermeidung des thermischen Durchgehens) bei z.B. Calciumhypochlorit führt.

Die experimentell gewonnenen Ergebnisse sollen die Basis für Empfehlungen/Maßnahmen bei dem Transport von Calciumhypochlorit bilden.

Ableiten/überprüfen von

- Organisatorische Maßnahmen
- Anlagentechnische Maßnahmen
- Abwehrenden Maßnahmen

5.2 Versuchsnomenklatur

Für die Durchführung der Versuche, bei der Firma Friedrich Tiemann GmbH & Co. KG, stand ein 40 Fuß-Standardseecontainer zu Verfügung. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen lagen zum einen in der unterschiedlichen Positionierung der Heizquelle (Tür, Mitte, hinten) sowie bei der Beladung. In den Versuchen 1-3 wurde versucht, die Beladung des Containers einer ausschließlichen Beladung mit Calciumhypochlorit nachzuempfinden. Grundsätzlich ist hierfür die Empfehlung der IMO, dass maximal 14 Tonnen Calciumhypochlorit pro Container geladen werden dürfen.⁵⁴ Aufgrund der Dichte von Calciumhypochlorit ($2,35 \text{ g/cm}^3$)⁵⁵ ist im Seeverkehr mit einer maximal halbhohen Beladung eines 40' Seecontainers auszugehen, sofern keine Mischbeladung des Containers erfolgt.

⁵⁴ CINS, Guidelines for the Carriage of Calcium Hypochlorite in Containers, Chapter 2

⁵⁵ Richard P. Pohanish, Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens, Page: 620

Bei den Versuchen 4 und 5 wurde von einer Mischbeladung ausgegangen, die in der Realität häufig anzutreffen ist. Die Dummy-Ladung wurde dazu partiell bis unter das Containerdach gestaut. Da bei Mischbeladungen die maximale Zuladung, in Abhängigkeit des Transportguts, von 26,7 Tonnen eines 40´Containers⁵⁶ oftmals nicht erreicht wird.

Der Container wurde vor Versuchsbeginn mit Thermoelementen ausgestattet, die während der Versuche die Temperaturen über eine definierte Zeit, in verschiedenen Höhen und Bereichen des Containers aufzeichnen.

Zur Simulation eines sich aufheizenden Calciumhypochlorits-Gebindes werden je Versuch, an verschiedenen Positionen im Container, Heizplatten aufgestellt. Die exakte Positionierung der Wärmequellen kann der Abbildung 17 im Kapitel 5.4 entnommen werden.

Wenn die thermischen Auswirkungen der Heizquelle innerhalb des Containers abgeschätzt werden können, wird im kommenden Schritt experimentell überprüft, welchen Einfluss Hochdruckwassernebel auf die Temperaturverteilung innerhalb des Containers hat. Um ein Ausbreiten des Wassernebels im Container zu gewährleisten, erfolgt die Beladung in allen Versuchen nicht komplett bis zur Decke.

Tabelle 3: Versuchsnomenklatur

Versuch	Position Heizquelle	Beladung/Sprühbeeinträchtigungen
1	Tür	Keine
2	Mitte	Keine
3	Hinten	Keine
4	Hinten	Vorhanden
5	Mitte	Vorhanden

5.3 Versuchsaufbau

5.3.1 Verwendete Seecontainer

Im Seeverkehr werden standardmäßig 20´- oder 40´-Container eingesetzt, wobei sich diese Bezeichnung auf die Länge der Container bezieht. Die ISO-668 (4) ist die aktuell gültige Norm für Container, welche unter anderem die Abmessungen regelt.

⁵⁶ ISO 668(4) Series 1 freight containers; classification, dimensions and ratings, 1995

Die charakteristischen Daten, sowohl von einem 20' als auch von einem 40'-Containern sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.⁵⁷

Tabelle 4: Abmessungen Container

Container		20'	40'
Außenmaß	Länge	6,058 m	12,192 m
	Breite	2,438 m	2,438 m
	Höhe	2,591 m	2,591 m
	Fläche	14,9 m ²	29,7 m ²
Innenmaß	Länge	5,898 m	12,032 m
	Breite	2,352 m	2,352 m
	Höhe	2,385 m	2,385 m
	Fläche	13,9 m ²	28,4 m ²
	Volumen	33,1 m ³	67,7 m ³
	Volumen	33,1 m ³	67,7 m ³
Türöffnung	mind. Breite	2,286 m	2,286 m
	mind. Höhe	2,261 m	2,261 m

Tabelle 5: Materialstärke Container

Materialstärken der Container [mm]		
Bauteil	Material	Stärke/Gewicht
Türen	gesickter Stahl	1,5 mm
Seitenwände	gesickter Stahl	1,5 mm
Frontwand	gesickter Stahl	1,5 mm
Dach	gesickter Stahl	2,0 mm
Boden	Hartholz	28,0 mm

⁵⁷ ISO 668(4)

Der Holzboden besteht bei den verwendeten Containern aus 28mm dicken Hartholzspanplatten, die zusätzlich über eine feuchte beständige Versiegelung verfügen. Diese wird auf der Unterseite der Böden aufgebracht und i. d. R. wird hierzu ein Bitumenanstrich verwendet. Weiterhin verlaufen aus Gründen der Stabilität unterhalb des Bodens Doppel-T-Stahlträger. Die Container-türen verfügen über eine umlaufende Doppellippendichtung.

Zum Einbringen des Hochdruckwassernebels wurde im oberen Drittel der linken Containertür eine 14 x 15 cm große Öffnung geschaffen. Während der Aufheizphasen wurde die Öffnung mittels eines Stahlpatches verschlossen.

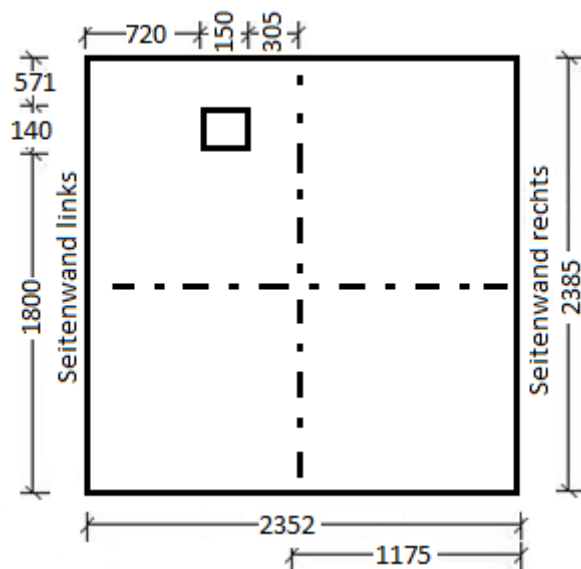


Abbildung 8: Öffnung zum Einbringen von Hochdruckwassernebel

Bei dem in den Versuchen und in der Brandsimulation verwendeten Container handelt es sich um 40'-Standardcontainer.

Die Auswahl von einem 40' gegenüber 20'-Container erfolgte aufgrund folgender Annahmen:

- Kommt es grundsätzlich zu einem Brandereignis in einem 40'-Container, ist von einer höheren Wärmefreisetzungsrate (HRR) im Vergleich zu dem 20'-Container auszugehen. Dies beruht in erster Linie auf dem doppelt so großen Luftvolumen, vorausgesetzt das Ladegut und die Stauung ist vergleichbar. Nachdem der vorhandene Sauerstoff aufgebraucht wurde, ist davon auszugehen, dass sich der Brandverlauf bei vergleichbaren Ventilationsbedingungen angleicht.

- Bei dem Transport von Calciumhypochlorit sind die Ventilationsbedingungen sowie das vorhandene Luftvolumen im Container sekundär, da es sich um einen oxidierend wirkenden Stoff handelt, der bei seiner Reaktion Sauerstoff freisetzt. Entscheidend für die Auswahl eines 40'-Containers ist die Fragestellung, inwiefern Hochdruckwassernebel zu einem Kühleffekt in allen Bereichen des Containerinneren führt und wie sich eventuelle Sprühbeeinträchtigungen auswirken.

5.3.2 Wärmequelle

Ziel der Versuche ist es, den Einfluss von Hochdruckwassernebel auf die Temperatur im Container zu untersuchen, sodass die auszuwählende Wärmequelle über eine gute Reproduzierbarkeit verfügen sollte. Grundsätzlich bieten sich hierfür Wärmequellen an, die über eine geregelte Energie-/Brennstoffzufuhr verfügen.

Für die Versuche wurden Heizplatten mit einer maximalen Leistung von 2000 Watt je Platte ausgesucht. Die Wahl einer elektrischen Heizplatte ermöglicht reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich des Aufheizverhaltens und setzt im Gegensatz zu einem Gasbrenner keine Brandprodukte frei.

Für die Versuche wurden vier Heizplatten mit einer durchschnittlichen Leistungsabgabe von 1500 Watt (6000 Watt insgesamt) in den Container eingebracht.



Abbildung 9: Heizplatte

5.3.3 Vorhandene Lüftungsöffnungen

Die Öffnungsgröße der Lüftungsöffnungen beschränkte sich bei allen Versuchen auf die werkseitig vorhandenen Lüftungsöffnungen. Bei dem verwendeten 40´Seecontainer sind vier Belüftungsöffnungen vorhanden. Diese bestehen aus jeweils 9 Bohrungen à 12 mm (Öffnungsfläche je Belüftungsöffnung: 0,001 m²), die von einem Witterungsschutz aus Kunststoff umgeben sind.



Abbildung 10: Lüftungsöffnung

5.3.4 Verwendete Messtechnik

Bei den Versuchen wurden die im Containerinneren aufgetretenen Temperaturen mittels Thermoelements gemessen.

Dazu standen von der Bergischen Universität Wuppertal Thermoelemente sowie zwei Datataker DT-85 Multi-Datenloggern zur Aufzeichnung der Messwerte zur Verfügung. Alle fünf Sekunden wurden die mittels Thermoelementen gemessenen Temperaturen gespeichert.

Als Messelemente kamen Mantel-Thermoelemente aus NiCr - Ni Typ K zum Einsatz. Diese bestehen aus einer biegsamen dünnwandigen Mantelleitung, worin die Thermodrähte in gepresstem feuerfestem Magnesiumoxid eingebettet sind. Der gute Wärmeübergang zwischen Mantel und Thermopaar ermöglicht kurze Ansprechzeiten und hohe Messgenauigkeit.

Die exakten Messstellen der Thermoelemente sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

- T1 – T5 Thermoelemente entlang der linken Containerwand, Messpunkt ca. 1,50 m hoch
- T6- T8 „Messbaum“

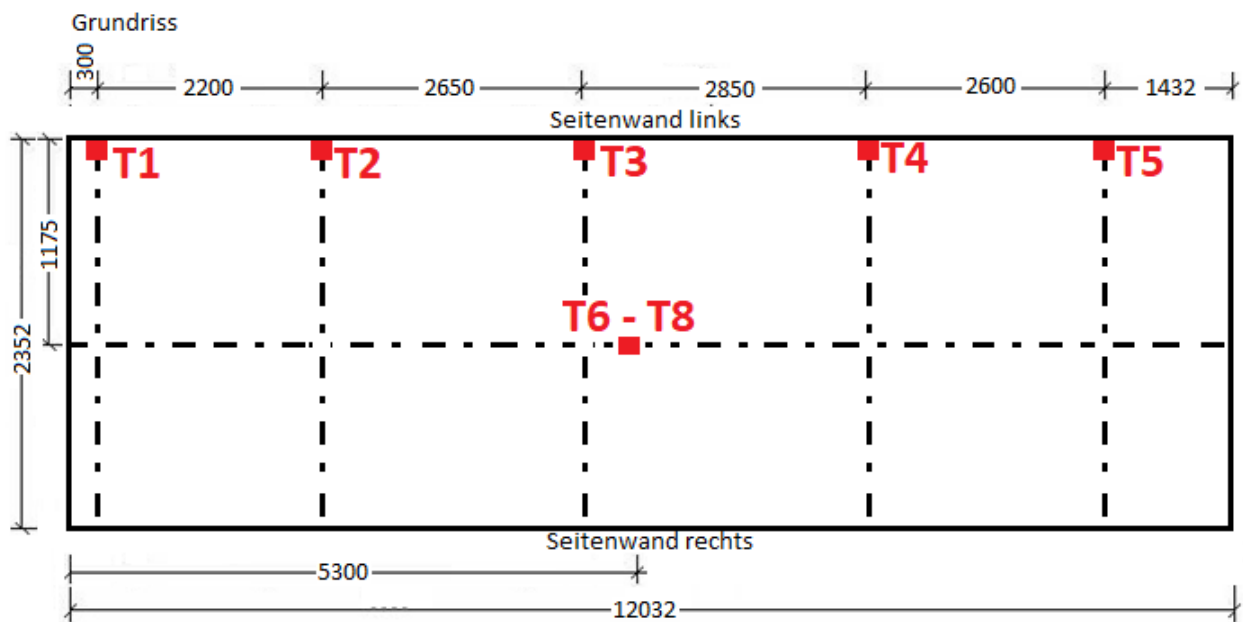


Abbildung 11: Anordnung Messtechnik Grundriss

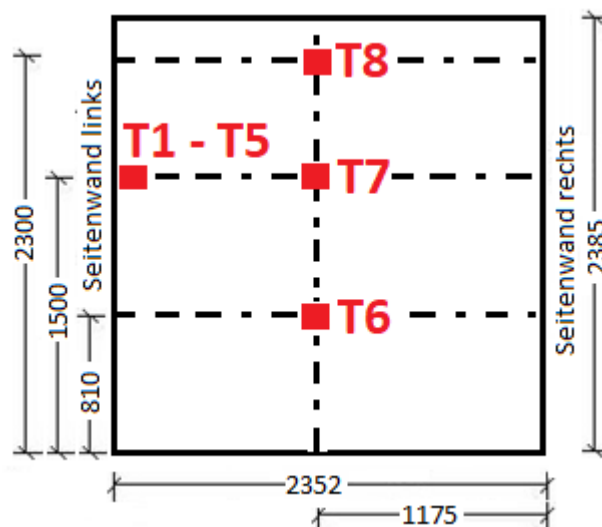


Abbildung 12: Anordnung Messtechnik, Schnitt

5.3.5 Verwendete Löschtechnik

Die bei den Versuchen zum Einsatz kommende Löschtechnik bestand aus einem Pritschenfahrzeug, das die Basis bildete. Das Fahrzeug verfügte über einen Wassertank sowie ein Pumpenaggregat, welches gegenüber herkömmlichen Pumpenaggregaten Drücke von 80-200 Bar zur Erzeugung des Wassernebels aufbaut. Die hohen Drücke werden zur Erzeugung eines feinen Nebels und der anschließenden Beschleunigung der Tröpfchen benötigt. Im Endeffekt vergrößert sich durch diesen Prozess die Gesamtoberfläche des Wassers, sodass es schneller Wärme aufnimmt und verdampft. Der damit einhergehende Kühl- und Stickeffekt ermöglicht eine besonders wirkungsvolle Brandbekämpfung bei reduziertem Löschwassereinsatz.

Für die Kühlversuche kamen drei verschiedene Düsen in der nachstehenden Reihenfolge zum Einsatz:

1. FOGGUN ■ l/min
2. 1. Löschdüse ■ l/min
3. 2. Löschdüse ■ l/min

Die Düsen variieren neben dem Volumenstrom vor allem im Bereich der Düsenauslässe, die für das Sprühbild/Sprühwinkel und Tropfenspektrum verantwortlich sind.



Abbildung 13: FOGGUN und Sprühbild



Abbildung 14: 1. Löschdüse und Sprühbild



Abbildung 15: 2. Löschdüse und Sprühbild



5.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in der Zeit von 06.08.2020 bis zum 07.08.2020 bei der Firma Friedrich Tiemann in Bremerhaven durchgeführt. Die folgende Abbildung vermittelt einen Eindruck über den Versuchsaufbau und der -umgebung.



Abbildung 16: Versuchsaufbau

Die Temperatur lag an den beiden Versuchstagen jeweils zwischen mindestens 17,5 °C am Morgen und stieg im Tagesverlauf auf maximal 31,0 °C an. An beiden Tagen herrschte eine Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel.

Die Versuche 1-3 wurden am ersten Tag durchgeführt, wobei hier zunächst die Positionierung des Containers zu erwähnen ist. Dieser stand nicht wie in Abbildung 14 zu erkennen ist komplett unter einem Dach, sondern ca. hälftig in der Sonne. Um den Aufheizeffekt durch die Sonnenstrahlung im Container möglichst gering zu halten, wurde die Containerhaut dauerhaft im beschienenen Bereich mit Wasser gekühlt.

Am zweiten Versuchstag wurde der Container für die Versuche 4 und 5 versetzt, sodass er keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt war und dementsprechend keine Wasserkühlung zum Einsatz kam.

Die bei den Versuchen verwendete Dummy-Ladung hatte nicht zum Ziel, die Eigenschaften bzw. die Transportgebinde von Calciumhypochlorit möglichst genau abzubilden. Primär ging es um die folgenden Punkte:

- Volumen des Containers auszufüllen
- Untersuchung/Ausbreitung des Hochdruckwassernebels
- Einflüsse von Verschattungen

Wie bereits im Kapitel 5.2 erwähnt, wurde bei den Versuchen 1-3 von einer reinen Gefahrgutbeladung mit Calciumhypochlorit ausgegangen. Den folgenden Abbildungen ist die exakte Beladung des Containers bei den Versuchen 1-3 zu entnehmen. Des Weiteren ist bei der Draufsicht jeder Gegenstand mit einer Nummer gekennzeichnet, die den jeweiligen Gegenstand im Anhang A zu zuordnen ist. Dort finden sich ergänzende Experimentaldaten zur Dummy-Ladung.

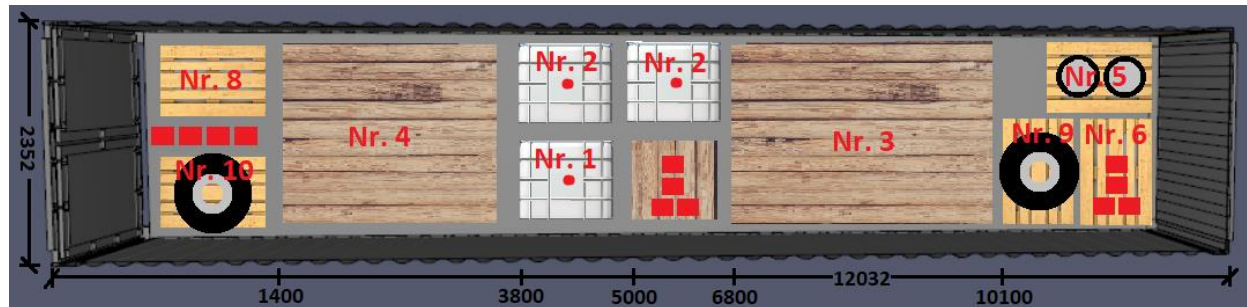


Abbildung 17: Stauung Versuch 1-3, Draufsicht



Abbildung 18: Stauung Versuch 1-3, Seitenansicht

Die Position der Wärmequelle ist in der folgenden Abbildung in Form von vier roten Quadraten markiert. Die Wärmequelle ist bei Versuch 1 in der Nähe der Tür positioniert und wandert im Folgenden weiter nach hinten. Die jeweilige exakte Position ist der Abbildung 17 zu entnehmen.

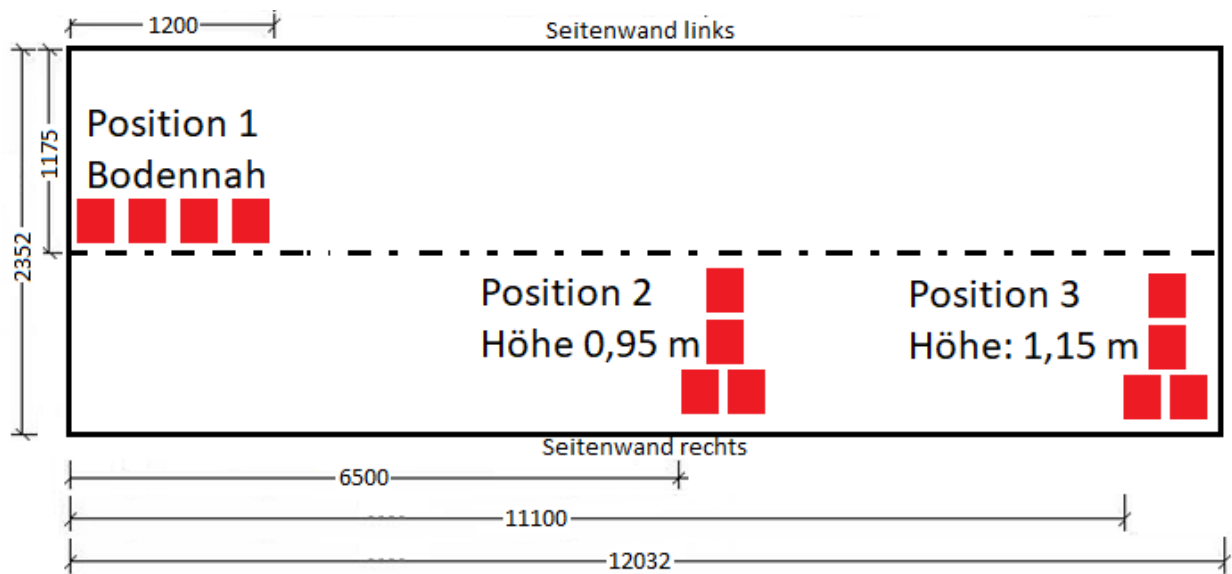


Abbildung 19: Positionierung Wärmequellen

Für die Versuche 4 und 5 wurde von einer Mischbelastung und daraus resultierenden Sprühbeeinträchtigungen ausgegangen. Hierfür wurde ein konservatives Szenario gewählt, bei dem das Hindernis/Sprühbeeinträchtigung sehr nah an der Containertür positioniert wurde (siehe Abbildung 19). Dieser Umstand beschränkt die Ausbreitung des Hochdruckwassernebels im Container. Generell bieten im Regelfall nur die Tür- oder Rückseite des Containers mögliche Angriffspunkte für Löschversuche, da die Seiten meistens nicht zugänglich sind.

Bei den Versuchen mit Sprühbeeinträchtigung wurde davon abgesehen, einen weiteren Versuch durchzuführen, bei dem die Wärmequelle vor der Sprühbeeinträchtigung steht. Sofern die Wärmequelle vor dem Wirkungsbereich der Sprühbeeinträchtigung platziert wird, ist mit einem ungehinderten Ausbreiten des Hochdruckwassernebels und guten Kühleffekten für diesen Bereich zu rechnen. Dies bestätigen auch die Ergebnisse aus den Versuchen 4 und 5, bei denen ein guter Kühleffekt in dem Bereich (Thermoelement 1) erkennbar ist.

Die Nachstehende Abbildung verdeutlicht die Stauung für die Versuche 4 und 5 sowie die Positionierung der Wärmequelle im mittleren und hinteren Bereich des Containers.

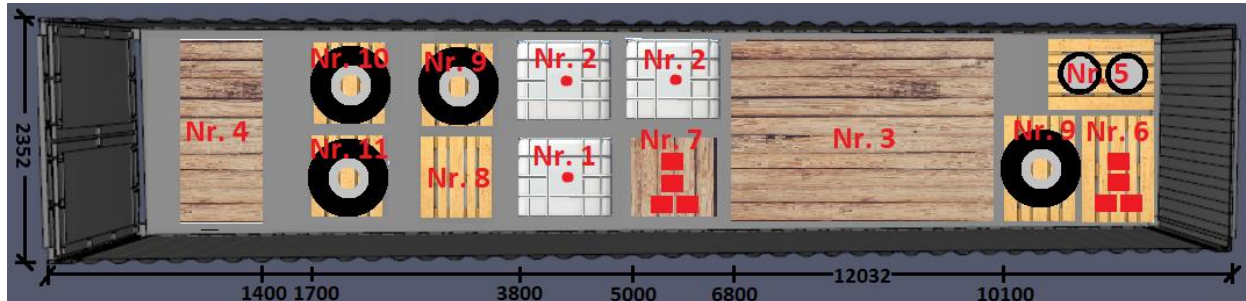


Abbildung 20: Stauung Versuch 4-5, Draufsicht



Abbildung 21: Stauung Versuch 4-5, Seitenansicht

5.5 Versuchsablauf

Der Ablauf der einzelnen Versuche verlief immer ähnlich. Zunächst erfolgte das Aufheizen des Containers mittels Heizplatten. Nachdem anhand der Temperaturmessung im Container ein stabiler Zustand erkennbar war, erfolgte das kurzzeitige Einbringen von Hochdruckwassernebel (ca. 1 s). Hierzu wurden die im Kapitel 5.3.6 verwendeten Düsen in der beschriebenen Reihenfolge verwendet.

6. Interpretation der Ergebnisse

Die Auswertung der experimentell ermittelten Messergebnisse erfolgt für die Temperatur über die Zeit. Das Aufheizen des Containers und das abschließende runterkühlen mittels Hochdruckwassernebels wird durch die Position der Wärmequelle, Sprühbeeinträchtigungen sowie der eingesetzten Löschdüsen beeinflusst.

6.1 Auswertung Versuch 1-3

Bei der Analyse der Messwerte fällt zunächst die deutliche Temperaturschichtung innerhalb des Containers bei den Versuchen auf, die durch die nachstehende Abbildung exemplarisch für die Versuche 2 und 3 gezeigt werden. Die Anordnung der Thermoelemente ist dem Kapitel 5.3.5 zu entnehmen.



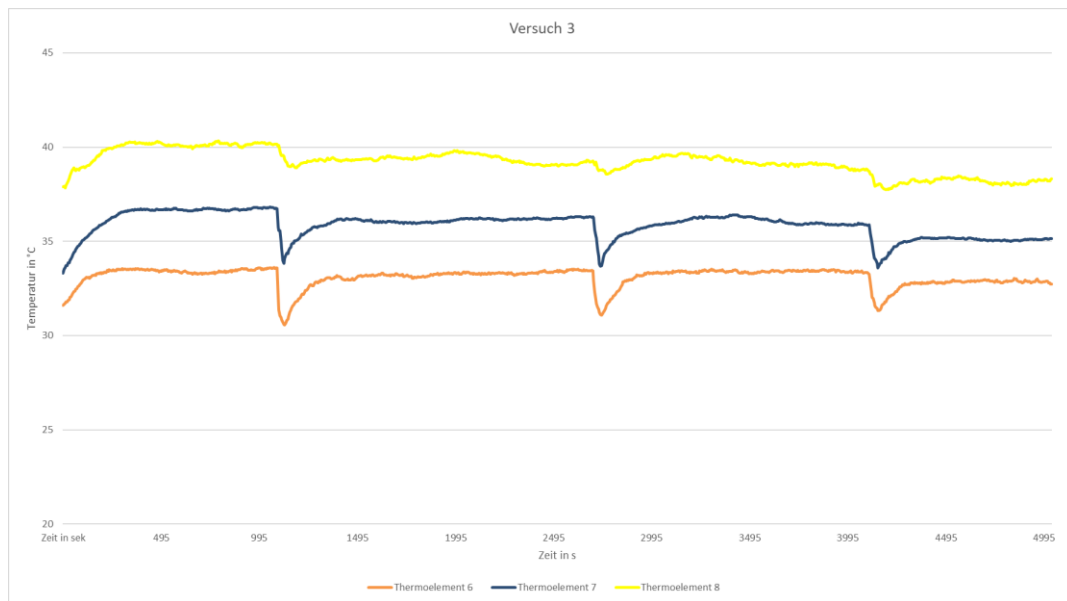


Abbildung 22:Temperaturschichtung Versuch 2 und 3

Bei allen Versuchen nimmt die Temperatur erwartungsgemäß mit der Höhe zu.

Neben der bereits deutlich ausgebildeten Temperaturschichtung lässt sich die Wirkung der Wasserkühlung bei allen drei Versuchen erkennen. Während bei den Versuchen 1 und 2 die Ausgangstemperaturen der Thermoelemente 1-5 noch nah (1,75 °C Versuch 1) bzw. sehr nah (0,81 °C Versuch 2) beieinander liegen, beträgt die maximale Differenz in Versuch 3 ca. 5,15 °C. Dies ist auf die zunehmende Sonneneinstrahlung im Verlauf der Versuche zurückzuführen. Die Wirkung der Sonneneinstrahlung konnte hierdurch für die Thermoelemente 4 und 5 insgesamt minimiert werden.

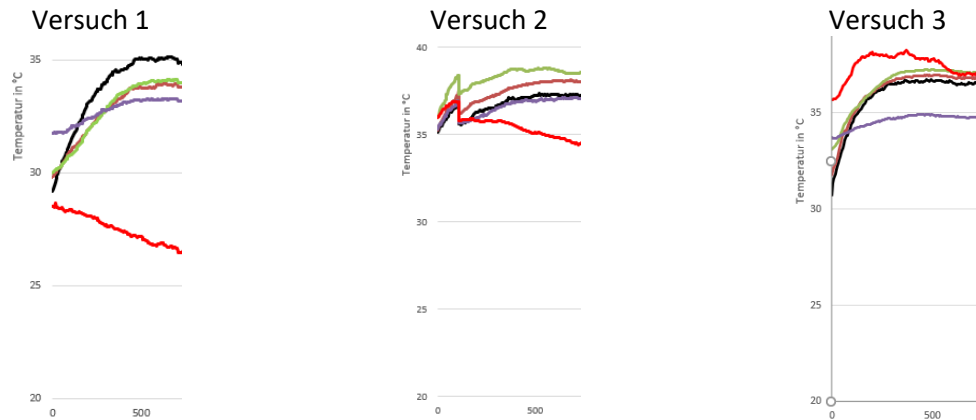


Abbildung 23: Einfluss Wasserkühlung

Die Abbildungen 21-23 zeigen die gemessenen Temperaturverläufe der Thermoelemente 1-8 über die Zeit.

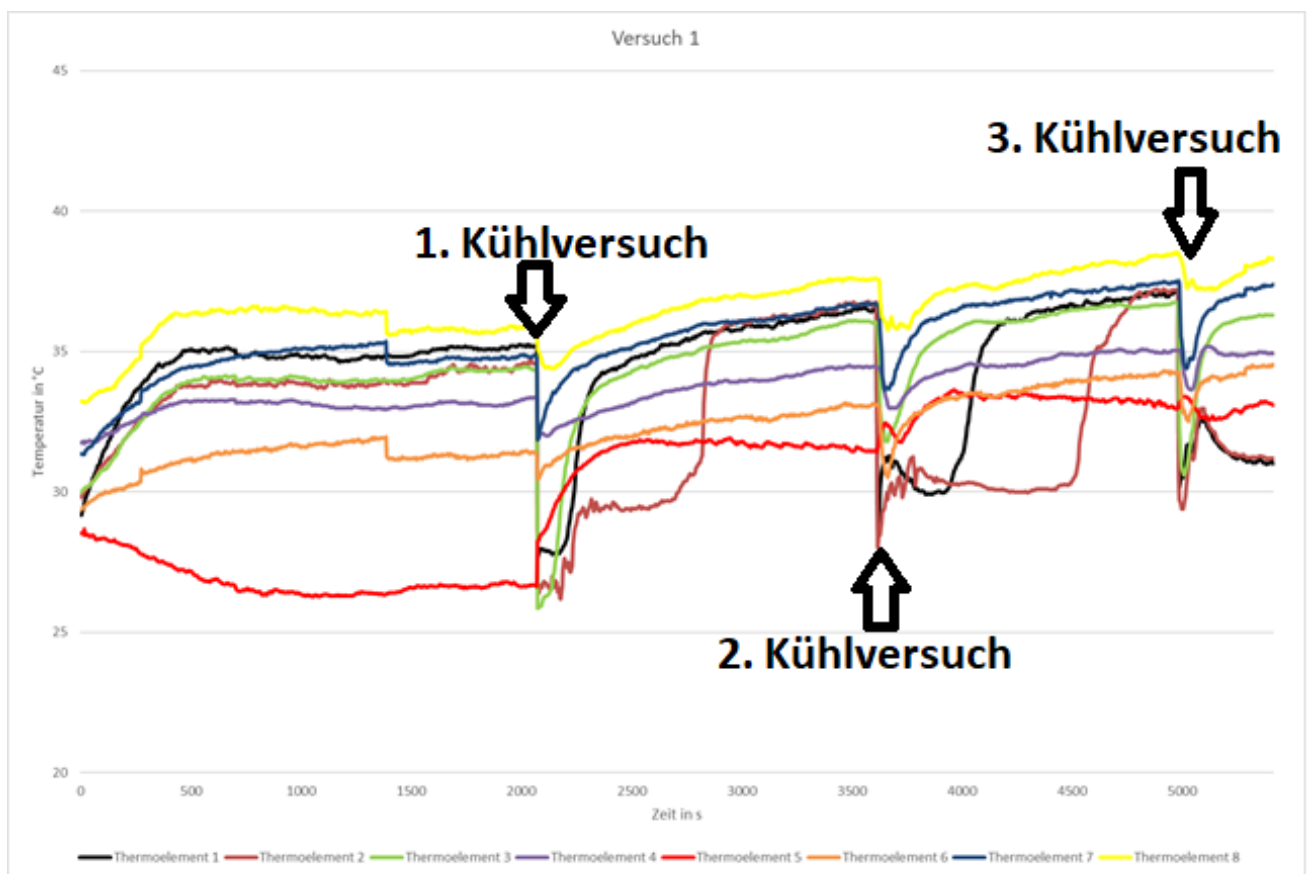


Abbildung 24: Temperaturverlauf Versuch 1

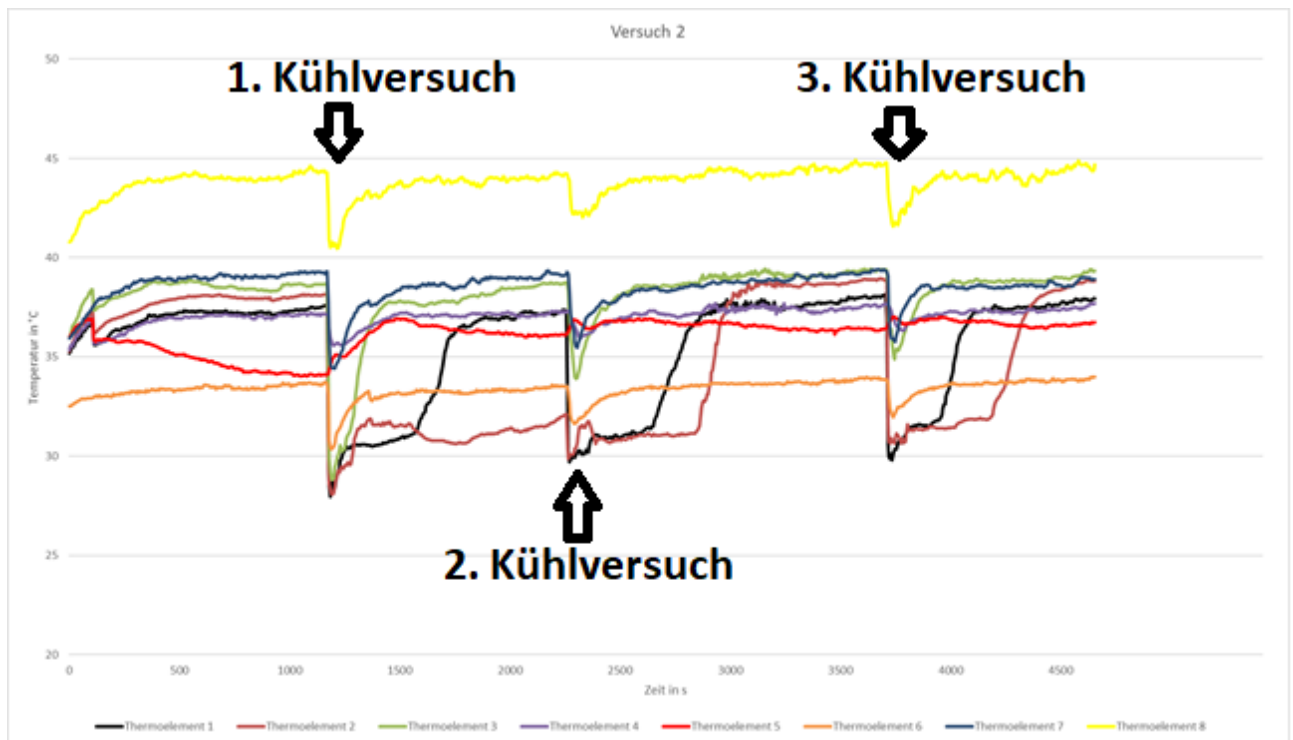


Abbildung 25: Temperaturverlauf Versuch 2

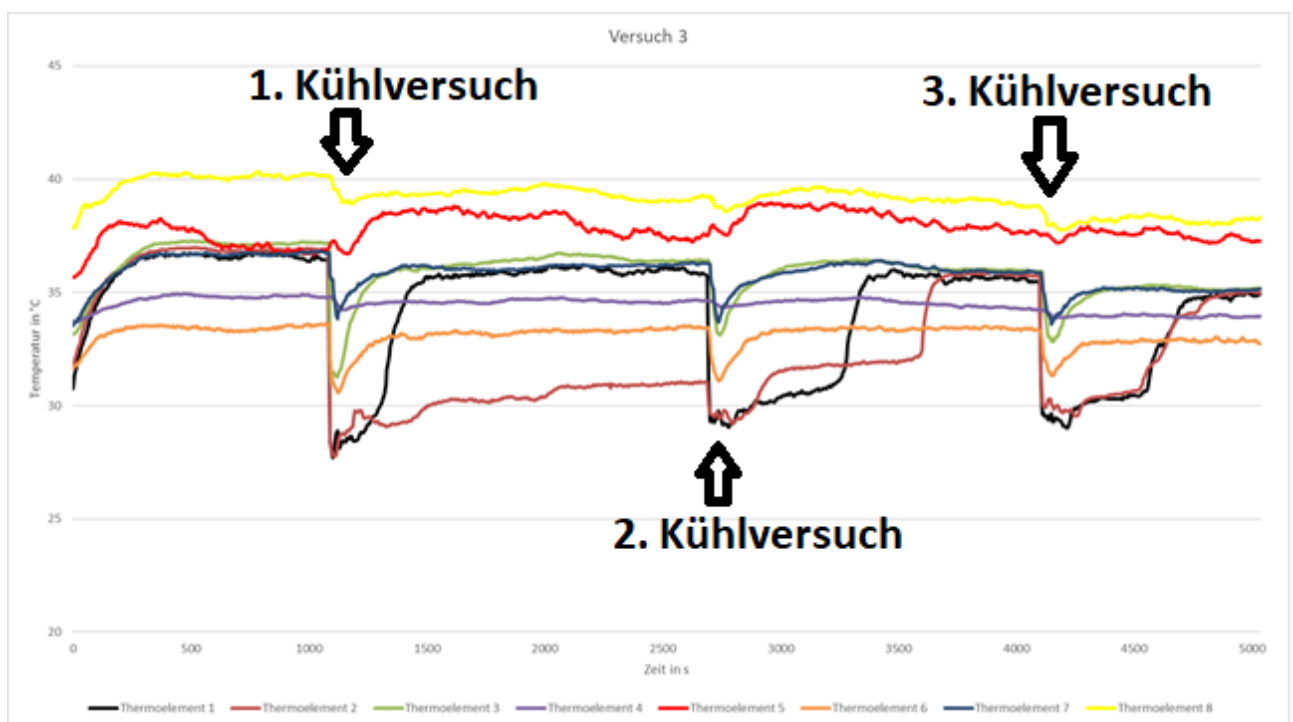


Abbildung 26: Temperaturverlauf Versuch 3

Die Temperaturverläufe zu Versuchsbeginn bis zum ersten Kühlversuch beschreiben den sich aufheizenden Containern. Die Zeitpunkte der Kühlversuche sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6: Zeitpunkte Kühlversuche

Versuch	Beginn	Ende	Kühlversuch	Uhrzeit	Löschdüse	Sprühbeeinträchtigung
1	13:08	14:40	1. Kühlversuch	13:43	FOGGUN	keine
			2. Kühlversuch	14:10	1. Löschdüse	
			3. Kühlversuch	14:32	2. Löschdüse	
2	15:00	16:20	1. Kühlversuch	15:21	FOGGUN	keine
			2. Kühlversuch	15:40	1. Löschdüse	
			3. Kühlversuch	16:03	2. Löschdüse	
3	16:40	18:04	1. Kühlversuch	16:58	FOGGUN	keine
			2. Kühlversuch	17:24	1. Löschdüse	
			3. Kühlversuch	17:48	2. Löschdüse	

Schon zu Beginn zeigt sich, dass die Thermoelemente generell in Abhängigkeit ihrer Positionierung zur Wärmequelle reagieren.

Da die Wärmequelle im Versuch 1 im Bereich der Tür positioniert wurde, ist dort mit dem größten Anstieg der Temperatur zu rechnen. Dies deckt sich mit den Graphen der Thermoelemente 1-4 in Abbildung 22 und erwartungsgemäß verlaufen die Anstiege der hinteren Thermoelemente weniger steil und langsamer.

Dieser erwartungsgemäße Verlauf lässt sich auch bei den Versuchen 2 und 3 erkennen, bei denen die Wärmequelle in der Mitte und am Ende des Containers platziert ist. Die jeweils höchste Dynamik verzeichnet das Thermoelement in der unmittelbaren Nähe.

Beachtenswert sind die Temperaturverläufe der Thermoelemente 6-8 im ersten Versuch. Bei den Messpunkten erfolgt nach 1385 Sekunden eine schlagartige Korrektur um 0,7-0,8°C.

Ebenso beachtenswert ist der Temperaturverlauf des Thermoelements 5 bei allen drei Versuchen. Zu Beginn des ersten Versuchs wurde noch eine Temperatur von 28,53 °C gemessen, nahm diese im Verlauf auf 26,62 °C ab. Die Abnahme der Temperatur an dem Messpunkt lässt sich mit der kontinuierlichen Kühlung der Containeraußenhaut begründen. Weiterhin verhindert die Dummy-Ladung eine ungehinderte Ausbreitung der Temperatur, indem die Zirkulation im Container beeinträchtigt/gestört wird.

Nach dem ersten Einbringen von Hochdruckwassernebel in den Container erfolgt ein sprunghafter Anstieg auf ca. 32 °C. Dieser lässt sich mit dem von außen eingebrachten Hochdruckwassernebel begründen, der zum einen zu einer Abkühlung im vorderen Bereich führt und zum anderen einen Impuls in den geschlossenen Container einbringt. Der Impuls führt dazu,

dass sich die Zirkulationsbedingungen kurzzeitig verändern und wärmere Luft aus dem vorderen in den hinteren Bereich des Containers gedrückt wird.

Der Effekt, dass der Kühlversuch zu einer Erhöhung der Temperatur im Bereich des Thermoelements 5 führt, lässt sich bei jedem Kühlversuch der Versuche 1-3 feststellen. Je größer die Distanz von Wärmequelle und Thermoelement ist, desto deutlicher ist der Effekt. Daneben ist die zum Einsatz kommende Düse entscheidend. Je größer der eingebrachte Impuls durch die abgegebene Wassermenge ist, desto größer ist der Temperaturanstieg am Messpunkt 5.

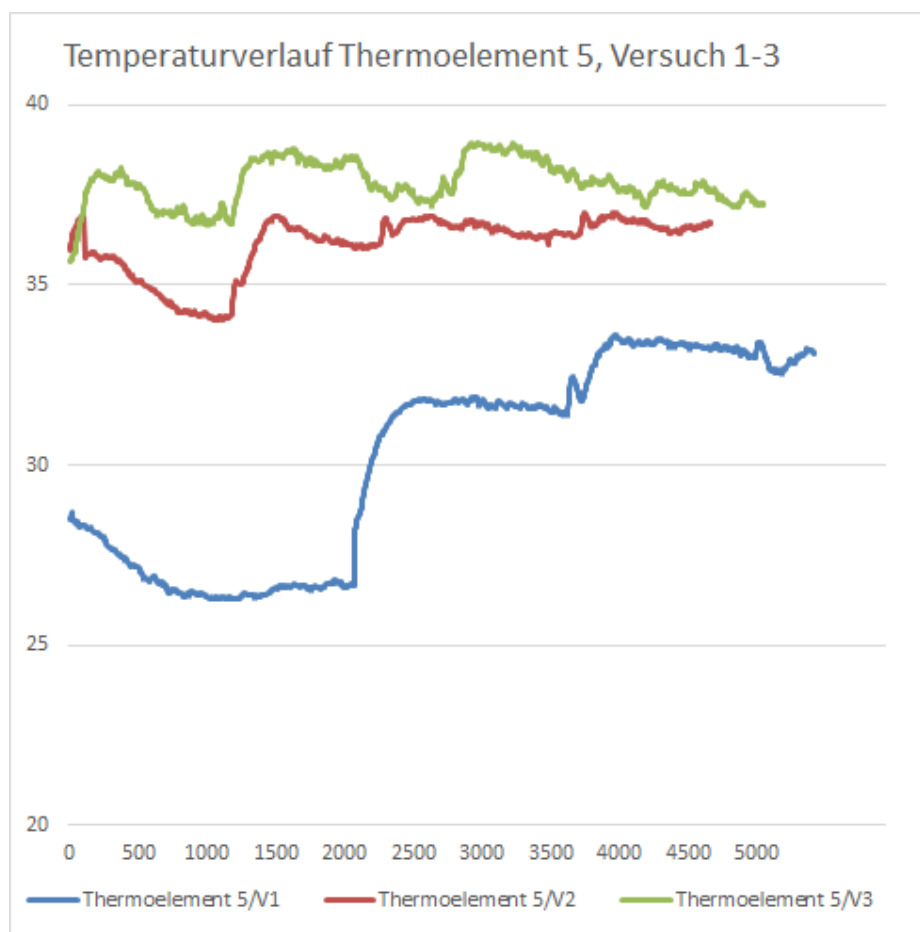


Abbildung 27: Vergleich Temperaturverlauf Thermoelement 5

Die Graphen der Thermoelemente 1 und 2 zeigen bei den drei Versuchen einen sehr ähnlichen Verlauf. Nach den Aufheizphasen folgt bis zum ersten Kühlversuch ein sehr kontinuierlicher Verlauf des Graphen. Anders als z.B. beim Thermoelement 3 erfolgt nach dem Kühlversuch kein v-förmiger Anstieg der Temperatur auf das Niveau vor der Kühlung. Kurzzeitig steigt die Temperatur moderat an, um dann zeitverzögert auf das ursprüngliche Temperaturniveau

anzusteigen. Besonders deutlich ist dies bei den Kühlversuchen 1 und 3 des zweiten Versuchs.

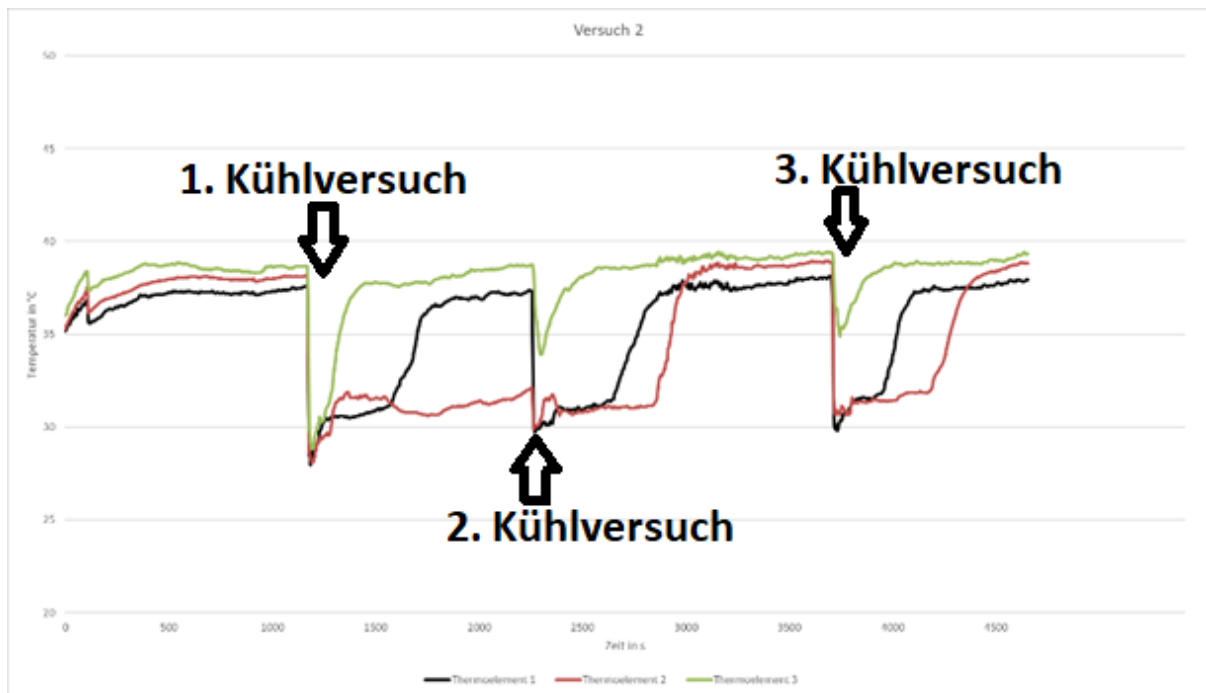


Abbildung 28: Darstellung Thermoelement 1-3, Versuch 2

Das zeitverzögerte reagieren der Thermoelemente in dem vorderen Bereich lässt sich mit dem direkten Kühleffekt und Tröpfchenbildung begründen.

Weiterhin fällt der Verlauf des Thermoelements 2 bei den Versuchen 2 und 3 auf. Nach dem ersten Kühlversuch erfolgt bis zum zweiten Kühlversuch kein nennenswerter Temperaturanstieg auf das Vorniveau. Dies lässt sich ebenfalls den Rückschluss auf Tröpfchenbildung durch den direkten Kühleffekt zu.

Betrachtet man die Messergebnisse, die der Graph 3 in Darstellung 26 abbildet, zeigt sich über die drei Kühlversuche ein kongruentes Verhalten. Nach der Kühlung erfolgt eine v-förmige Zunahme der Temperatur im Bereich der Messstelle auf das Ursprungsniveau.

Einen ähnlichen Verlauf weist der Graph 4 auf, wobei die Temperaturschwankungen wesentlich geringer sind. Während bei den Versuchen 1 und 2 noch deutliche Kühleffekte erkennbar sind, ist der Temperaturverlauf bei dem Versuch 3 nahezu konstant. Die geringfügigen Auswirkungen der Kühlversuche im Vergleich zum Graphen 3 begründen sich mit der Messstelle. Das Thermoelement befindet sich in einem Bereich, der durch Dummy-Ladung abgedeckt ist. Ohne diese Abschattung würde sich der Verlauf den Graphen 3 stärker ähneln, insbesondere im Hinblick auf die Ausprägtheit des Kühleffekts.

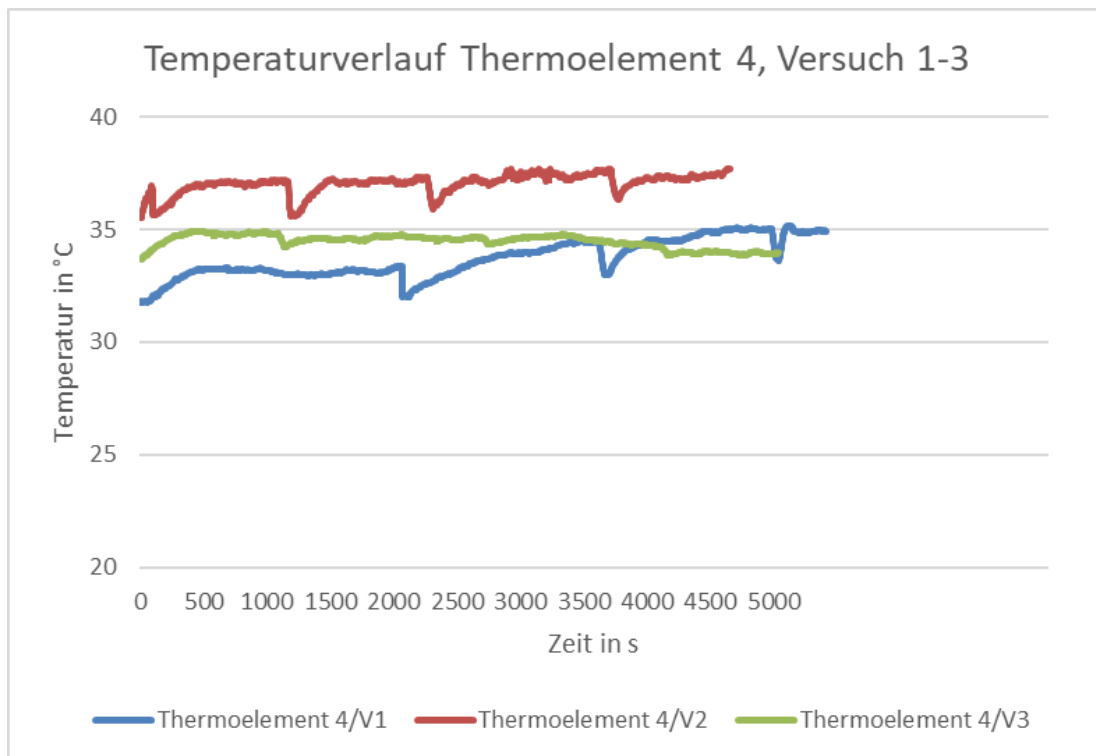


Abbildung 29: Vergleich Temperaturverlauf Thermoelement 4

Bei der Betrachtung des ersten Kühlversuchs ist erkennbar, dass der Kühleffekt erwartungsgemäß zunächst einmal von vorne nach hinten abnimmt. Bei exakter Auswertung der Messergebnisse ist festzustellen, dass der Kühleffekt vom 1. bis zum 3. Thermoelement geringfügig zunimmt.

Aufgrund des Sprühbilds und der Wurfweiten der jeweiligen Düsen sind teilweise die größten Kühleffekte im Bereich der Messstelle 2 festzustellen.

Tabelle 7: Temperaturdifferenz Versuch 1

Thermoelement	ΔT 1. Kühlversuch	ΔT 2. Kühlversuch	ΔT 3. Kühlversuch
1	7,6	8,32	6,98
2	8,06	8,72	7,82
3	8,46	4,25	6,17

Tabelle 8: Temperaturdifferenz Versuch 2

Thermoelement	ΔT 1. Kühlversuch	ΔT 2. Kühlversuch	ΔT 3. Kühlversuch
1	9,66	7,64	8,36
2	10,04	2,26	8,31
3	9,84	4,84	4,55

Tabelle 9: Temperaturdifferenz Versuch 3

Thermoelement	ΔT 1. Kühlversuch	ΔT 2. Kühlversuch	ΔT 3. Kühlversuch
1	8,78	6,72	6,12
2	9,16	1,54	5,91
3	6,21	3,29	3,12

6.2 Auswertung Versuch 4 und 5

Die Versuchsauswertung der Versuche 4 und 5 erfolgt separat, da die Beladung (Mischbeladung, Sprühbeeinträchtigung im Bereich der Containertür, vgl. Kapitel 5.4) im Vergleich zu den vorherigen Versuchen verändert wurde und der Container bei diesen Versuchen komplett unter dem Schauer, im Schatten steht. Weiterhin wurde ein weiteres Thermoelement im Außenbereich des Containers positioniert, dass die Umgebungstemperatur bei den Versuchen misst.

Bei der Analyse der Ergebnisse fällt, wie schon bei den Versuchen 1-3 die zu erwartende Temperaturschichtung innerhalb des Containers, auf. Die folgende Abbildung gibt dies für die Versuche 4 und 5 wieder.

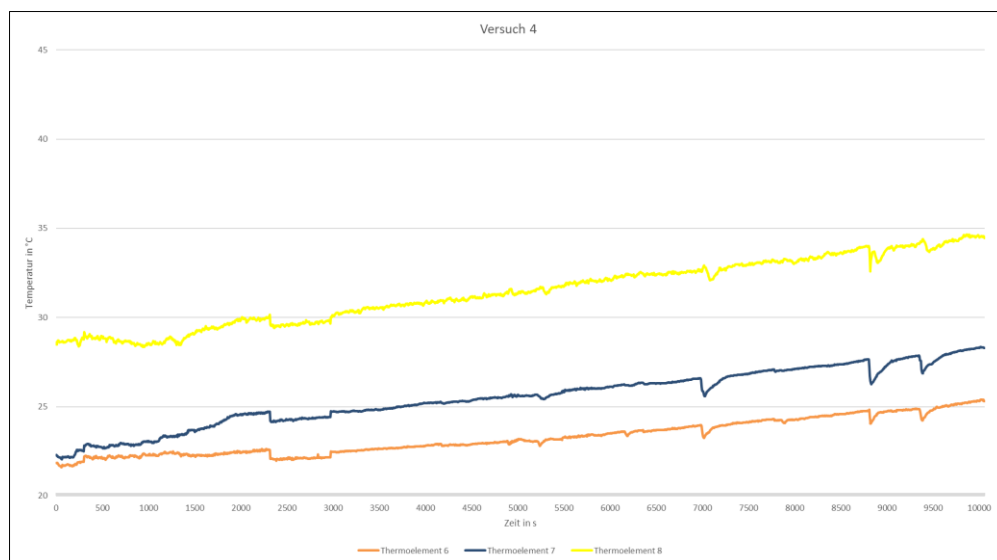
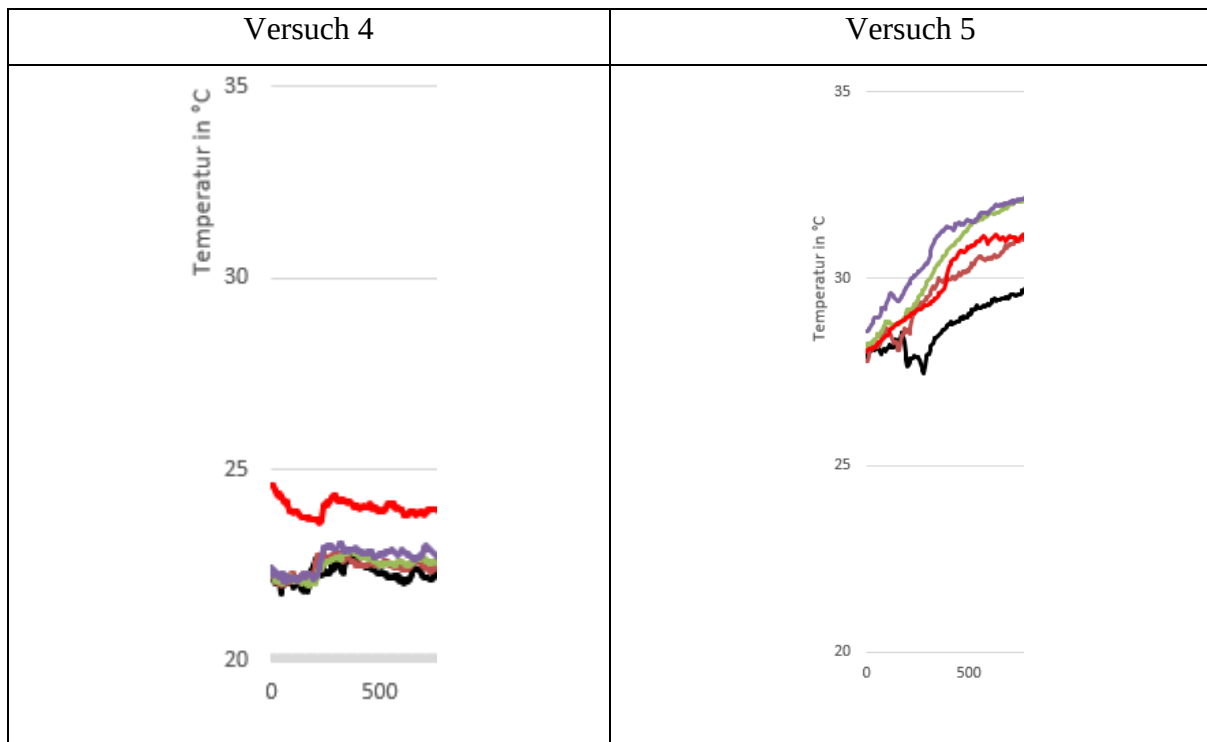




Abbildung 30: Temperaturschichtung Versuch 4 und 5

Die Notwendigkeit einer Wasserkühlung des Containers ergab sich bei den Versuchen 4 und 5 nicht, da der Container am Versuchstag komplett unter dem Schauer stand und keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt war. Die Wirksamkeit der Maßnahme spiegelt die homogene Temperaturverteilung zu Versuchsbeginn wieder. Einzig die Temperatur des Thermoelements 5 bei dem Versuch 4 liegt merklich über den der anderen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Container am Morgen des Versuchstags unter den Schauer gefahren wurde, so dass die aufgehende Sonne den hinteren Bereich des Containers schon leicht erwärmen konnte.

Tabelle 10: Ausgangstemperaturen Versuch 4 und 5, Ausschnitt



Wie bereits bei den vorherigen Versuchen (1-3) zeigen die folgenden Abbildungen den Temperaturverlauf der Thermoelemente 1-8 über die Zeit.

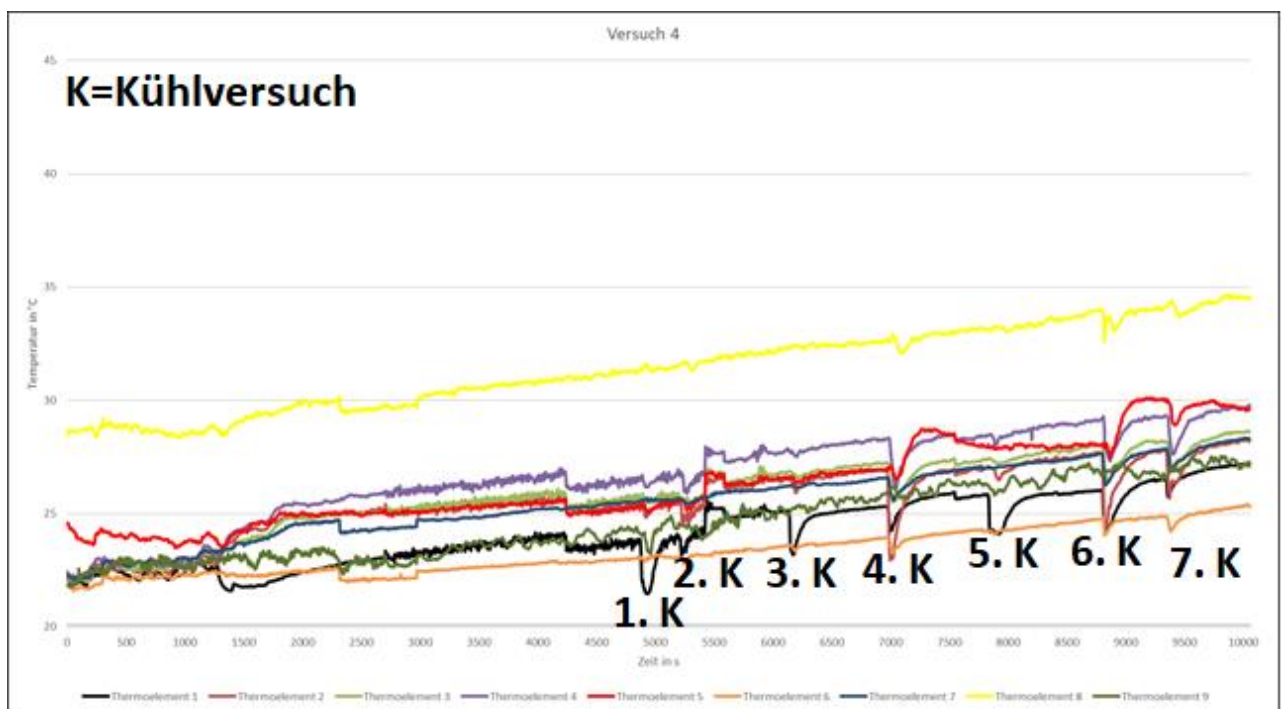


Abbildung 31: Temperaturverlauf Versuch 4

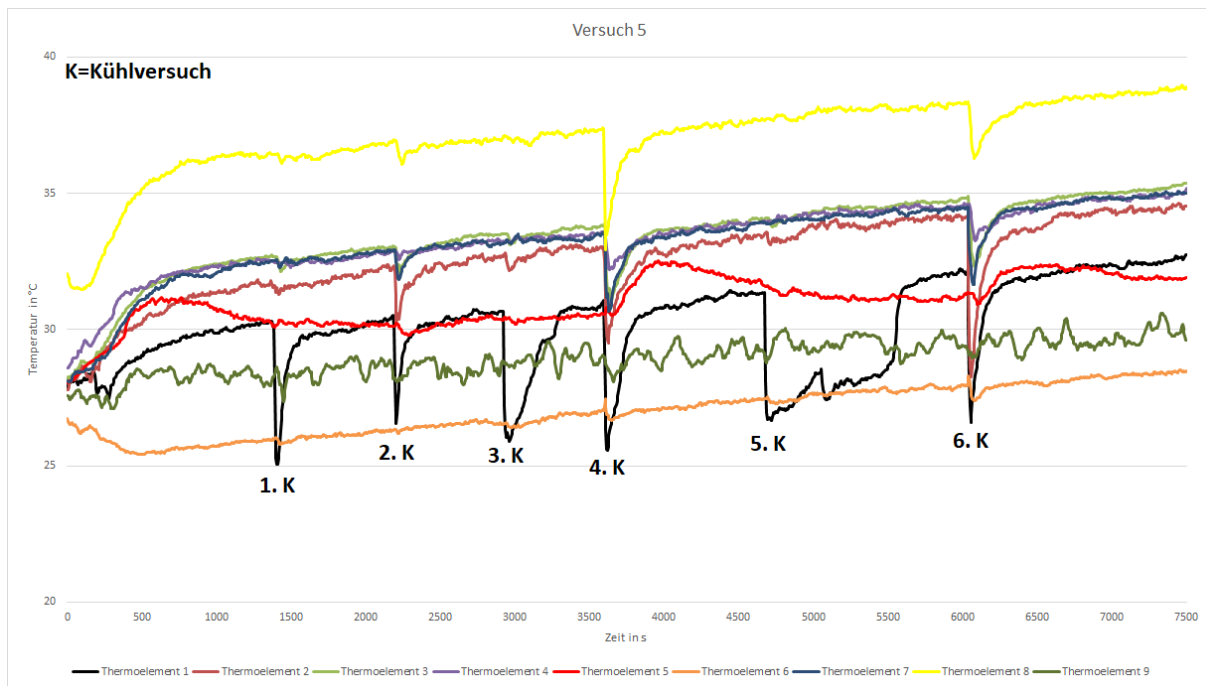


Abbildung 32: Temperaturverlauf Versuch 5

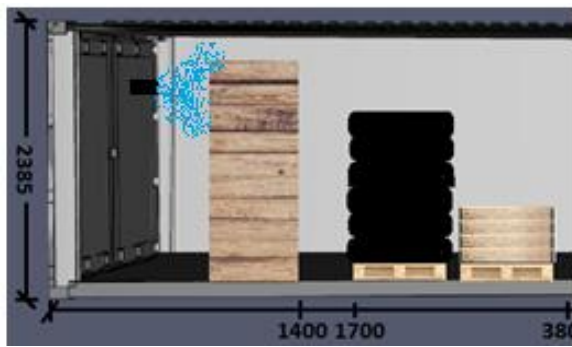
Die Temperaturverläufe beschreiben bei beiden Versuchen zunächst den sich aufheizenden Container bis zum Kühlversuch. Die jeweils größten thermischen Aktivitäten sind im Bereich der Wärmequelle zu verorten. Die Zeitpunkte der Kühlversuche sowie den Sprühwinkel können der nachstehenden Tabelle zu entnommen werden.

Tabelle 11: Zeitpunkte Kühlversuche

Versuch	Beginn	Ende	Kühlversuch	Uhrzeit	Löschdüse	Sprühbeeinträchtigung
4	08:50	11:40	1. Kühlversuch	10:13	FOGGUN	vorhanden, dagegen
				10:18	FOGGUN	vorhanden, darüber
			2. Kühlversuch	10:34	1. Löschdüse	vorhanden, dagegen
				10:48	1. Löschdüse	vorhanden, darüber
			3. Kühlversuch	11:02	2. Löschdüse	vorhanden, dagegen
				11:19	2. Löschdüse	vorhanden, darüber
5	11:50	13:54	4. Kühlversuch	11:27	FOGGUN	15 s Foggun darüber
			1. Kühlversuch	12:13	FOGGUN	vorhanden, dagegen
				12:26	FOGGUN	vorhanden, darüber
			2. Kühlversuch	12:38	1. Löschdüse	vorhanden, dagegen
				12:49	1. Löschdüse	vorhanden, darüber
			3. Kühlversuch	13:07	2. Löschdüse	vorhanden, dagegen
				13:30	2. Löschdüse	vorhanden, darüber

Die nachstehende Abbildung stellt exemplarisch eine Löschdüse und deren Ausrichtung dar, welche gegen und über die Sprühbeeinträchtigung gerichtet ist.

Löschdüse dagegen



Löschdüse darüber

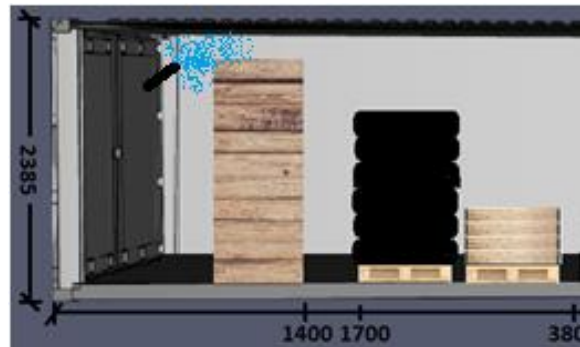


Abbildung 33: Darstellung Sprühbeeinträchtigung

Der erste Kühlversuch um 10:13 Uhr (ca. 4850 s.) zeigt, dass der Kühleffekt im Bereich des Thermoelements 1 verglichen zu den Thermoelementen 2-8 am größten ist. Ausschlaggebend hierfür ist die Position vor dem Hindernis/Sprühbeeinträchtigung. Verglichen zu den Versuchen 1-3 fällt auf, dass die Temperaturdifferenz durch den Kühlversuch geringer ausfällt. Die geringere Abfuhr von Wärme ist auf zwei Effekte zurückzuführen. Zum einen wirkt sich die Sprühbeeinträchtigung auf die Ausbreitung des Wassernebels aus, sodass keine ungehinderte Ausbreitung im Raum stattfindet und ein Niederschlag des Nebels an der Box erfolgt. Generell besitzt Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität und eine hohe Verdampfungswärme. Damit kann Wasser die Wärme z.B. aus einer Verbrennungsreaktion sehr gut aufnehmen. Bedingt durch den Niederschlag an der Box wird die Aufnahme der Wärme durch das Wasser verringert bzw. verhindert. Weiterhin stand das Löschfahrzeug den Abend über in der Sonne, sodass es zu einer merklichen Erwärmung des Löschwassers im Tank gekommen ist. Verglichen zu den Versuchen 1-3, bei denen sich das Löschwasser nur geringfügig erwärmen konnte, ist das Wasser beim Kühlversuch 4 deutlich wärmer. Bedingt dadurch fällt der Kühleffekt geringer aus. Weiterhin ist die Temperatur innerhalb des Containers beim Kühlversuch niedriger als beim Versuch 5, sodass die Temperaturdifferenz von Wasser und Luft gering ist. Bei steigender Temperatur im Container nimmt der Kühleffekt zu. Dies verdeutlicht die nachstehende Abbildung der Graphen 1, Versuchen 4 und 5. Dieses Phänomen lässt sich generell auf alle Kühlversuche (1-5) übertragen.

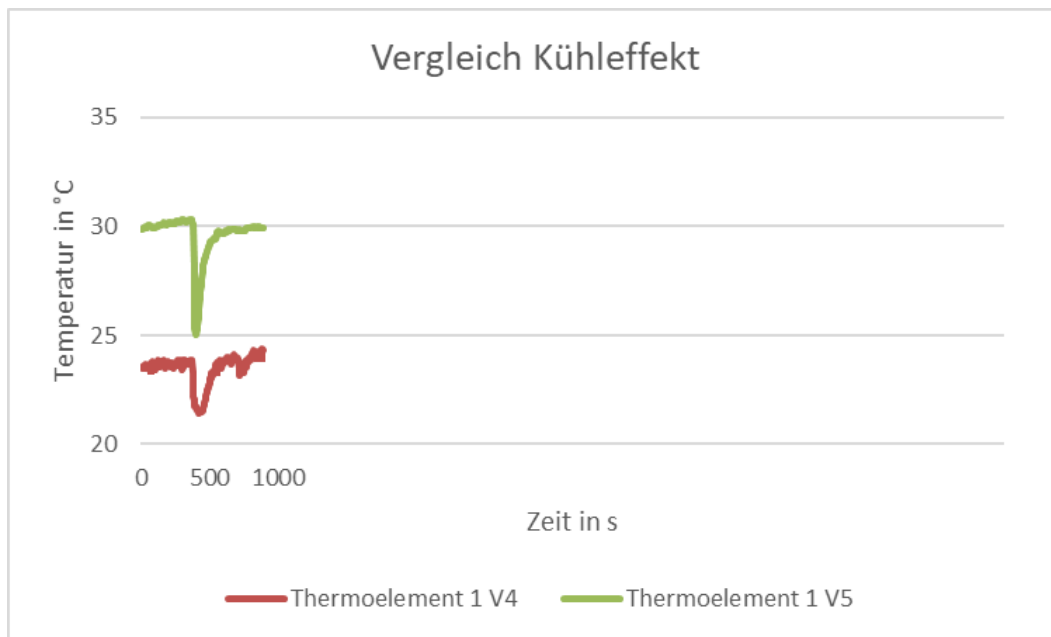


Abbildung 34: Vergleich Kühleffekt Graph 1, Versuch 4 und 5

Bedingt durch die Sprühbeeinträchtigung reagieren die Thermoelemente 2-8 lediglich marginal.

Der Kühlversuch über das Objekt hinweg führt teilweise im Bereich des Thermoelements 1 zu einer Verringerung des Kühleffekts, da die Abgabe des Hochdruckwassernebels auf die tieferen Bereiche des Containers abzielt und so im vorderen Bereich weniger Wassernebel zur Kühlung vorhanden ist. Der Kühleffekt ist bei den Thermoelement 2-8, verglichen zu dem 1. Kühlversuch etwa doppelt so groß, trotzdem auf einem sehr geringen Niveau. Ausschlagend hierfür ist der Sprühwinkel in den Container und das Hindernis, welches nur einen geringen Freiraum zur Decke besitzt, durch welchen sich der Hochdruckwassernebel sich ausbreiten kann. Ein Großteil schlägt sich an der Decke und an dem Hindernis nieder.

Über die gesamte Anzahl an Kühlversuchen, während des vierten Versuchs, lässt sich das beschriebene Muster für den Kühleffekt im Bereich des Thermoelements 1 erkennen. Für die Thermoelemente 2-8 gilt, dass der Kühlversuch gegen das Hindernis nur geringfügige Auswirkungen auf die Temperatur hat. Die Kühlversuche über das Hindernis führen zu größeren Effekten, jedoch verglichen mit den Versuchen 1-3 sind sie um ca. die Hälfte geringer. Des Weiteren ist festzustellen, dass die abgegebene Wassermenge nicht entscheidend für den Kühleffekt ist. Wie schon bei den Versuchen 1-3 ist der Sprühwinkel und die Eindringtiefe ausschlaggebend. Dies lässt sich gut an der nachstehenden Grafik erkennen, die einen Ausschnitt des Versuchs 4 zeigt.

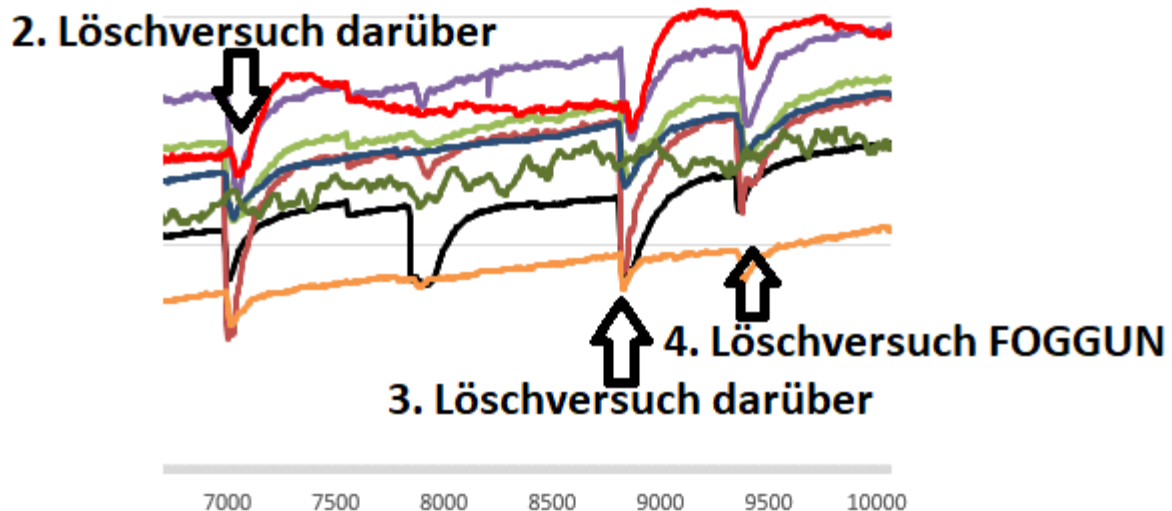


Abbildung 35: Ausschnitt Kühlversuche, Versuch 4

Die Auswirkungen des Kühleffekts bei dem zweiten und dritten Löschversuch sind nahezu identisch, obwohl die abgegebene Wassermenge beim dritten Kühlversuch aufgrund der Düse fast doppelt so groß ist. Vergleicht man diese beiden Versuche mit dem Effekt der FOGGUN, welche eine mehr als dreimal so große Durchflussmenge wie die Düse aus dem dritten Versuch hat, ist der Kühleffekt der FOGGUN eher gering. Gerade unter Berücksichtigung, dass die Dauer des Kühlversuchs bei ca. 15 s lag. Demzufolge besitzen die Düse mit ihrem ca. halben Meter langen Anschlussstück einen deutlichen Vorteil hinsichtlich Sprühwinkel und Eindringtiefe.

Bei dem Versuch 5 rückte die Heizquelle erneut auf die Position in die Containermitte, wie schon beim Versuch 2. Insgesamt zeigt der Versuch eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Containers, bedingt durch die mittige Platzierung der Wärmequelle. Wie schon bei Versuch 4 sind die Auswirkungen der Kühlversuche gegen das Hindernis, bei den Thermoelementen 2-8, kaum zu deuten. Die Kühleffekte des Thermoelements 1 unterscheiden sich nur marginal. Lediglich nach dem fünften Kühlversuch kommt es zu einer verzögerten Erwärmung, vermutlich bedingt durch direkte Beaufschlagung mit Hochdruckwassernebel und Tröpfchenbildung. Bei den weiteren Thermoelementen ist der bereits erwähnte Effekt aus den vorherigen Versuchen zu erkennen, dass der Kühleffekt (Hindernis, darüber) von vorne nach hinten abnimmt. Weiterhin ist zu erkennen, dass der von außen eingebrachte Impuls zu einer Steigerung der Temperaturen im hinteren Containerdrittel führt. Dieser Effekt konnte ebenfalls schon beim ersten Versuch beobachtet werden.

6.3 Auswertung Außentemperaturmessung

Neben der Temperaturoaufzeichnung innerhalb des Containers wurde während der Versuche die Außentemperatur, mittels Infrarot-Thermometer, gemessen. Die Messpunkte lagen in 1,6 m Höhe um den Container, wobei jeweils an der linken Wand mit der Messung begonnen wurde. Es wurde die Temperatur an jeder nach außen ausgewölbte Sicke gemessen.



Abbildung 36: Messpunkte Außentemperatur

Exemplarisch für die Versuche werden in der nachfolgenden Abbildung die Temperaturverläufe der linken, rechten und hinteren Containerabschlusswand für den Versuch 4 gezeigt. Die Diagramme enthalten die Temperaturverläufe zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten des Versuchs. Deutlich wird, dass die Temperatur an der Außenhaut mit zunehmender Versuchsdauer ansteigt.

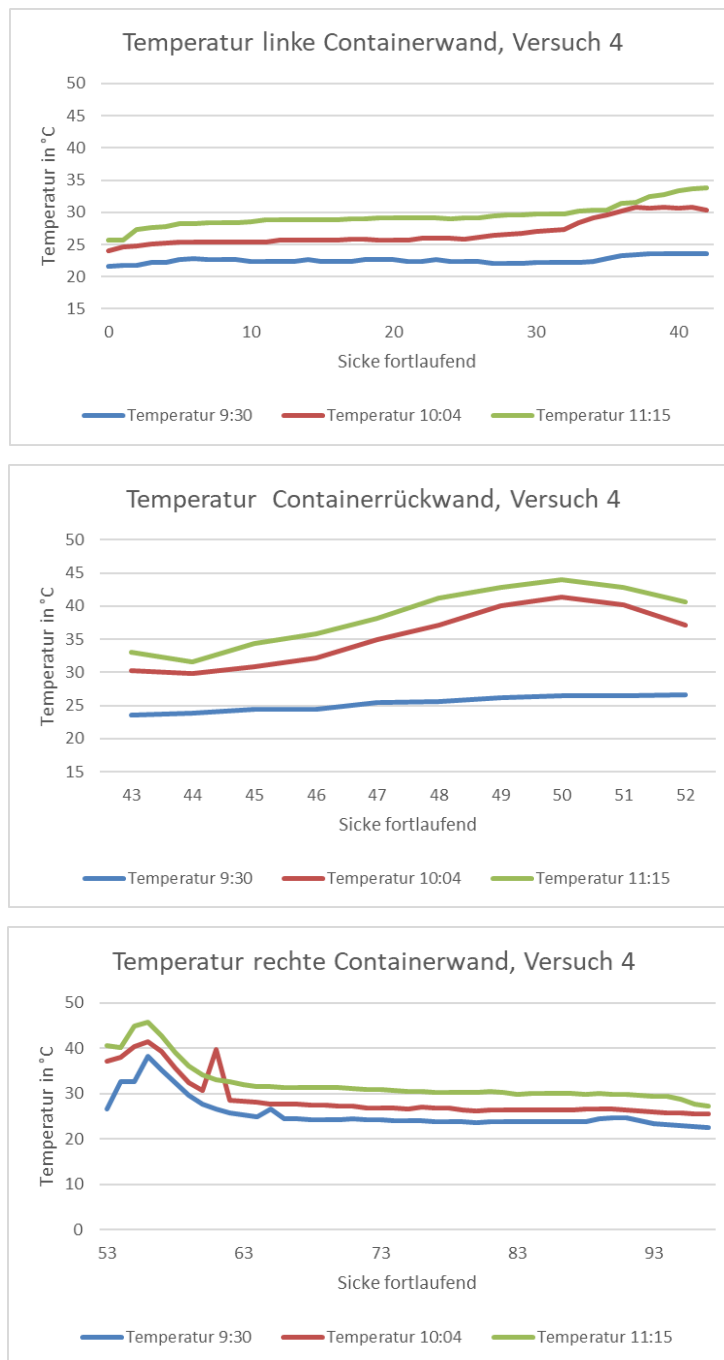


Abbildung 37: Temperaturverlauf Außenhaut, Versuch 4

Anhand der Temperaturverläufe lässt sich die Positionierung der Wärmequelle eindeutig im hinteren, rechten Bereich des Containers festmachen. Das Ergebnis deckt sich mit der Versuchsanordnung des Versuchs 4, bei dem die Wärmequelle hinten rechts positioniert ist. Hier werden die höchsten Temperaturen erreicht.

Die Messergebnisse der Außentemperaturmessungen der weiteren Realversuche lassen ebenfalls einen Schluss auf die Positionierung der Wärmequelle zu und bestätigen die dargestellten Erkenntnisse aus Versuch 4.

6.4 Messungenauigkeiten

Die Vergleichbarkeit der Versuche sind in Teilen durch den Faktor Mensch beeinflusst. Die Löschtechnik erschwerte eine zeitlich exakte Abgabe des Hochdruckwassernebels von einer Sekunde, sodass es in Folge dessen zu geringfügigen Abweichungen kommen konnte. Weiterhin ist die exakte Reproduzierbarkeit bei den Kühlversuchen in Bezug auf das Halten der FOGGUN bzw. Löschlanze nicht gegeben. Es wurde bei den Versuchen darauf geachtet, dass die Abweichungen möglichst gering waren, jedoch ist eine identische Positionierung nicht möglich gewesen. Bedingt dadurch kann es zu einem leicht veränderten Ausbreitungsverhalten des Wassernebels gekommen sein.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich folgende Einflussfaktoren für die Versuche ableiten:

- Kühleffekt nimmt von der Containertür nach hinten ab,
- Je nach Positionierung der Wärmequelle (vorne, mitte) können durch den Kühlversuch im dahinter liegenden Bereich höhere Temperaturen auftreten,
- Der Kühleffekt wird beeinflusst durch den Sprühwinkel, die Eindringtiefe und ggf. Sprühbeeinträchtigungen,
- Sprühbeeinträchtigungen können den Kühleffekt nahezu komplett verhindern, wenn der Kühlversuch komplett gegen das Hindernis gerichtet ist,
- Der Sprühwinkel und die Eindringtiefe wirken sich stärker aus als die Durchflussmenge.

7. Numerische Simulationen im Brandschutz

Folgend werden ausgewählte Methoden im Brandschutzingenieurwesen eingeführt, die ebenso Simulationsmodelle beinhalten, wie die im späteren verwendete Simulationssoftware Fire Dynamics Simulator. Mit Hilfe dieser Software werden anschließend für bestimmte Szenarien die experimentell ermittelten Ergebnisse verglichen.

7.1 Einführung in die Brandschutzingenieurmethoden

Auf die komplexer werdenden Bauten im Land- und Schiffbau lassen sich nicht immer die Standardvorschriften anwenden. Die moderne Architektur errichtet zu Land und zu Wasser immer komplexere Bauten, welche durch die bestehenden Vorschriften teilweise nicht eindeutig erfasst werden. Mit den herkömmlichen Vorgaben von z.B. Rauchabzugsöffnungen sind solche Sondermaßnahmen nicht zu realisieren. Daher bedarf es Ingenieurmethoden, um die geforderten Schutzziele zu erreichen. Somit spielen Brandsimulationen in der heutigen Zeit eine zunehmend wichtigere Rolle, wobei die stetig ansteigende Leistungsfähigkeit von Rechnern den Grundstein legte und somit maßgeblich für die Verbreitung der Methoden verantwortlich ist.

Ingenieurmethoden lassen die Vorhersage der Rauchausbreitung im Brandraum sowie weitere Informationen über z.B. atmosphärische Bedingungen zu. Grundsätzlich wird bei der Beschreibung zwischen physikalischen und mathematischen Modellen unterschieden.

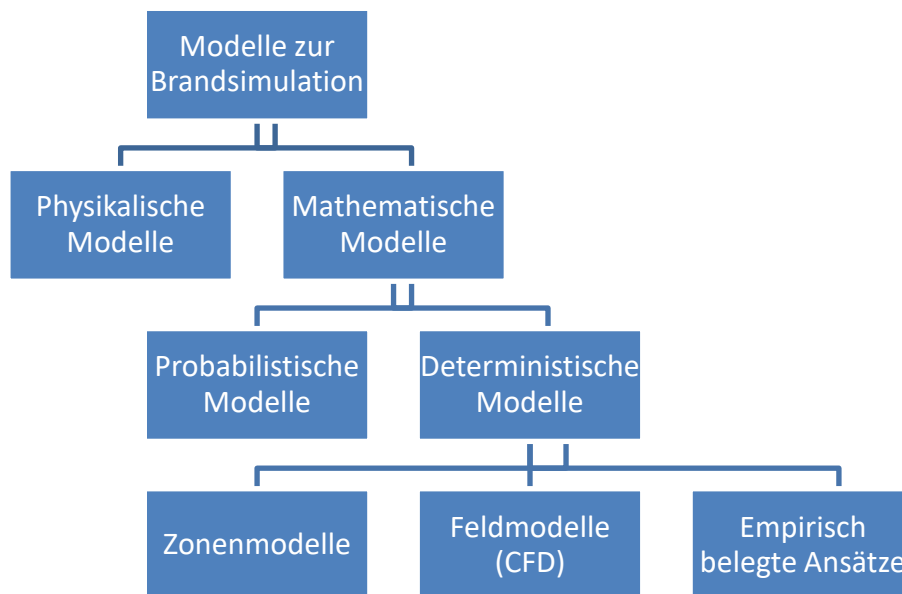


Abbildung 38: Übersicht zu Modellen der Brandsimulation

7.2 Vorstellung ausgewählter Modellarten

Wie der Abbildung 34 zu entnehmen ist, wird deterministische Modelle unterschieden in empirisch belegten Ansätzen sowie in Simulationsmodelle (Zonen- und Feldmodelle). Im Folgenden werden die Simulationsmodelle kurz vorgestellt.

7.2.1 Zonenmodell⁵⁸

Zonenmodelle bilden die Grundlage, anhand derer die Rauchausbreitung in Gebäuden rechnerisch vorhergesagt werden kann. Dabei unterscheidet man in Ein- und Mehrzonenmodelle.

Erstere gehen von einer gleichmäßigen und homogenen Verteilung der vorherrschenden Temperatur, Gas- und Stoffkonzentration im Brandraum aus. Diese Parameter werden insbesondere während der Vollbrandphase erreicht, woraus sich auch der Name 'Vollbrandmodell' ableitet. Hochenergetische Brände lassen sich darstellen, da hier von einer Durchmischung des Rauchvolumens durch den Brandrauch ausgegangen werden kann. Szenarien die nicht die Vollbrandphase betreffen, können nicht mit Hilfe dieses Modells berechnet werden.

⁵⁸ Vgl. VFDB Leitfaden, Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Kapitel 5

Die Beobachtung von Realbränden zeigte jedoch, dass hochenergetische Brände eine klare horizontale Schichtung der Rauchgase im Brandraum erzeugen und keine homogene Verteilung des Rauchgases vorliegt. Basierend auf dieser Beobachtung und unter der Vorgabe, Brände realistischer abzubilden, wurde ein neues Brandmodell entwickelt. Das Mehrzonenbrandmodell unterteilt den Brandraum in Schichten, welche jeweils als eigene Zone betrachtet werden. Die beiden Schichten sind durch eine neutrale Ebene getrennt, in der ein Druckgleichgewicht herrscht. Die obere Zone wird als Heißgasschicht (Überdruckzone) und die untere als Kaltgasschicht (Unterdruckzone) bezeichnet wird. Jede Schicht hat eine einheitliche Temperatur und der Druck ist eine Funktion der Höhe über die Zeit.

Die Unterteilung des Gesamtvolumens in mehrere Kontrollvolumina ergibt die Überlegenheit von Mehrzonenmodellen gegenüber Einzonenmodellen. Lokale Strömungseffekte können mit zunehmender Diskretisierung des Brandraumes genauer simuliert werden, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse gesteigert werden.

Durch die Aufstellung der jeweiligen Massen- und Energiebilanzgleichungen können z. B. Energieverluste an Bauteilen Berücksichtigung finden.

Nach dem VDI unterliegen Zonenmodellen einer Vielzahl von Modellbeschränken, um gültige Ergebnisse zu generieren.⁵⁹ So ist darauf zu achten, dass sich der Plume ungehindert ausbreiten kann. Weiter dürfen Nachströmöffnungen nicht im Bereich der Rauchgrenze liegen und Einflüsse durch Windeinwirkung sind zu vermeiden.

Zonenmodelle werden stetig weiterentwickelt, wobei sie in folgenden Punkten noch an Grenzen stoßen:

- Inhomogener Gaskonzentrationen
- Einschränkungen in der Gebäudegeometrie
- Vorteilhaft ist, dass der Rechenaufwand verhältnismäßig gering ist.

7.2.2 Feldmodell⁶⁰

Feldmodelle oder auch CFD-Modelle (Computer Fluid Dynamics) finden heutzutage in der Berechnung von Fluidströmungen Anwendung und spiegeln den Stand der Technik wieder.

⁵⁹ VDI 6019-2, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden

⁶⁰ Vgl. VFDB Leitfaden, Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Kapitel 5

Dabei wird der betrachtete Raum in Kontrollvolumina unterteilt, ähnlich wie bei den Zonenmodellen. Die Berechnung der strömungs- und thermodynamischen Effekte erfolgt mittels Differenzialgleichungen unter Berücksichtigung des Prinzips der Erhaltung von Masse, Energie und Impuls. Die Erhaltungsgleichungen werden numerisch approximiert.

Die numerische Strömungsdynamik diskretisiert den betrachteten Raum (Gesamtvolumen) in eine beliebig große Anzahl von Zellen (Einzel- oder Kontrollvolumina) und beschränkt sich somit nicht auf wenige Zonen innerhalb des Raumes. Mit Hilfe der zeitlichen und räumlichen Diskretisierung können lokale Zustände berechnet werden.⁶¹

Die Diskretisierung des Raumes beeinflusst maßgeblich die Genauigkeit der Ergebnisse. Je höher der Grad bzw. je größer die Anzahl der Zellen gewählt werden, desto geringer ist der Einfluss von Rechenfehlern beim Übergang von Differenzialgleichung zu Differenzialgleichung (Diskretisierungsfehler). Deshalb ist es besonders in strömungsrelevanten Bereichen vorteilhaft, das Gesamtvolumen in eine möglichst große Anzahl von Zellen aufzuteilen⁶². Die Feinheit des Gitters wird allerdings maßgeblich durch die Leistungsfähigkeit des Computers beeinflusst, da theoretisch eine unendlich feine Diskretisierung möglich ist. Neben der Rechenkapazität ist auch die Rechenzeit ein limitierender Faktor für die Feinheit des Gitters. Halbiert man die Kantenlänge eines gleichseitigen Gitters in x, y und z-Richtung, so verachtfacht sich die Rechenzeit. Grundsätzlich muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Effizienz gefunden werden. Insbesondere in der wirtschaftlichen Anwendung.

Die numerische Strömungssimulation ermöglicht dem Benutzer ein Brandszenario nachzubilden, welches sehr nah an der Realität ist. Für diese realitätsnahe Abbildung des Brandszenarios sind Submodelle nötig, welche z.B. die Verbrennungsreaktionen in die Simulation implementieren. So kann für die Verbrennungsreaktion die exakte Definition von Brand- und Materialparametern erfolgen.

CFD-Modelle finden aufgrund der stetig steigenden Leistungsfähigkeit von Computer einen weitverbreiteten Einsatz in der Praxis.

⁶¹ SFPE Handbook

⁶² VDI 6019-2

7.3 Vorstellung FDS⁶³

Fire Dynamics Simulator (FDS) ist ein Brandsimulationsprogramm, welches auf einem CFD-Modell basiert. Hierbei handelt es sich um eine quelloffene Software, welche vom 'National Institute of Standards and Technologie' (NIST) in den USA entwickelt wird. Die Software beinhaltet neben dem CFD-Modell noch ein Visualisierungstool namens 'Smokeview'. So bietet sich dem Anwender die Möglichkeit, Berechnungen in einem 3D-Modell zu visualisieren und auszuwerten.

Aufgrund der leichten Verfügbarkeit und der erfolgreichen Validierung am Beispiel von Realbränden, besitzt die Software einen großen Anwenderkreis und wird fortlaufend weiterentwickelt. Für diese Arbeit wurde die aktuell vorliegende Version 6.7.5 verwendet.

FDS bietet dem Nutzer die Möglichkeit, Simulationen im Rechenverbund auf mehreren Rechnern parallel zu simulieren. Dies ist dann möglich, wenn die Geometrie in mehrere Rechengitter aufgeteilt wird, welche jeweils einem Prozessor (CPU) zugewiesen werden. Die numerische Strömungssimulation läuft nun auf dem jeweiligen Prozessor, wobei atmosphärische Bedingungen (Temperatur, Druck und Geschwindigkeit) zwischen den Grenzen der benachbarten Rechengitter ausgetauscht werden. Die Aufteilung der Rechengitter auf mehreren Prozessoren ermöglicht die Berechnung von großen und fein diskretisierten Raumgeometrien in einer möglichst geringen Simulationszeit und einem effizienten Rahmen.

Das Programm verfügt über verschiedene Berechnungsalgorithmen mit denen z.B. Verbrennungen effektiv berechnet werden können. Für die Berechnung von Hydrodynamischen Effekten nutzt FDS die nach Navier und Stokes benannten Gleichungen. Diese können dreidimensionale Strömungen in Flüssigkeiten und Gasgemischen beschreiben. Mit Hilfe physikalischer Grundsätze (Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie) stellt man diese in Form von Differentialgleichungen dar. Anschließend können sie numerisch gelöst werden.

FDS verwendet weiterhin verschiedene Untermodelle mit denen sich unter anderem Verbrennungen und turbulente Strömungen effektiv berechnen lassen.

⁶³ Vgl. FDS Userguide, FDS technical reference guide

Anwendungsgrenzen bestehen hinsichtlich bestimmter Brandphänomene und der Diskretisierung. Der Rechenalgorithmus ist nur für kleine Mach-Zahlen ($> 0,3$)⁶⁴ anzuwenden, sodass der Abbildung von schnell ablaufenden Brandphänomenen wie z.B. Explosionen nicht möglich ist.

Rundungen und Schrägen sind nur mit Einschränkungen abzubilden. Das rechtwinklig strukturierte Gitternetz ist trotz Hilfsfunktionen nur annähernd in der Lage, diese abzubilden.⁶⁵

7.4 Aufbau der Simulationsdateien

Die im folgenden durchgeführten Berechnungen mit FDS hatten die vergleichende Betrachtung der experimentell gewonnen Daten mit denen eines CFD-Modells zum Ziel. Dafür gilt es zunächst die Randbedingungen zu definieren und zu betrachtende Kriterien festzulegen.

Ausgangspunkt der Simulation ist die Eingabedatei, die für die Durchführung der Simulationsrechnung notwendig ist. Die Eingabedatei fasst alle vom Anwender getätigten spezifischen Eingaben zusammen, die für die Berechnung mittels des Algorithmus relevant sind. Dazu gehören z.B. das Rechengitter oder die Materialeigenschaften.

Im ersten Schritt werden die für die Rechnung zentralen geometrischen Randbedingungen definiert. Hierzu wird der betrachtete Bereich zunächst in ein feines Rechengitter aufgeteilt. Für den Vergleich zwischen den Experimentaldaten und der CFD-Simulation wurde ein Rechengitter gewählt, dessen Zellen eine Kantenlänge in x-, y- und z-Richtung von 10 cm beinhalten. Das gesamte Rechengitter hatte folgende Abmessungen:

- $L = 13 \text{ m}$
- $B = 3 \text{ m}$
- $H = 3 \text{ m}$

Die gesamte Zellenanzahl betrug für die verschiedenen Berechnungen insgesamt 116.100 Zellen.

Das Gitternetz überragte somit den Container im Seitenbereich um jeweils 0,28 m und im Deckenbereich um 0,41 m.

⁶⁴ *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume1: Mathematical Model*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010

⁶⁵ *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume1*

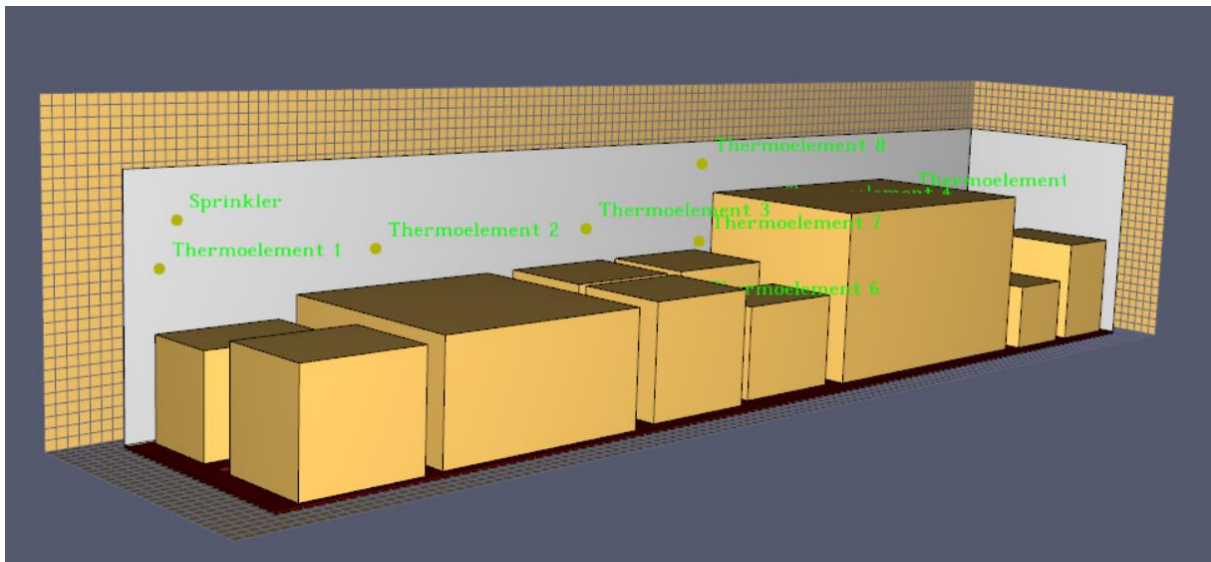


Abbildung 39: Container mit Beladungsgegenständen und Messtechnik

Aufgrund der überschaubaren Anzahl von Zellen ist es nicht notwendig, das Rechengitter weiter in sogenannte Meshes zu unterteilen. Generell verfügt FDS über die Möglichkeit, die Berechnung jedes Meshes einzeln durchzuführen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Übergänge nicht in kritischen Bereichen liegen, wo z.B. mit höheren Drücken gerechnet werden muss. Da die geringe Zellenanzahl eine Unterteilung des Meshes nicht erforderlich macht, sind Ungenauigkeiten bei den Übergängen der Meshes nicht zu erwarten.

Nach der Definition des Meshes wird die Geometrie in das Rechengitter eingefügt. Zunächst wurde hierfür die äußere Geometrie des Containers vereinfacht mithilfe des Obstructions-Befehls dargestellt. Dabei wurde auf eine detaillierte Ausarbeitung der Trapezblechsicken verzichtet. Gemäß den in Kapitel 5.3.1 wurden dabei den äußeren Wänden eine Stärke von 1,5 mm, dem Dach von 2,0 mm und dem Boden von 28,0 mm zugeordnet. Anschließend wurden die Materialeigenschaften den jeweiligen Bauteilen und Oberflächen zugeordnet. Hierbei besteht zusätzlich die Möglichkeit, die unterschiedlichen Eigenschaften wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Brandverhalten zu definieren. Für die Außenwände und das Dach wurde „STEEL“ und für den Boden „YELLOW PINE“ gewählt. Die in der Simulation verwendeten Materialien hinsichtlich der Beladung wurden nicht weiter definiert, da keine relevante Einflüsse auf die zu untersuchende Temperatúrausbreitung innerhalb des Containers anzunehmen sind. Dazu wurde ihnen die Materialeigenschaft „INERT“ zugewiesen. Das bedeutet, dass die Bauteiltemperaturen zu jedem Zeitpunkt der Simulation gleich der Umgebungstemperatur sind und keine Bauteilerwärmung berücksichtigt wird.

Die Beladungsgegenstände wurden vereinfacht als rechteckige Gegenstände oder als Konstrukt zusammengestellter Rechtecke dargestellt, wozu erneut der Obstructions-Befehl genutzt wurde.

Die Wärmequelle wird in den verschiedenen Simulationsvarianten als Heater mit einer Temperatur von 600 °C⁶⁶ und einem Emissionsgrad von 0,9⁶⁷ angenommen, dessen jeweilige Position identisch zu dem der Realversuche ist.

Zur Bestimmung des Temperaturverlaufs wurden innerhalb des Containers acht Thermoelemente platziert, deren exakte Positionierung der Realversuche gleich. Die Thermoelemente 1-5 wurden entlang der linken Containerwand auf einer Höhe von 1,5 m, ausgehend von der Containertür platziert. Die Thermoelemente 6-8 wurde mittig übereinander im Container angeordnet. Die exakten Positionen sind den Abbildungen zu entnehmen.

Zur Simulation der Löschdüsen wurde mittels Device eine Nozzle programmiert, dessen Position und Auslass ungefähr mit den Realversuchen übereinstimmt. Die Abgabe von Hochdruckwassernabel entspricht in der Simulation exakt eine Sekunde.

Weiterhin wurden die vier bauseitig vorhandenen Ventilationsöffnungen mithilfe des Vents-Begriffs dargestellt.

Neben den berechneten Messdaten kann das zu FDS gehörende Visualisierungstool Smokeview zur Auswertung genutzt werden. Die Auswertung kann in zweidimensionaler Hinsicht über farbliche Darstellungen in einer zuvor definierten Ebenen erfolgen oder über berechnete Werte an Referenzstellen.

⁶⁶ Internetseite Focus, Stand: 30.09.2020

⁶⁷ Internetseite Kleiber Infrared, Stand 30.09.2020

8. Interpretation der Simulationsergebnisse

Die Auswertung der simulierten Messergebnisse erfolgt für die Temperatur über die Zeit. Durchgeführt wurde die Simulation mit FDS für die Versuche 3 und 4. Die Auswahl der Versuche begründet sich darauf, dass die Kühlversuche bei diesem Simulationsaufbau zu konservativen Ergebnissen führen. Aufgrund der Positionierung der Wärmequelle im hinteren Bereich des Containers ist mit geringeren Kühleffekten zu rechnen, da der Hochdruckwassernebel sich ausbreiten muss und nicht direkt in einem Bereich höherer thermischer Aktivität eingebracht wird.

8.1 Beschreibung der Simulationsvarianten

Bei beiden Simulationsvarianten wurde versucht, die Realversuche möglichst genau abzubilden. Dazu wurde der Aufbau sowie die jeweilige Platzierung der Beladungsgegenstände innerhalb des Containers für die Simulationsvarianten 3 und 4 analog zu den Realversuchen 3 und 4 nachgebildet.

Anschließend wurden je drei Simulationen über einen Zeitraum von 1000 Sekunden durchgeführt. Der Zeitraum 0-750 Sekunden simuliert die Aufheizphase, nach 750 Sekunden injiziert für eine Sekunde ein Hochdruckwassernebel die Löschmittel in den Container. Neben der Vergleichbarkeit der Simulation mit den experimentellen Ergebnissen wird hier der Einfluss des Durchmessers von Hochdruckwassernebel untersucht. Mittels Simulation wurden drei Varianten durchgeführt bei denen die Durchmesser wie folgt gewählt wurden:

- 250 μm
- 375 μm
- 500 μm

Mit dieser Versuchskonfiguration sollte untersucht werden, inwieweit der Durchmesser des Hochdruckwassernebels einen Einfluss auf den Kühleffekt innerhalb der Simulation hat.

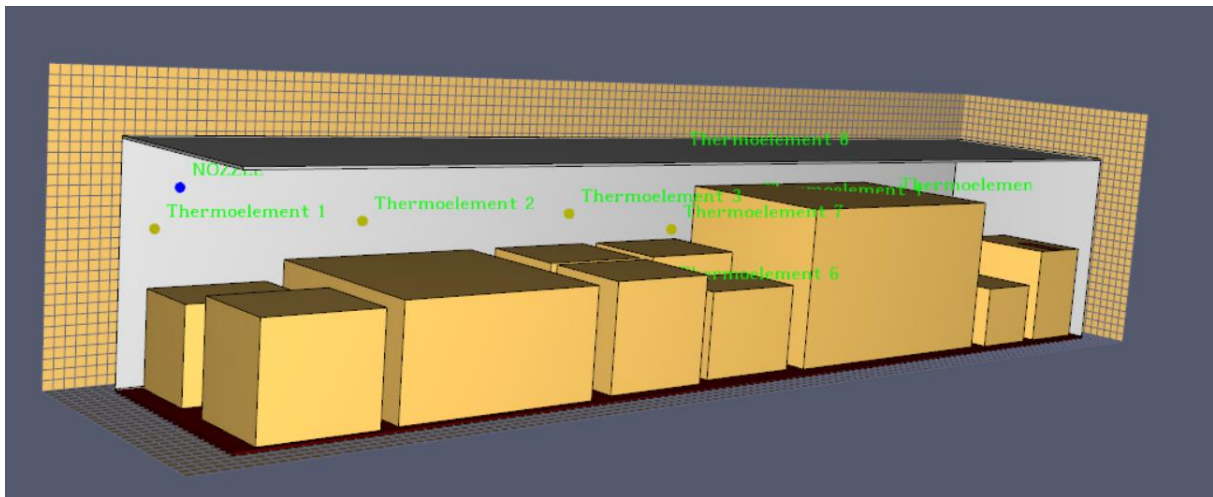


Abbildung 40: Aufbau Simulationsvariante 3

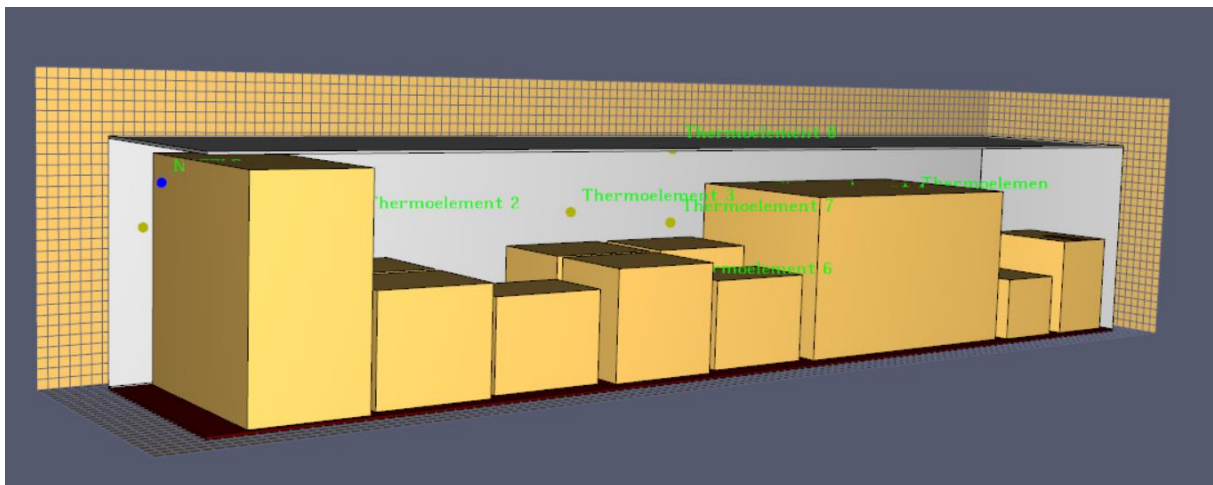


Abbildung 41: Aufbau Simulationsvariante 4

8.2 Auswertung Simulation allgemein

Die Auswertung der Simulationsvarianten 3 und 4 zeigt generell über alle Graphen hinweg erhebliche Temperaturschwankungen. In den Bereichen der Wärmequelle sind diese am deutlichsten zu erkennen und liegen in der Amplitude bei ca. 5 °C, unabhängig des Simulationsversuchs. Dieses Ergebnis ist aufgrund der erhöhten thermischen Aktivität im hinteren Bereich zu erwarten und nimmt mit steigender Distanz von Thermoelement zur Wärmequelle ab.

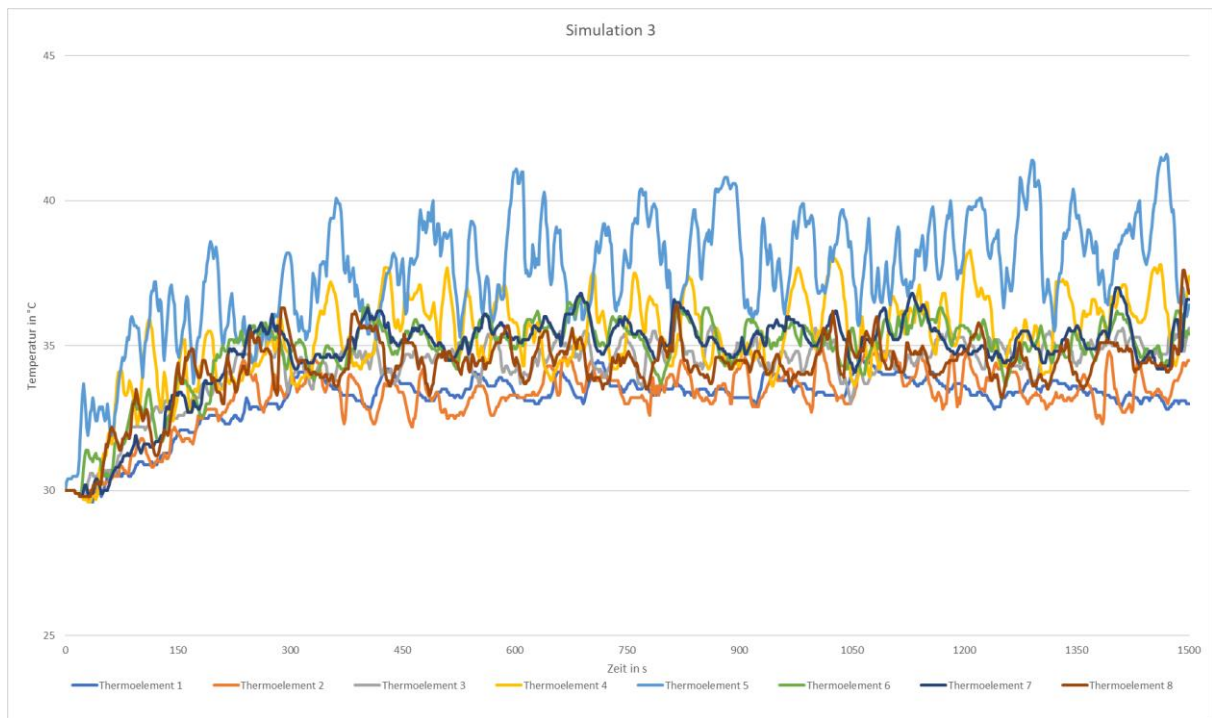


Abbildung 42: Temperaturverlauf Simulation, Versuch 3 ohne Kühlung

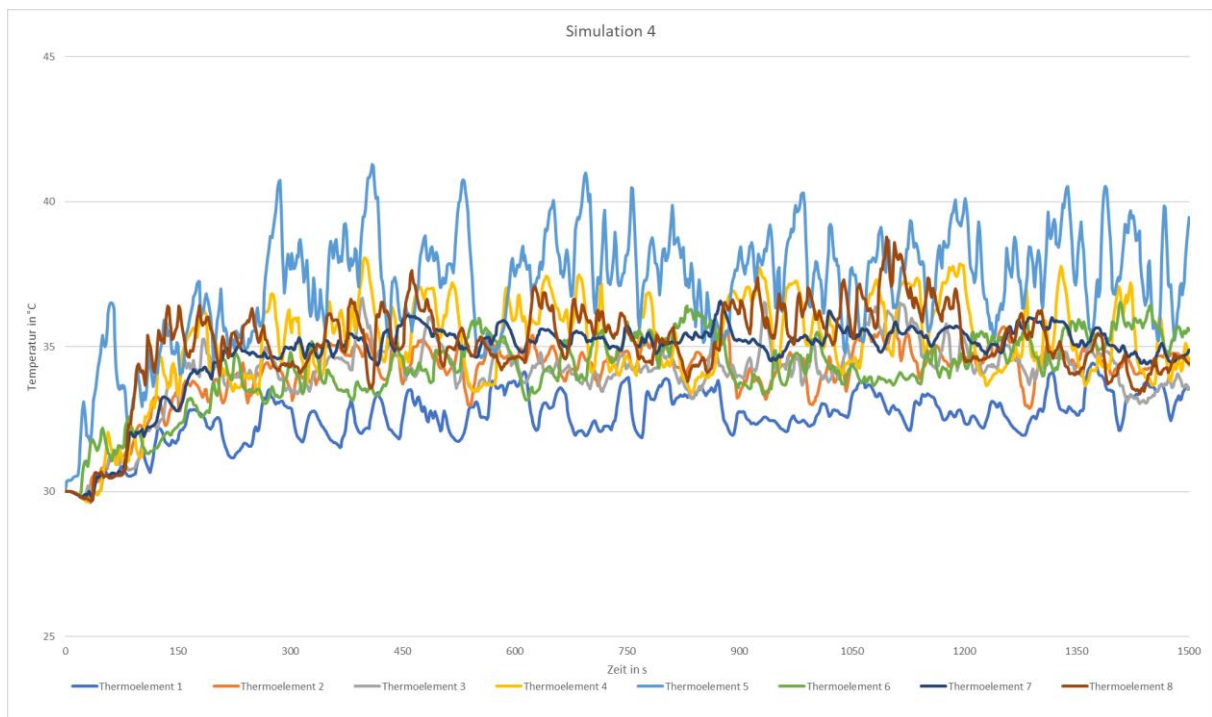


Abbildung 43: Temperaturverlauf Simulation, Versuch 4 ohne Kühlung

Die unruhigen Temperaturverläufe in der Simulation resultieren auf dem gewählten feinen Zeitschritt und der thermischen Durchmischung innerhalb des Containers. Siehe hierzu Kapitel 8.3.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Temperaturverteilung innerhalb des Containers zum Zeitpunkt 300 Sekunden (Simulationsvariante 3). Die Ausgangstemperatur zu Simulationsbeginn lag im Container bei 30 °C. Anhand der visualisierten Temperaturverläufe lässt sich die Wärmequelle im hinteren Bereich verorten. Weiterhin wird deutlich, dass bereits eine ausgeprägte Durchmischung der Temperatur über die Gesamte Höhe des Containers stattgefunden hat.

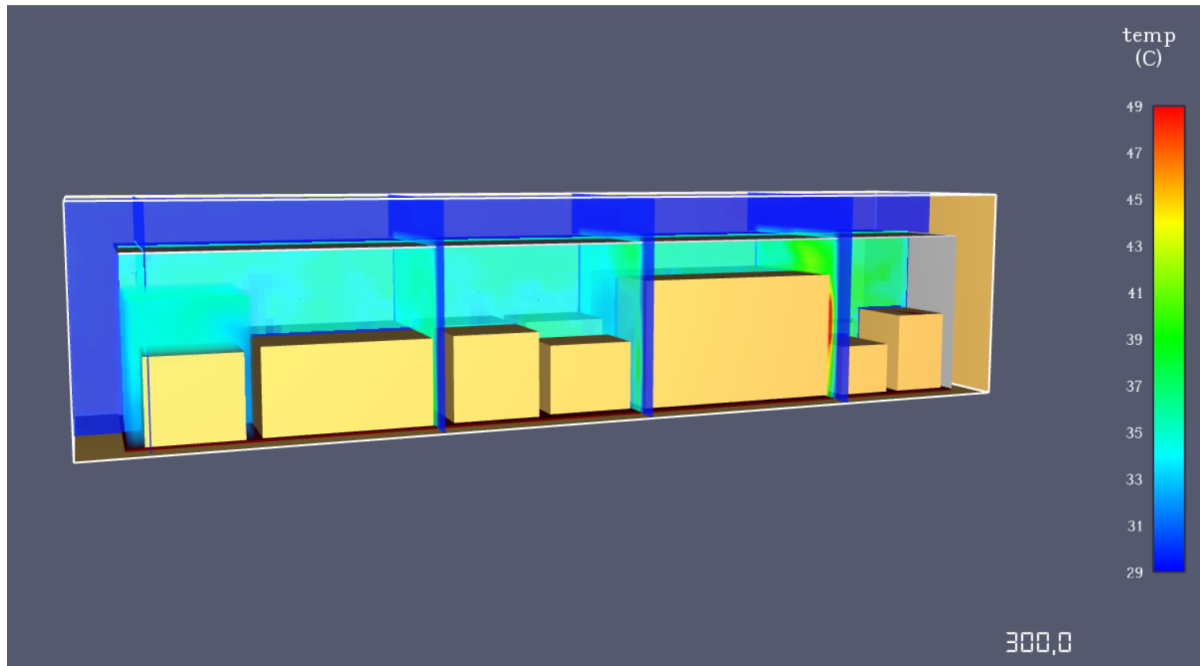


Abbildung 44: Temperaturverlauf Versuch 3, Zeitpunkt 300 s

8.2.1 Auswertung Simulationsvariante 3

Die nachstehende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf innerhalb des Containers. Die Verläufe der Einzelnen Thermoelemente sind der Abbildung 42 zu entnehmen.

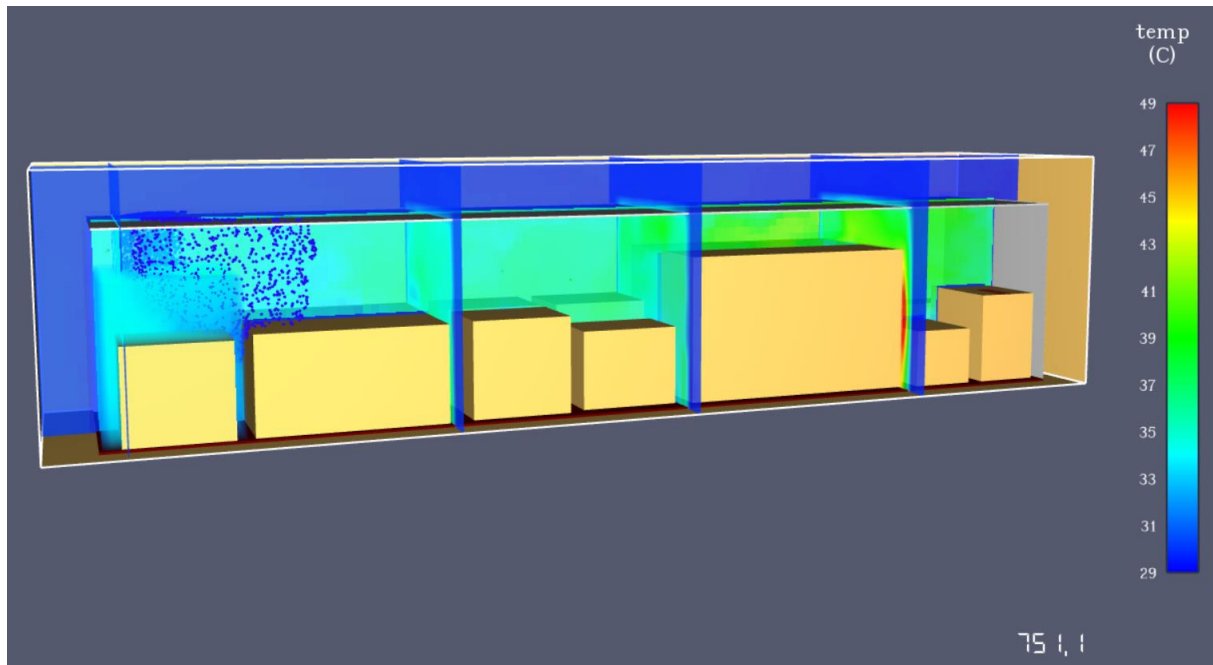


Abbildung 45: Temperaturverlauf Versuch 3, Zeitpunkt 751 s, Einbringen Hochdruckwassernebel

Diese Abbildung verdeutlicht, dass die Temperaturunterschiede über die gesamte Containerhöhe nur geringfügig sind. Ebenso wird dies durch Selektierung der Graphen 6-8 in der nachstehenden Abbildung deutlich.



Abbildung 46: Temperaturschichtung Simulation, Versuch 3

Durch die thermische Aktivität im Bereich der Wärmequelle gelangen in pulsartigen Schüben, wärmere zirkulierende Luftmassen in den mittleren und vorderen Bereich des Containers, wodurch die Durchmischung erfolgt.

Anhand der Abbildung 47 lassen sich die Kühleffekte zum Zeitpunkt nach 750 Sekunden erkennen. Insgesamt sind die Kühleffekte über alle Simulationsvarianten, hinsichtlich des Durchmessers des eingebrachten Hochdruckwassernebels, gering. Der vermutete Effekt, dass mit zunehmender Reaktionsoberfläche des Wassers (geringere Tröpfchengröße) schneller und größeren Mengen an Energie aus dem System entzogen werden können und so das Temperaturniveau gesenkt werden kann, zeigen die Simulationen nicht. Die Abbildung 45 verdeutlicht zum Zeitpunkt der Kühlversuche die geringen Auswirkungen des Hochdruckwassernebels sowie den nicht sichtlich werdenden Zusammenhang zur Tröpfchengröße.

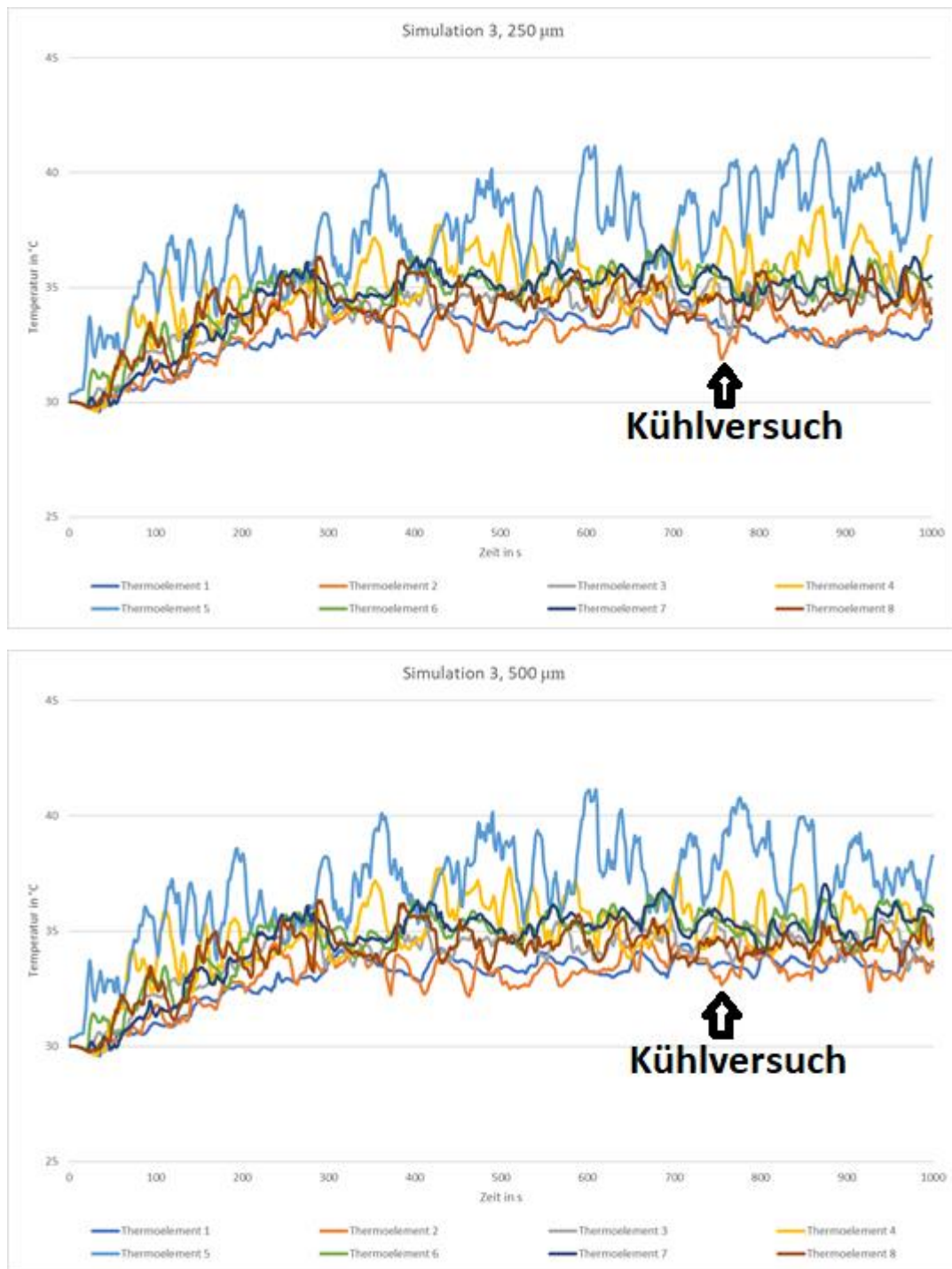


Abbildung 47: Vergleich Kühleffekt in Abhängigkeit zur Tröpfchengröße

8.2.2 Auswertung Simulationsvariante 4

Die Versuchsergebnisse unterscheiden sich kaum von der vorherigen Variante ohne Sprühbeeinträchtigung. Die Temperaturschichtung im Container ist wie bereits im Simulationsversuch 3 wenig ausgeprägt und der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

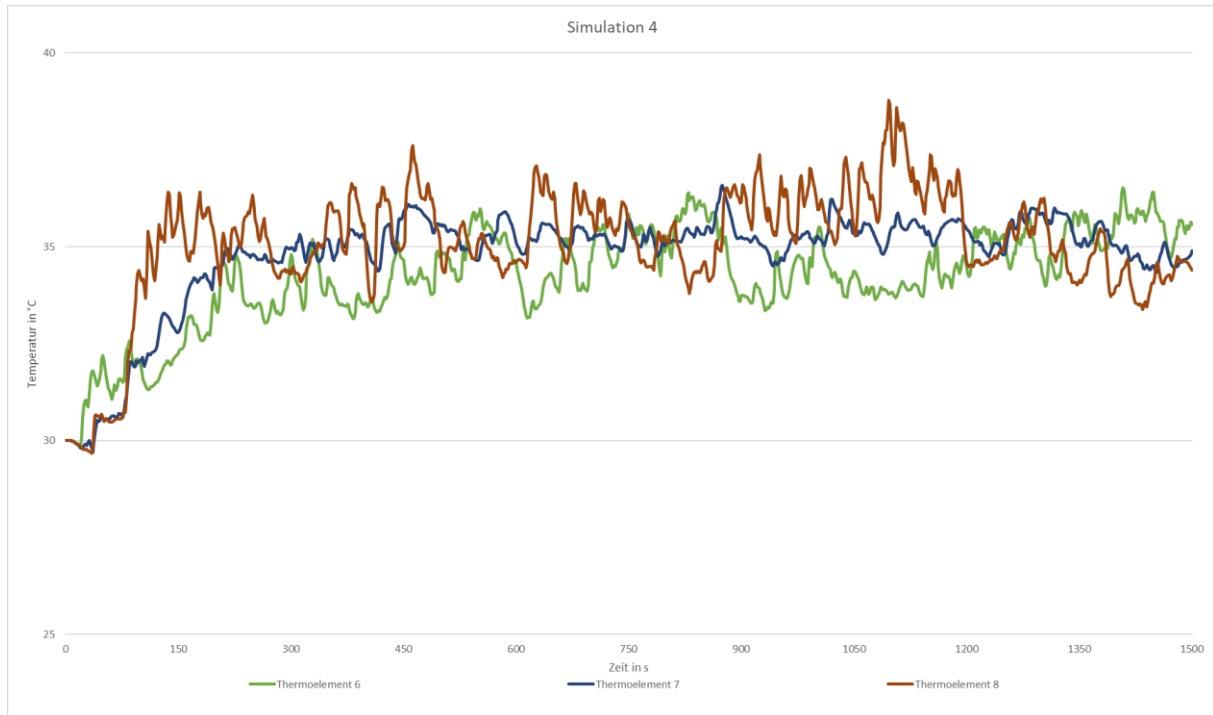


Abbildung 48: Temperaturschichtung Simulationsvariante 4

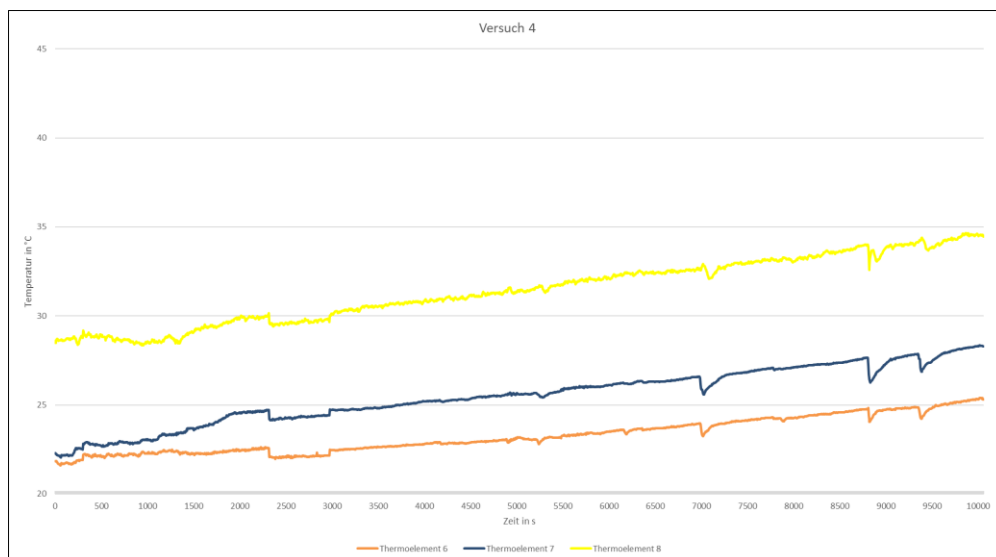
Wie der Vergleich der Abbildungen 42 und 43 zeigt, weicht einzig der Verlauf des Graphen 1 merklich von der Simulationsvariante 3 ab. Dies ist maßgeblich bedingt durch die Sprühbeeinträchtigung und der Positionierung zwischen Sprühbeeinträchtigung und Containertür. In diesem Bereich erfolgt eine geringfügig langsamere und etwas niedrigere Erwärmung, da die Sprühbeeinträchtigung einen Großteil der Raumhöhe und -breite ausfüllt. Nach 750 Sekunden ist hier der einzige geringe Effekt hinsichtlich des Kühlversuch zu beobachten.

In Abbildung 47 ist eine marginale Abnahme der Temperatur im Bereich des Thermoelements 3 zu erkennen die über einen Zeitraum von ca. 150 Sekunden verläuft. Ein Zusammenhang mit dem Kühlversuch ist bedingt durch den gleichbleibenden Verlauf des Graphen 2 auszuschließen. Sowohl die Versuche mittels Simulation als auch die experimentellen Versuche haben gezeigt, dass ein gleichförmiger/paralleler Verlauf der Graphen 2 und 3 zu erwarten ist.

Wie bereits in der vorherigen Simulationsvariante 3 konnte kein Einfluss der Tröpfchengröße auf den Kühleffekt festgestellt werden.

8.3 Vergleich experimenteller Messergebnisse und Simulation

Bei dem Vergleich der experimentellen Daten und der Simulation fällt zunächst auf, dass die Graphen der experimentellen Versuche einen gleichmäßigeren Verlauf während des Aufheizens aufweisen. Die unterschiedlichen Verläufe lassen vermuten, dass trotz detailliert modellierter Ventilationsbedingungen im Container, sich die thermischen Randbedingungen unterscheiden. Dies zeigen ebenfalls die visualisierten Simulationsauswertungen, aus denen eine stärkere thermische Durchmischung im Container hervorgeht, als bei den Realversuchen. Geringfügige Einflüsse können zusätzlich durch die Beladung entstanden sein, die in der Simulation als Inert angenommen wurde sowie durch die Wasserkühlung und Sonneneinflüsse während des Realversuchs 3. Die nachstehende Abbildung zeigt den Vergleich der Temperaturschichtung der Thermoelemente 6-8 zwischen Real- und Simulationsversuch.



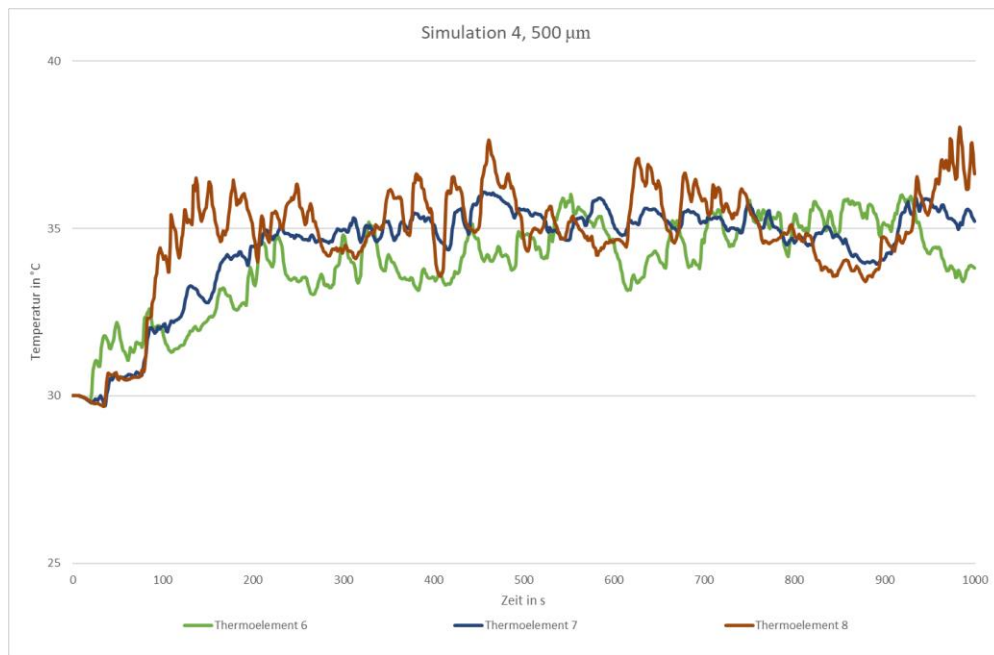


Abbildung 49: Vergleich Temperaturschichtung experimentell gegen Simulation

Während im Realversuche eine deutliche Temperaturschichtung über alle Versuche innerhalb des Containers zur erkennen ist, bilden die Graphen in der Simulation die Temperaturzunahme über die Höhe nur marginal ab. Dies erscheint wenig plausibel, da zum einen die Realversuche ein anderes Bild wiedergeben und die Ergebnisse so nicht erwartbar sind. Grundsätzlich ist von einem Auftriebsstrom im Bereich der Wärmequelle bis zum Containerdach auszugehen. Von dort erfolgt die Ausbreitung der warmen Luft unterhalb der Containerdecke, wobei in den Grenzbereichen eine stetige Durchmischung stattfindet. Die Temperatur in den unteren Bereichen des Containers sind niedriger als unterhalb der Decke zu erwarten. Die folgende Abbildung zeigt eine bereits sehr deutliche Durchmischung sowie eine relativ homogene Temperaturverteilung im mittleren und vorderen Bereich des Containers zum Zeitpunkt nach 300 Sekunden. Dies gilt auch für Bereiche, in denen der thermische Austausch aufgrund der Beladung nur langsam zu erwarten ist.

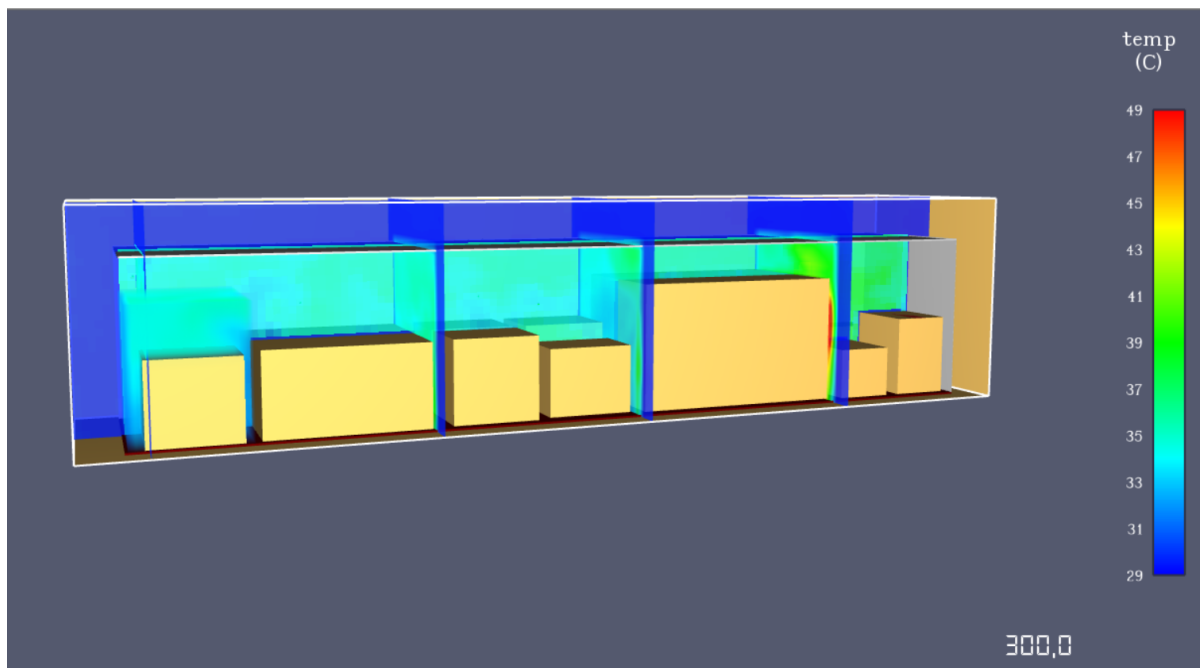


Abbildung 50: Temperaturverlauf Simulationsvariante 3, Zeitpunkt 300 Sekunden

Sowohl bei den Realversuchen als auch bei den Simulationen ist zu erkennen, dass die Aufheizphase innerhalb des Containers ca. 300 Sekunden benötigt. Danach herrschen relativ stabile Bedingungen ohne nennenswerte Temperatur Zu- oder Abnahmen auf neue Niveaus bis zum Kühlversuch.

Die Kühlversuche in der Simulation wurden nach 750 Sekunden für eine Sekunde durchgeführt und weisen einen wesentlich geringfügigeren Kühleffekt auf als die Realversuche. Während bei den experimentellen Versuchen an jeder Messstelle die Auswirkungen des Kühlversuches deutlich nachweisbar sind, spiegeln sich bei der Simulationsvariante 3, ohne Sprüheinträchtigung, nur geringfügige Kühleffekte im Bereich der Thermoelemente 2 und 3 wieder. Diese unterscheiden sich jedoch nicht signifikant zu größeren Temperaturschwankungen des jeweiligen Graphen im Simulationsverlauf. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus den Realversuchen, ebenso wie der Verlauf der Thermoelemente 1, 4 und 5. Ersterer reagiert aufgrund der Positionierung kaum auf den Kühlversuch und verläuft bis zum Ende konstant auf einem etwas geringeren Niveau.

8.4 Mögliche Fehlerquellen des Simulationsprogramms

In den Simulationsvarianten sind Aspekte und Unsicherheitsfaktoren vorhanden, welche zu abweichenden Ergebnissen von den Realversuchen führen können. Im Zuge der Auswertung der Resultate wurde bereits einige Punkte angemerkt.

Grundsätzlich spielen die Ventilationsbedingungen eine große Rolle bei der Vergleichbarkeit von Simulationen und Realversuchen. Diese wurden bestmöglich nachgebildet, jedoch kann es zu geringfügigen Abweichungen gekommen sein. Weiterhin spielen die Strömungs- und Druckverhältnisse eine zentrale Rolle, die ebenfalls zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Die Strömungsverhältnisse werden unter anderem durch eingebrachte Gegenstände beeinflusst, welche im Zuge der Simulation bestmöglich nachgebildet aber nicht identisch nachgebildet wurden. So sind z.B. Fässer keine zylinderförmigen, sondern rechteckige Objekte. Diese feinen unterschiedlichen Bedingungen zwischen Realversuch und Simulation können im Endeffekt zu leicht abweichenden Werten führen.

Die größten Schwachstellen und Fehlerquellen der zugrundeliegenden Simulation ist der Zeitpunkt, an dem der Hochdruckwassernebel in den Container injiziert wird. FDS bietet lediglich die Möglichkeit den Zeitpunkt zu bestimmen, nicht aber weitergehende Angaben zur Düse zu machen. Folglich kann nicht definiert werden, welche Wassermenge innerhalb 1 Sekunde in den Raum abgegeben wird. Des Weiteren ist es nicht möglich die Löschdüse hinsichtlich des Sprühbilds (Sprühwinkel und -weite) zu konfigurieren. Diese nicht zu definierenden Randbedingungen führen folglich zu unterschiedlichen Ergebnissen zwischen Realversuch und Simulation.

8.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Zusammenfassend lassen sich folgende Beobachtungen hinsichtlich der Kühleffekte ableiten:

- Insgesamt geringerer Kühleffekt durch die im Kapitel 8.4 beschriebenen Randbedingungen,
- Kühleffekt nimmt von der Containertür nach hinten ab,
- Kein nennenswerter Einfluss des Durchmessers von Hochdruckwassernebel auf den Kühleffekt
- Sprühbeeinträchtigungen beeinflussen den Kühleffekt.

9. Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes

Das folgende Kapitel leitet Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes auf Containerschiffen ab. Dazu werden zunächst allgemein auf mögliche Brandursachen vorgestellt und im Weiteren wird auf denkbare Eskalationsketten eingegangen. Darauf basierend werden Rückschlüsse über die Wirksamkeit der Brandschutzmaßnahmen abgeleitet und Verbesserungsmaßnahmen formuliert.

9.1 Brandursachen

Mögliche Brandursachen auf Containerschiffen wurden in einem Formal Safety Assessment untersucht. Die FSA wurde von Dänemark bei der IMO eingereicht und nachfolgend sind die Ursachen für Brände im Bereich der Laderäume hervorgehoben.^{68, 69}

- Brandstiftung,
- Reparaturarbeiten,
- zu warme Stauposition (Bereich der Hauptmaschine und Setztanks),
- unzureichende Ventilation,
- unsachgemäße Stauung gefährlicher Güter (nicht, falsch oder ungenügend gekennzeichnet),
- unzureichende Kühlung der Güter vor der Stauung im Container,
- technische Probleme im Bereich der Elektrik und Fehlfunktionen an Kühlaggregaten (Kühlcontainern),
- extreme Schiffsbewegung durch Seegang oder Kollision, wodurch es zu Beschädigungen der Container und der Fracht kommen kann. Dadurch bedingt kann als Resultat eine Freisetzung entzündbarer Stoffe erfolgen.

⁶⁸ MSC 83/INF.8 FSA-Container vessels, Details of the FSA S. 25

⁶⁹ MSC 83/21/2 FSA-Container vessels

9.2 Mögliche Eskalationsketten

Vorangehend wurde bereits auf mögliche Brandursachen in Laderäumen eingegangen, welche von der IMO in ihrem Formal Safety Assessment identifiziert wurden. Darauf basierend werden ausgewählte Wege der Brandentstehung und -ausbreitung entwickelt sowie die entsprechenden Parameter. Betrachtet wird dabei die Brandausbreitung auf angrenzende/umliegende Container sowohl horizontal als auch vertikal.

Die bekannten Schänden lassen den Schluss zu, dass ein Brandereignis in einem einzelnen Container eine nur geringe Gefahr darstellt, solange die folgenden Randbedingungen erfüllt sind:

- geschlossener ISO-Container
- unbeschädigte Stahlstruktur
- keine Öffnungen im Containerboden
- kein Gefahrgut

Bei Nichteinhaltung einer oder mehrerer Randbedingungen besteht die Gefahr, dass der Brand im Container nicht aufgrund von Sauerstoffmangel erlischt. Hierfür ist z.B. eine Öffnung erforderlich, die sowohl als Zuluft und Abluftöffnung dient oder mehrere.⁷⁰

Neben den Belüftungsbedingungen zur Aufrechterhaltung des Brandes sind ebenso ausreichend brennbare Materialien im Umfeld notwendig. Die Brandausbreitung kann mittels Wärmestrahlung oder direkter Exposition erfolgen. Bei der Wärmestrahlung ist jedoch zu beachten, dass die Werte zur Entzündung der entsprechenden Güter erreicht werden. Bei der direkten Exposition ist eine Brandübertragung auf z.B. darüberstehende Container denkbar. In der Folge kann es zur Entzündung des Containerbodens kommen und zu einem Durchbrand, wobei der 28,0 mm starke Containerboden als recht widerstandsfähig angesehen werden kann. Eine größere Gefahr geht von kleinen Öffnungen innerhalb des Bodens aus, durch die die Flammen schnell ins Innere des Containers gelangen und z.B. leicht Verpackungsmaterial entzünden können.

⁷⁰ El Moctar, Fire Investigation in a Container, Januar 2010

Zusammenfassend konnten folgende Randbedingungen zur Aufrechterhaltung und Ausbreitung eines Brandes identifiziert werden:

- Öffnungen (Zu- und Abluft)
- Ausreichend große Wärmestrahlung
- Entzündung der Containerböden durch direkte Exposition
- Brennbare Materialien in der unmittelbaren Umgebung
- Abtropfende oder herunterfallende brennende Gegenstände z.B. Open-Top-Container
- Versagen der Löschanlage
- Keine Branddetektion z.B. bei manueller Auslösung

Der in Abbildung 36 dargestellte Fehlerbaum soll mögliche Wege der Brandentstehung und Ausbreitung auf angrenzende Container im Laderaum verdeutlichen.

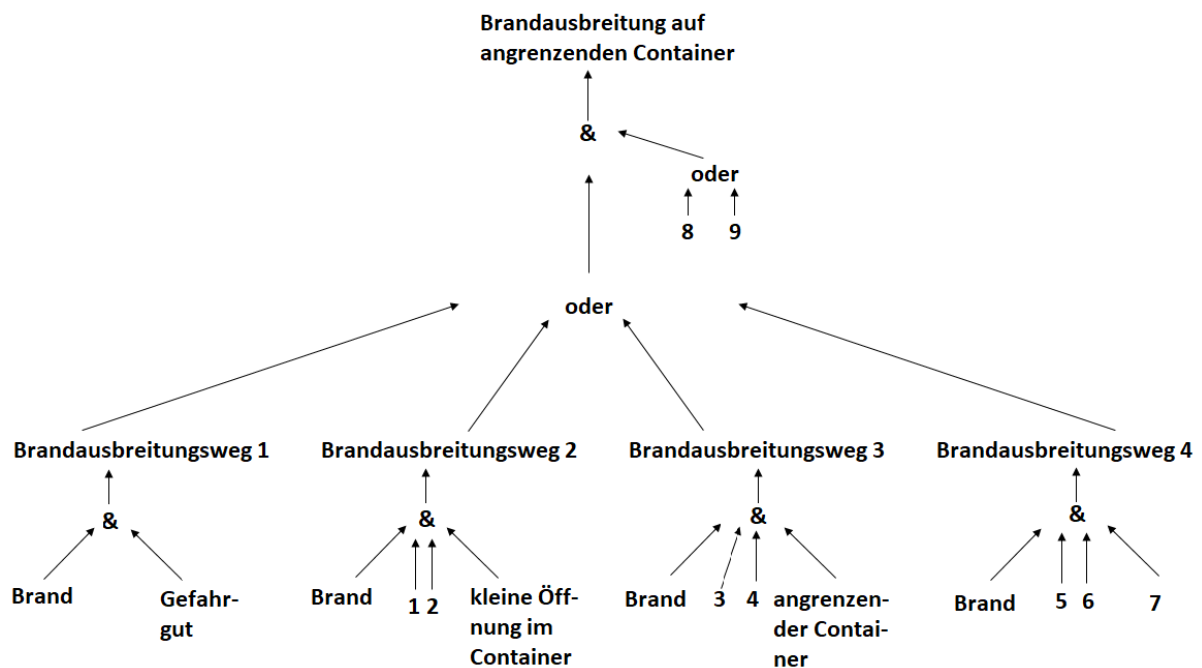


Abbildung 51: Mögliche Brandausbreitungswege auf angrenzende Container im Laderaum

Tabelle 12: Legende zur Abbildung 51

Nummer	Randbedingung
1	brennbarer Gegenstand auf dem Dach des Brandcontainers
2	Boden des oberen Containers aus Holz
3	brennbare Gegenstände in unmittelbarer Nähe zum Container
4	große Öffnung im Brandcontainer durch Schaden oder Containertyp
5	offener Containerboden des Brandcontainers
6	brennendes Material fällt auf unteren Container
7	brennbarer unterer Container (z.B. Flatrack, Open-Top-Container)
8	eventuell vorhandene Löschanlage versagt
9	Feuer wird nicht erkannt

Hinweis zu 8 und 9: Im Bereich der Laderäume wird davon ausgegangen, dass eine automatische Löschanlage vorhanden ist. Sofern das Feuer nicht rechtzeitig entdeckt wird, erfolgt das Auslösen der Löschanlage nicht bzw. nicht rechtzeitig und eine wirkungsvolle Brandbekämpfung unterbleibt. Sollte die Löschanlage versagen, findet ebenfalls keine Brandbekämpfung statt. Somit ist es ausreichend, wenn entweder das Ereignis 8 oder 9 Eintritt und eine Brandausbreitung auf einen angrenzenden Container ermöglicht wird. Für das denkbare Szenario, dass „keine Löschanlage vorhanden“ ist, ist dies mit dem Ereignis Löschanlage versagt abgedeckt.

Bei der Bewertung der Eskalationsketten hinsichtlich ihrer Relevanz ist denkbar, dass die Brandausbreitung über aus dem Brandcontainer austretende brennbare Gase begünstigt werden könnte. Die Brandausbreitung mittels Strahlung über das Dach bzw. die seitlichen Containerwände ist ebenfalls möglich, jedoch bei geschlossener Containerstruktur unwahrscheinlich. Die Brandentwicklung und -ausbreitung bei großen Öffnungen wie z.B. Flat Racks oder Open-Top Containern wird als realistisch angesehen.

Open-Top Container⁷¹



Flat Rack Container⁷²

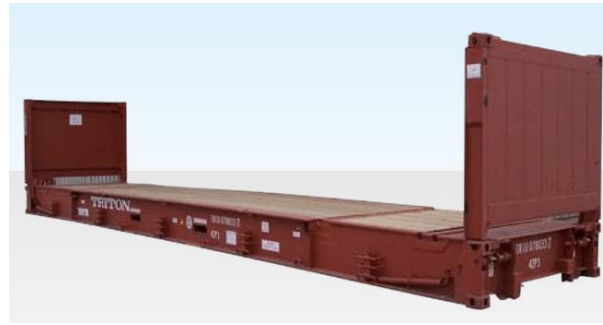


Abbildung 52: Darstellung Containertyp

Ebenso der Brandausbreitungsweg 1. Bei der Brandausbreitung direkt nach unten (Brandausbreitungsweg 4) und die Brandausbreitung durch Brandlast auf dem Container wird als verhältnismäßig unwahrscheinlich eingeschätzt. Die Brandausbreitung mittels Container, die im Verlauf (Be- und Entladen, ausgenommen schwere See) sehr stark beschädigt wurden, sodass dies eine Brandausbreitung massiv begünstigt, wird als unwahrscheinlich angesehen. Solche Beschädigungen treten im Regelfall nicht unbemerkt auf oder werden nicht berücksichtigt.

9.3 Rückschlüsse der Brandszenarien auf die Wirksamkeit von Brandschutzmaßnahmen

Die beschriebenen Szenarien lassen den Rückschluss zu, dass geschlossene ISO-Container hinsichtlich des Brandschutzes gut aufgestellt sind. Voraussetzung hierfür sind jedoch, dass keine gravierenden Schäden am Holzboden oder den Wandungen vorliegen.⁷³ In der DIN 4102-4 wird das Brandverhalten von Baustoffen beschrieben wonach ein durchbrennen des 28 mm starken Containerbodens ca. 30 min benötigt.

Bleibt das Feuer auf das innere des Containers begrenzt, ist die Detektierung des Brandes mittels einer Brandmeldeanlage im Laderaum erschwert. Die wenigen Öffnungen des Standardcontainers lassen nur einen geringen Rauchaustritt zu, welcher in Bezug auf das Laderaumvolumen äußerst gering ist. Schadenerfahrungen haben gezeigt, dass ein Brandereignis in einem geschlossen, intakten und nicht mit Gefahrgut beladenen Container nur eine geringfügige Gefahr für das Schiff und Ladung ausgeht.

⁷¹ Internetseite, 3dexport.com

⁷² Internetseite, Portablespace.co.uk

⁷³ Fire Investigation in a Container

Grundsätzlich wird in Laderäumen eine CO₂-Löschanlage gefordert, wobei eine Wasserlöschanlage im Laderaum ebenso wirksam sein kann. Kommt es zu einem Brandereignis innerhalb eines Containers hat die CO₂-Löschanlage keinen Einfluss auf den Brandverlauf. Selbst unter Beachtung der geringfügigen Öffnungen im Containerboden ist der Brand selbstverlöschend. Unter der Berücksichtigung einer Explosion im Laderaum ist die Wirksamkeit von CO₂-Löschanlagen kritisch zu betrachten, da die Dichtheit der Raumabschlüsse ggf. nicht mehr gegeben ist.

Weiterhin haben Windeinflüsse in der Realität einen beträchtlichen Einfluss auf die Brandentwicklung und Ausbreitung. Kommt es zu einem Brand unter oder auf Deck, sollte die Fahrtgeschwindigkeit umgehend gesenkt werden. Außerdem ist das Schiff so zu manövrieren, dass der Wind von der Backbord- oder Steuerbordseite kommt. So wird eine schnelle Brandausbreitung über die gesamte Länge des Schiffs erschwert und die Aufbauten/Besatzung geschützt.



Abbildung 53⁷⁴: Brand MSC Flaminia, Wind von der Steuerbordseite

9.4 Mögliche Verbesserungen der vorhandenen Brandschutzmaßnahmen

Die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen, die das Risiko eines Brandes und der Folgeschäden reduzieren haben organisatorischen, baulichen und anlagentechnischen Charakter.

Im Bereich des **organisatorischen Brandschutzes** ist die strikte Kennzeichnung von Gefahrgut zu verorten. Nicht gekennzeichnete Gefahrgutcontainer werden in Bereichen normaler

⁷⁴ Internetseite Marineinsight, Stand: 22.09.2020

Ladung gestaut, sodass in diesem Bereich nun eine erhöhte Brand- und Explosionsgefahr besteht. Eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Minderung der Brandgefahr durch Gefahrgutcontainer ist die vollständige und korrekte Deklaration nach dem IMDG-Code. So ist davon auszugehen, dass die Crew über die Fracht in Kenntnis ist und die jeweiligen Container in dafür ausgelegten Laderäumen transportiert werden.

Der **anlagentechnische Brandschutz** kann optimiert werden, indem eine Wasserlöschanlage anstelle einer CO₂-Löschanlage unter Deck verbaut wird. Die Installation an Deck würde ebenfalls das Brandausbreitungsrisikos minimieren, da die Brandbekämpfung, wie schon beschrieben, mit hohen Risiken verbunden ist. In Kapitel 3.4 Absatz 2.1.6 wird richtlinienkonform nach der SOLAS für Schiffe >6000 BRZ ein Druck von 2,7 Bar am Anschlussstutzen gefordert. Dieser Druck ist bei den Abmessungen deutlich zu gering, um alle Container (gerade an Deck) zu erreichen und einen wirkungsvollen Löschangriff zu ermöglichen. Dies verdeutlicht der gültige Faustwert für ein C-Rohr ohne Mundstück, dessen Wurfweite bei 5 Bar Druck 20 m beträgt.⁷⁵

Denkbare wäre die Installation einer Wasserlöschanlage auf und unter Deck, die in die Stahlführungsschienen für die Container integriert wird. Um einen effektiven Schutz zu gewährleisten, muss die Anlage so ausgelegt werden, dass Explosionssereignisse gewissen Umfangs mit möglichst geringem Schaden überstanden werden. Dafür bieten sich die Führungsschienen an, die auf der einen Seite die Löschtechnik vor Beschädigungen schützen und im Brandfall direkt am Container wirksam wird. In den verschließbaren Ladeluken wäre es nun möglich, den Brandherd durch aktives kühlen mit Wasser von der restlichen Ladung abzuschirmen. Die technische Herausforderung hierbei ist, dass die Luken selbst mit Wasser gekühlt werden müssen, damit der Stahl durch die Wärmeeinwirkung nicht seine komplette Stabilität verliert.

Neben der zusätzlichen Installation einer Brandmeldeanlage in den Laderäumen, die durch ein zeitnahes auslösen der Löschanlage Einfluss auf die Brandentwicklung nehmen kann ist an Deck die Installation von Sprühwasservorhängen zwischen den Containerbays denkbar. Sprühwasservorhänge würden im Brandfall die Brandausbreitung erschweren, sodass die Crew Zeit gewinnt, um wirkungsvolle Maßnahmen zu ergreifen. Für den **abwehrenden Brandschutz** sollten z.B. festinstallierte Monitore an Deck bereitstehen, die jeweils jede Stelle an Deck erreichen können. Der Wasserdruck und die Wurfweite sind so zu bemessen,

⁷⁵ Internetseite Einsatzleiterwiki, Stand 23.09.2020

dass die Löschmaßnahmen auch noch bei hohen Windstärken möglich sind. Nur so kann ein Übergreifen auf benachbarte Containerstapel verhindert werden und damit einhergehend der Verlust von großen Teilen der Ladung oder gar des Schiffes. Fernbedienbare Löschmonitore reduzieren das Verletzungsrisiko der Crew.

Bauliche Maßnahmen zur Verbesserung des Brandschutzes sind unter den betreiberspezifischen Anforderungen schwer durchzusetzen. Möglich wäre eine weitreichendere vertikale Unterteilung der Laderäume. Dies birgt allerdings höhere Baukosten, geringfügig höheres Gewicht, eine weniger flexible Nutzung des Laderaums sowie einen leicht veränderten Betriebsablauf.

9.5 Verbesserung und Empfehlungen zum Transport von Calciumhypochlorit

1. Mit Calciumhypochlorit beladene Container sollten an Deck und nach Möglichkeit ohne direkte Sonneneinstrahlung befördert werden. So sind die Frachtcontainer den höheren Umgebungstemperaturen im Laderaum nicht ausgesetzt. Weiterhin ist ein Brand unter Deck mit Calciumhypochlorit schwieriger zu bekämpfen als ein Brand an Deck.
2. Zur Sicherung des Personenschutzes sollten die Container in ausreichendem Abstand zu Aufenthaltsbereichen gestaut werden.
3. Bei Transporten durch warme Gebiete, deren mittlere Lufttemperatur bei 35°C liegt, sollten Maßnahmen zur Begrenzung der Temperatur in den Containern getroffen werden.
 - Zusätzliche Belüftung (u.a. Zwangsbelüftung)
 - Mechanische Kühlung
 - Verwendung von Kühlcontainern
 - vollständige Temperaturkontrolle

Die vollständige Temperaturkontrolle sind nach Möglichkeiten innerhalb des Containers erfolgen, da die Messtechnik so vor Beschädigung bei Be- und Entladung und durch Umwelteinflüsse geschützt ist. Weiterhin ist aufgrund der Stauung das Befestigen von

Messtechnik meist nur an den Stirnseiten der Container möglich. Die in Kapitel 6.3 beschriebene Außentemperaturmessung haben gezeigt, dass grundsätzlich eine Erwärmung innerhalb eines Containers zu detektieren ist. Messungen innerhalb des Containers haben den Vorteil, dass die Messtechnik Temperaturanstiege schneller registriert und zeitnah eine Überprüfung des Containers stattfinden kann.

4. Ebenfalls sollte bei dem durchqueren von Gebieten, deren durchschnittliche Lufttemperatur über 35 °C liegt, die Beladung von Calciumhypochlorit pro Container begrenzt werden.
5. Anpassung der Einstufung nach IMDG-Code. Zukünftig nach 4.1 selbstreaktiver Stoff (ggf. Zusatz oxidierend wirkend) und nicht wie bisher nur als oxidierend wirkender Stoff.
6. Verwendung von 20'Containern
7. Der Transport innerhalb des Containers sollte in sauberen Fässern erfolgen, wobei das Nettogewicht pro Gebinde 45 kg nicht übersteigen sollte.⁷⁶

⁷⁶ Gray

Zusammenfassung und Ausblick

Die im August 2020 durchgeführten Versuche der Bergischen Universität Wuppertal in Zusammenarbeit mit dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft haben neue Erkenntnisse zum Einsatz von Hochdruckwassernebel in Seecontainern ergeben.

Grundsätzlich sind Seecontainer nach ISO 668 bezüglich des Brandschutzes gut aufgestellt, sofern keine größeren Öffnungen durch z.B. Beschädigungen vorhanden sind. Haupteinflussparameter für den Brandverlauf innerhalb eines Containers sind die Ventilationsbedingungen, die über vorhandene Öffnungen in den Container beeinflusst werden, sofern nicht oxidierend wirkende Güter wie z.B. Calciumhypochlorit geladen wurden.

Die Maßnahmen des Brandschutzes auf Schiffen, sowohl stationär als auch mobil, sind verbesserungsfähig. Hier bedarf es ebenso wie bei der Größenentwicklung der Schiffe einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Feuerlöscheinrichtungen an und unter Deck. Feuer bleibt die größte Gefahrquelle für Schiff und Besatzung. Weiterhin muss zukünftig die Besatzung besser in die Lage versetzt werden potentielle Gefahren frühzeitig und schnell zu erkennen. Nur rechtzeitig ergriffene und gezielte Maßnahmen können Schäden im Vorwege zu verhindern oder im Nachhinein minimieren.

Neben den bisherigen Maßnahmen im Brandfall wie z.B. Fahrtverringern und beidrehen zum Schutz der Aufbauten und der Brandausbreitung über die Länge des Schiffes, ist die Installation einer Wasserlöschanlage an und unter Deck sinnvoll. Weiterhin muss die Besatzung im Brandfall in die Lage versetzt werden, alle Bereiche des Schiffes mit stationären oder mobilen Monitoren zu erreichen, sodass eine Ausbreitung des Brandes auf angrenzende Container vermieden werden kann.

Weitere Maßnahmen sind gerade im Bereich des Gefahrguttransportes notwendig. Hierzu bedarf es zum einen organisatorischer Lösungen wie z.B. die konsequente Kennzeichnung aller Gefahrgutcontainer, die das Verladen von Gefahrstoffcontainern in den regulären Ladungsbereich zuverlässig verhindern. So ist es möglich das Brandrisiko für diese Bereiche zu minimieren.

Neben den beschriebenen Empfehlungen zum Transport von Calciumhypochlorit ist auf der organisatorischen Seite der Transport in Kühlcontainern möglich, sodass die Gefahr der Zersetzung bei höheren Umgebungstemperaturen nicht gegeben ist. Alternativ wäre eine

permanente Temperaturüberwachung der Container möglich, sodass bereits vor dem thermischen Durchgehen des Produkts durch die Besatzung eingegriffen werden kann. Unabhängig von dem Stadium des thermischen Durchgehens im Container und den meisten Gefahrstoffen würde sich hier Hochdruckwassernebel anbieten. Wie die Versuche gezeigt haben, besitzt Hochdruckwassernebel einen enormen Kühleffekt durch die Verneblung des Löschwassers. Selbst das kurzzeitige Einbringen von ca. 1 s und sehr geringen Wassermengen führt bereits zu einer Effizienten Kühlung innerhalb weiter Bereiche des Containers. Dem thermischen Ereignis wird so zum einen schnell und effektiv Wärme entzogen und zum anderen erfolgt durch das verdampfen der Wassertröpfchen im Bereich des Brandherdes ein Sauerstoffverdrängungseffekt. Setzt man die Besatzung zukünftig in die Lage, thermische Ereignisse (im Idealfall Frühzeitig detektiert) mit den auf die Kühlung und Brandbekämpfung abgestimmten Hochdruckwassernebel-Löschtechnik zu bekämpfen, ist das ein sinnvoller Beitrag zum Schutz von Leben und Sachwerten auf See.

Literaturverzeichnis

- [Art.91 SRÜ] Internetseite, Stand: 23.08.2020
<https://www2.jurion.de/files/lexsoft/share/pdf/cl2013r0610de0000010.0001.pdf>
- [Basiswissen Schifffahrt] Basiswissen Schifffahrt, Germanischer Lloyd, GL Academy, Hamburg 2008
- [Bowes, P C] P C Bowes, "High Mean Temperatures in Ships Holds", The Marine Observer, 1968
- [CINS] Guidelines for the Carriage of Calcium Hypochlorite in Containers, 05/2016
- [Cox Claims Group] Internetseite, Stand: 20.09.2020
<http://www.wecoxclaimsgroup.com/KMTC-HONGKONG>
- [Deutsche Flagge] Internetseite, Stand: 10.08.2020
<http://www.deutsche-flagge.de/de/sicherheit/isps/dokumente-und-zeugnisse>
- Internetseite, Stand: 10.08.2020
<http://www.deutsche-flagge.de/de/psc>
- [El Moctar] Ould El Moctar, Daniel Povel, Vladimir Shigunov, Alexander Tide, Fire Investigation in a Container, Januar 2010
- [Einsatzleiterwiki] Internetseite, Stand: 23.09.2020
<https://wiki.einsatzleiterwiki.de/doku.php?id=brand:geraete:strahlrohre>
- [EMSA] Internetseite, Stand: 10.08.2020
<http://emsa.europa.eu/implementation-tasks.html>
- [Europäische Union] Internetseite, Stand: 20.08.2020
http://europa.eu/about-eu/index_de.htm
- [FDS] Floyd, Jason; Hostikka, Simo; Baum, Howard; McGrattan, Kevin; McDermott, Randall; Mell, William; Rehm, Ronald: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [Finanz und Wirtschaft] Internetseite, Stand 20.08.2020 <http://www.fuw.ch/article/thema-der-woche-49-2015/>

[Focus]	Internetseite, Stand 30.09.2020 https://praxistipps.focus.de/nuetzliches-wissen-so-heiss-wird-eine-herdplatte_53775
[FSS-Code]	International Code for Fire Safety Systems Consolidated Edition up to Res. MSC.292(87) adopted 2010, IMO, London 2012
[FTP-Code]	International Code for Application of Fire Test Procedures Consolidated Edition up to Res. MSC.307(88) adopted 2010, IMO, London 2012
[General Anzeiger Bonn]	Internetseite, Stand: 15.08.2020 http://www.general-anzeiger-bonn.de/news/panorama/L%C3%B6scharbeiten-im-Hamburger-Hafen-ziehen-sich-hin-article3347516.html
[ghforwarding]	Internetseite, Stand: 20.09.2020 https://ghforwarding.com/container-ship-cosco-pacific-062-w-cargo-causes-fire-and-delays/
[Gray, Brian F.]	Brian F. Gray*, Brendan Halliburton, The thermal decomposition of hydrated calcium hypochlorite (UN 2880), 2000
[IMDG-Code]	International Maritime Code for Dangerous Goods, IMO, London 2018
[IMO]	Internetseite, Stand: 15.08.2020 http://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.asp Internetseite, Stand: 15.08.2020 http://www.imo.org/About/Membership/Pages/Default.aspx
[IACS]	International Association of Classification Societies, Internetseite, Stand: 10.08.2020 http://www.iacs.org.uk/about/
[ISM-Code]	International Safety Management Code, Consolidated Edition up to Res. MSC.353(92) adopted 2013, IMO, London 2015
[Kleiber Infrared]	Internetseite, Stand 30.09.2020 https://www.kleiberinfrared.com/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html
[Ü. Küstenmeer]	Internationales Übereinkommen über das Küstenmeer und die Anschlußzone, Stand: 19.09.2020 https://www.vilp.de/treaty_full%3Bjsessionid=949D77204D3DD5075F13421548E05782?lid=en&cid=668
[Loyds List Intelligence]	Internetseite, Stand 20.08.2020

	http://www.lloydslistintelligence.com/llint/containers/casualties/index.htm
[LSA-Code]	Code for International Life-Saving Appliances, consolidated Edition up to Res. MSC.293(87) adopted 2010, IMO, London 2012
[Marineinsight]	Internetseite, Stand: 22.09.2020 https://www.marineinsight.com/case-studies/details-on-the-container-ship-msc-flaminia-accident/
[Maritimebulletin]	Internetseite, Stand: 20.09.2020 https://www.maritimebulletin.net/2020/01/07/container-ship-cosco-pacific-fire-interrupted-voyage/
[MoU Paris]	Internetseite, Stand: 10.08.2020 The Paris Memorandum of Understanding on Port State Control https://www.parismou.org/publications
[MUSTERBAUORDNUNG]	Musterbauordnung – BMO – Fassung November 2002
[MSC/Circ. 850]	Guidelines for the Maintenance and Inspection of Fire-Protection Systems and Appliances, IMO Maritime Safety Committee, London 1998
[MSC/Circ. 1002]	Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety, IMO Maritime Safety Committee, London 2001
[MSC 83/INF.8]	Formal Safety Assessment, FSA, container vessels, details of the FSA, IMO Maritime Safety Committee, London 2007
[MSC/ 83/21/2]	Formal Safety Assessment, FSA, container vessels, IMO Maritime Safety Committee, London 2007
[Pohanish]	Richard P., Sittig's Handbook of Toxic and Hazardous Chemicals and Carcinogens, Seventh Edition, 2017
[Portablespace]	Internetseite, Stand: 23.09.2020 https://www.portablespace.co.uk/product/40ft-x-8ft-used-shipping-container-flat-rack
[Resolution A.952(23)]	GRAPHICAL SYMBOLS FOR SHIP BOARD FIRE CONTROL PLANS, Resolution A.952(23), 25 February 2004
[Richtlinie 2005/33/EG]	Internetseite, Stand: 20.08.2020 http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0059:0069:DE:PDF
[Tossevikeu, Bergmann]	J. Cargo fires on container ships. DNV Technical Paper Paper Series No. 2003-P013, DNV, 2003
[SOLAS]	SOLAS; Consolidated Edition, 1st January 2015

[Spiegel]	Internetseite, Stand: 23.09.2020 https://www.spiegel.de/panorama/hamburger-hafen-container-schiff-brennt-nach-verpuffung-weiter-a-1110613.html
[STCW-Code]	Code for Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, IMO, London 2013
[US Coast Guard]	Internetseite, Stand: 10.08.2020 http://www.uscg.mil/top/about/
[VFDB Leitfaden]	Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Dietmar Hosser, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage November 2013
[3dexport]	Internetseite, Stand: 23.09.2020 https://de.3dexport.com/3dmodel-40ft-shipping-container-open-top-2-209074.htm

Anhang A Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle 13: Beladungsgegenstände

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
1	IPC-Container	2	116	100	120		Polyethylen	Palette mit Kunststoff-tank und Gitterkäfig	
2	IPC-Container	1	116	100	120		Polyethylen	Kunststofftank ohne Palette und Gitterkäfig	

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
3	Sperrholzkiste, groß	1	180	200	300		Sperrholz	Holzkiste leer	
4	Sperrholzkiste klein	1	220	220	115		Sperrholz	Holzkiste leer	
5	Fass	2	90			57	Polyethylen	200 l Fässer, gefüllt mit Salz	

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
6	Palettenstapel	1	115	80	120		Holz	8x Europalette	
7	Box	1	95	80	120		Holz	Europalette mit 4x Pa- lettenkragen	

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
8	Palette beladen	1	95	80	120		Holz, Kunststoff	1x Europalette, 4x Palettenkragen, 8x Rad-schutz LKW	
9	Reifenstapel klein	1	75			80	Holz, Stahl, Gummi	1x Europalette, 3x LKW Reifen inklusive Stahlfelge	

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
10	Reifenstapel groß	1	110			100	Holz, Stahl, Gummi	1x Europalette, 4x LKW Reifen inklusive Stahlfelge	
11	Reifenstapel groß	1	110			100	Holz, Stahl, Gummi	Holzpalette, 3 LKW Reifen groß, 1X klein, inklusive Stahlfelge	

lfd. Nr.	Gegentand	Anzahl	Abmessung in cm				Material	Beschreibung	Abbildung
			Höhe	Breite	Tiefe	Durchmesser			
12	Reifenstapel hoch	1	175			100	Holz, Stahl, Gummi	1x Europalette, 7x LKW Reifen inklusive Stahlfelge	

Anhang B: FDS-Eingangsparameter der Brandsimulation

Versuch_Allgemein.fds
Generated by PyroSim - Version 2020.4.0902

&HEAD CHID='Versuch_Allgemein'/
&TIME T_END=1500.0, DT=5.0/
&DUMP DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/
&MISC TMPA=30.0/

&MESH ID='Mesh01', IJK=30,30,129,
XB=0.0,3.0,0.0,3.0,0.0,13.0/

.....Sprinkler Beginn

&DEVC ID='Nozzle', QUANTITY='TIME',
XYZ=0.75,2.0,12.2/

.....Ende

.....Thermoelemente 1-8 Beginn

&DEVC ID='Thermoelement 1', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.33,1.528,12.132/

&DEVC ID='Thermoelement 2', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.33,1.528,9.932/

&DEVC ID='Thermoelement 3', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.33,1.528,7.282/

&DEVC ID='Thermoelement 4', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.33,1.528,4.432/

&DEVC ID='Thermoelement 5', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=0.33,1.528,1.832/

&DEVC ID='Thermoelement 6', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=1.455,0.81,6.732/

&DEVC ID='Thermoelement 7', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=1.455,1.5,6.732/

&DEVC ID='Thermoelement 8', QUAN-
TITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=1.455,2.3,6.732/

.....Ende

&SURF ID='STEEL',
COLOR='GRAY 80'/
&SURF ID='Yellow Pine',
RGB=102,0,0/

.....Wärmequelle Beginn

&SURF ID='Wärmequelle',
RGB=255,51,51,

.....Geometrie Beginn

&OBST ID='Wand links',
XB=0.28,0.2815,0.0,2.385,0.4,12.432,
SURF_ID='STEEL'/

&OBST ID='Wand rechts',
XB=2.617,2.632,0.0,2.385,0.4,12.432,
COLOR='INVISIBLE', SURF_ID='STEEL'/

&OBST ID='Wand vorne',
XB=0.28,2.632,0.0,2.385,12.417,12.432,
COLOR='INVISIBLE', SURF_ID='STEEL'/

&OBST ID='Wand hinten',
XB=0.28,2.632,0.028,2.385,0.4,0.4015,
SURF_ID='STEEL'/

&OBST ID='Boden',
XB=0.28,2.632,0.0,0.028,0.4,12.432,
SURF_ID='Yellow Pine'/

&OBST ID='Dach',
XB=0.28,2.632,2.37,2.385,0.4,12.432,
COLOR='INVISIBLE', SURF_ID='STEEL'/

.....Ende

.....Beladung Beginn

&OBST ID='Nr. 6',
XB=1.3,2.5,0.028,1.178,0.5,1.3,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 9',
XB=1.3,2.5,0.028,0.7528,1.5,2.3,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 5',
XB=0.38,1.18,0.028,0.2,0.5,1.7,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 5a',
XB=0.53,1.03,0.2,0.9,0.5,1.7, SURF_ID='IN-
ERT'/

&OBST ID='Nr. 3',
XB=0.45,2.45,0.028,1.828,2.5,5.5,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 2a',
XB=0.38,1.38,0.028,1.188,5.7,6.9,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 2b',
XB=0.38,1.38,0.028,1.188,7.1,8.3,
SURF_ID='INERT'/

&OBST ID='Nr. 7',
XB=1.58,2.38,0.028,0.978,5.7,6.9,
SURF_ID='INERT'/

TMP_FRONT=600.0,
EMISSIONITY=0.95/
.....**Ende**

&OBST ID='Nr. 1',
XB=1.48,2.48,0.028,1.188,7.1,8.3,
SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Nr. 4',
XB=0.35,2.55,0.028,1.178,8.6,10.8,
SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Nr. 8',
XB=0.38,1.18,0.028,0.978,11.0,12.2,
SURF_ID='INERT'/
&OBST ID='Nr. 10',
XB=1.58,2.58,0.028,1.128,11.0,12.2,
SURF_ID='INERT'/
.....**Ende**

&VENT ID='Wärmequelle',
SURF_ID='Wärmequelle',
XB=1.36615,1.48375,0.028,0.028,11.49,12.2,
SPREAD_RATE=10.0,
XYZ=1.42495,0.028,11.845/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
CELL_CENTERED=.TRUE., PBX=1.4549/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
CELL_CENTERED=.TRUE., PBZ=12.132/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
PBZ=10.883721/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
PBZ=8.565891/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
PBZ=7.155039/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
PBZ=5.643411/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
PBZ=2.51938/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE',
XB=0.2815,2.632,0.028,1.80717,10.918763,12.432,
FYI='Temperature'/

&TAIL /